14 MECÁNICA DE FLUIDOS

METAS DE APRENDIZAJE

Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:

- El significado de la densidad de un material y la densidad media de un cuerpo.
- Qué se entiende por presión en un fluido y cómo se mide.
- Cómo calcular la fuerza de flotación que ejerce un fluido sobre un cuerpo sumergido en ella.
- La importancia de un flujo laminar contra un flujo de fluido turbulento, y cómo la rapidez del flujo en un tubo depende del tamaño de éste.
- Cómo utilizar la ecuación de Bernoulli para relacionar la presión y la rapidez de flujo en diferentes puntos en ciertos tipos de fluidos.

?Este tiburón debe nadar constantemente para no hundirse en el fondo del océano; sin embargo, los peces tropicales anaranjados pueden permanecer en el mismo nivel del agua con poco esfuerzo. ¿Por qué existe esta diferencia?

Los fluidos desempeñan un papel crucial en muchos aspectos de la vida cotidiana. Los bebemos, respiramos y nadamos en ellos; circulan por nuestro organismo y controlan el clima. Los aviones vuelan a través de ellos y los barcos flotan en ellos. Un fluido es cualquier sustancia que puede fluir; usamos el término tanto para líquidos como para gases. Por lo regular, pensamos que los gases son fáciles de comprimir y que los líquidos son casi incompresibles, aunque hay casos excepcionales.

Comenzaremos nuestro estudio con la **estática de fluidos**, es decir, el estudio de fluidos en reposo en situaciones de equilibrio. Al igual que otras situaciones de equilibrio, ésta se basa en la primera y la tercera leyes de Newton. Exploraremos los conceptos clave de densidad, presión y flotación. La **dinámica de fluidos** —es decir, el estudio de fluidos en movimiento— es mucho más compleja; de hecho, es una de las ramas más complejas de la mecánica. Por fortuna, podemos analizar muchas situaciones importantes usando modelos idealizados sencillos y los principios que ya conocemos, como las leyes de Newton y la conservación de la energía. Aun así, apenas si rozaremos la superficie de este tema tan amplio e interesante.

14.1 Densidad

Una propiedad importante de cualquier material es su **densidad**, que se define como su masa por unidad de volumen. Un material homogéneo, como el hielo o el hierro, tiene la misma densidad en todas sus partes. Usamos la letra griega ρ (rho) para denotar la densidad. Si una masa m de material homogéneo tiene un volumen V, la densidad ρ es

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \text{(definición de densidad)} \qquad (14.1)$$

Dos objetos hechos del mismo material tienen igual densidad aunque tengan masas y volúmenes diferentes. Eso se debe a que la *razón* entre masa y volumen es la misma para ambos objetos (figura 14.1).

14.1 Dos objetos con masas y volúmenes diferentes, pero con igual densidad.

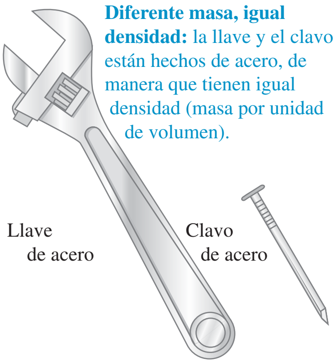


Tabla 14.1 Densidades de algunas sustancias comunes

Material	Densidad (kg/m^3)*	Material	Densidad (kg/m^3)*
Aire (1 atm, 20°C)	1.20	Hierro, acero	7.8×10^3
Etanol	0.81×10^3	Latón	8.6×10^3
Benceno	0.90×10^3	Cobre	8.9×10^3
Hielo	0.92×10^3	Plata	10.5×10^3
Agua	1.00×10^3	Plomo	11.3×10^3
Agua de mar	1.03×10^3	Mercurio	13.6×10^3
Sangre	1.06×10^3	Oro	19.3×10^3
Glicerina	1.26×10^3	Platino	21.4×10^3
Concreto	2×10^3	Estrella enana blanca	10^{10}
Aluminio	2.7×10^3	Estrella de neutrones	10^{18}

*Para obtener las densidades en gramos por centímetro cúbico, divida entre 10^3.

La unidad de densidad en el SI es el kilogramo por metro cúbico (1 kg/m^3). También se usa mucho la unidad cgs, gramo por centímetro cúbico (1 g/cm^3):

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

En la tabla 14.1, se indican las densidades de varias sustancias comunes a temperaturas ordinarias. Observe la amplia gama de magnitudes (figura 14.2). El material más denso que se encuentra en la Tierra es el metal osmio ($\rho = 22{,}500$ kg/m^3), pero esto no es nada en comparación con la densidad de los objetos astronómicos exóticos, como las estrellas enanas blancas y las estrellas de neutrones.

14.2 El precio del oro se cotiza por peso (digamos, en dólares por onza). Puesto que el oro es uno de los metales más densos, es posible almacenar una fortuna en oro en un volumen pequeño.

La **gravedad específica** de un material es la razón entre su densidad y la del agua a 4.0°C, 1000 kg/m^3; es un número puro, sin unidades. Por ejemplo, la gravedad específica del aluminio es 2.7. Aunque el término "gravedad específica" es inadecuado, ya que nada tiene que ver con la gravedad; habría sido mejor utilizar el término "densidad relativa".

La densidad de algunos materiales varía de un punto a otro dentro del material. Un ejemplo es el material del cuerpo humano, que incluye grasa de baja densidad (940 kg/m^3 aproximadamente) y huesos de elevada densidad (de 1700 a 2500 kg/m^3). Otros dos ejemplos son la atmósfera terrestre (que es menos densa a mayores altitudes) y los océanos (que son más densos a mayores profundidades). Para estos materiales, la ecuación (14.1) describe la **densidad media**. En general, la densidad de un material depende de factores ambientales, como la temperatura y la presión.

La medición de la densidad es una técnica analítica importante. Por ejemplo, podemos determinar el nivel de carga de un acumulador midiendo la densidad de su electrólito, que es una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Al descargarse la batería, el H_2SO_4 se combina con el plomo de las placas del acumulador para formar sulfato de plomo ($PbSO_4$) insoluble, lo que reduce la concentración de la disolución. La densidad baja de cerca de 1.30×10^3 kg/m^3 en un acumulador completamente cargado a 1.15×10^3 kg/m^3 en uno descargado.

Otro ejemplo relacionado con automóviles es el anticongelante permanente, que por lo general es una disolución de etilén glicol ($\rho = 1.12 \times 10^3$ kg/m^3) y agua. El punto de congelación de la disolución depende de la concentración de glicol, y puede determinarse midiendo su gravedad específica. Tales mediciones se realizan en forma rutinaria en los talleres de servicio para automóviles usando un dispositivo llamado hidrómetro, el cual describiremos en la sección 14.3.

Ejemplo 14.1 Peso de un cuarto lleno de aire

Calcule la masa y el peso del aire en una estancia a 20 °C cuyo piso mide 4.0 m $\times$ 5.0 m y que tiene una altura de 3.0 m. ¿Qué masa y peso tiene un volumen igual de agua?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Suponemos que el aire es homogéneo, así que la densidad es la misma en todo el cuarto. (Es verdad que el aire es menos den-

continúa

so a gran altitud que cerca del nivel del mar, pero la variación de densidad a lo largo de la altura de 3.0 m del cuarto es despreciable; véase la sección 14.2.)

PLANTEAR: Usaremos la ecuación (14.1) para relacionar la masa (la incógnita) con el volumen (que calculamos a partir de las dimensiones del cuarto) y la densidad (de la tabla 14.1).

EJECUTAR: El volumen de la habitación es $V = (3.0\ \text{m})(4.0\ \text{m}) \times (5.0\ \text{m}) = 60\ \text{m}^3$. La masa m_{aire} está dada por la ecuación (14.1):

$$m_{\text{aire}} = \rho_{\text{aire}} V = (1.20\ \text{kg/m}^3)(60\ \text{m}^3) = 72\ \text{kg}$$

El peso del aire es

$$w_{\text{aire}} = m_{\text{aire}}\, g = (72\ \text{kg})(9.8 \text{m/s}^2) = 700\ \text{N} = 160\ \text{lb}$$

La masa de un volumen igual de agua es

$$m_{\text{agua}} = \rho_{\text{agua}} V = (1000\ \text{kg/m}^3)(60\ \text{m}^3) = 6.0 \times 10^4\ \text{kg}$$

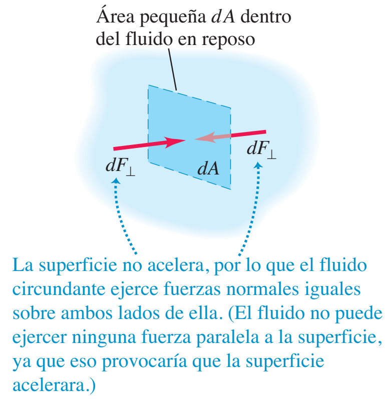
El peso es

$$\begin{aligned} w_{\text{agua}} = m_{\text{agua}}\, g &= (6.0 \times 10^4\ \text{kg})\,(9.8\ \text{m/s}^2) \\ &= 5.9 \times 10^5\ \text{N} = 1.3 \times 10^5\ \text{lb} = 66\ \text{toneladas} \end{aligned}$$

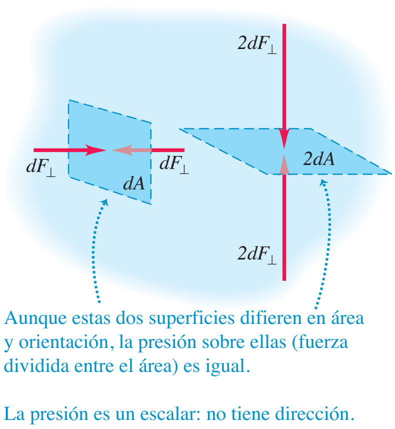
EVALUAR: ¡El aire contenido en un cuarto pesa aproximadamente lo que pesa una persona adulta! El agua es casi mil veces más densa que el aire, y su masa y peso son mayores en la misma proporción. De hecho, el peso de un cuarto lleno de agua seguramente hundiría el piso de una casa común.

Evalúe su comprensión de la sección 14.1 Clasifique los siguientes objetos en orden decreciente de su densidad media: i) masa 4.00 kg, volumen $1.60 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$; ii) masa 8.00 kg, volumen $1.60 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$; iii) masa 8.00 kg, volumen $3.20 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$; iv) masa 2560 kg, volumen $0.640\ \text{m}^3$; v) masa 2560 kg, volumen $1.28\ \text{m}^3$.

14.3 Las fuerzas actúan sobre una pequeña superficie dentro de un fluido en reposo.



14.4 La presión sobre cualquiera de los dos lados de una superficie es igual a la fuerza dividida entre el área. La presión es un escalar y sus unidades son newtons por metro cuadrado. En contraste, la fuerza es un vector y sus unidades son newtons.



14.2 Presión en un fluido

Cuando un fluido (ya sea líquido o gas) está en reposo, ejerce una fuerza perpendicular a cualquier superficie en contacto con él, como la pared de un recipiente o un cuerpo sumergido en el fluido. Ésta es la fuerza que sentimos en las piernas al meterlas en una piscina. Aunque el fluido considerado como un todo está en reposo, las moléculas que lo componen están en movimiento; la fuerza ejercida por el fluido se debe a los choques de las moléculas con su entorno.

Si imaginamos una superficie *dentro* del fluido, el fluido a cada lado de ella ejerce fuerzas iguales y opuestas sobre la superficie. (De otra forma, la superficie se aceleraría y el fluido no permanecería en reposo.) Considere una superficie pequeña de área dA centrada en un punto en el fluido; la fuerza normal que el fluido ejerce sobre cada lado es $dF_\perp$ (figura 14.3). Definimos la **presión** p en ese punto como la fuerza normal por unidad de área, es decir, la razón entre $dF_\perp$ y dA (figura 14.4):

$$p = \frac{dF_\perp}{dA} \qquad \text{(definición de presión)} \tag{14.2}$$

Si la presión es la misma en todos los puntos de una superficie plana finita de área A, entonces

$$p = \frac{F_\perp}{A} \tag{14.3}$$

donde $F_\perp$ es la fuerza normal neta en un lado de la superficie. La unidad del SI para la presión es el **pascal**:

$$1\ \text{pascal} = 1\ \text{Pa} = \text{N/m}^2$$

Ya presentamos el pascal en el capítulo 11. Dos unidades relacionadas, que se emplean sobre todo en meteorología, son el *bar*, igual a 10^5 Pa, y el *milibar*, igual a 100 Pa.

La **presión atmosférica** p_a es la presión de la atmósfera terrestre, es decir, la presión en el fondo de este "mar" de aire en que vivimos. Esta presión varía con el estado del tiempo y con la altitud. La presión atmosférica normal al nivel del mar (valor medio) es 1 atmósfera (atm), definida exactamente como 101,325 Pa. Con cuatro cifras significativas,

$$\begin{aligned} (p_a)_{\text{med}} &= 1\ \text{atm} = 1.013 \times 10^5\ \text{Pa} \\ &= 1.013\ \text{bar} = 1013\ \text{milibares} = 14.70\ \text{lb/in}^2 \end{aligned}$$

CUIDADO **No confunda presión con fuerza** En el lenguaje cotidiano, las palabras "presión" y "fuerza" significan casi lo mismo, pero en la mecánica de fluidos describen cantidades distintas con características diferentes. La presión de fluidos actúa en forma perpendicular a cualquier superficie en el fluido, sin importar su orientación (figura 14.4). Por lo tanto, la presión no tiene una dirección intrínseca: es un escalar. En cambio, la fuerza es un vector con dirección definida. Recuerde que la presión es fuerza por unidad de área. Como muestra la figura 14.4, una superficie con el doble de área recibe el doble de fuerza ejercida por un fluido, por lo que la presión es igual.

Ejemplo 14.2 La fuerza del aire

En la estancia descrita en el ejemplo 14.1, ¿qué fuerza total descendente actúa sobre el piso debida a una presión del aire de 1.00 atm?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Este ejemplo utiliza la relación entre la presión de un fluido (en este caso, el aire), la fuerza normal ejercida por el fluido y el área sobre la cual actúa esa fuerza. En tal situación, la superficie del piso es horizontal, de manera que la fuerza ejercida por el aire es vertical (hacia abajo).

PLANTEAR: La presión es uniforme, así que usamos la ecuación (14.3) para determinar la fuerza $F_\perp$ a partir de la presión y el área.

EJECUTAR: El área del piso es $A = (4.0\text{ m})(5.0\text{ m}) = 20\text{ m}^2$. De acuerdo con la ecuación (14.3), la fuerza total hacia abajo es

$$\begin{aligned} F_\perp &= pA = (1.013 \times 10^5\text{ N/m}^2)(20\text{ m}^2) \\ &= 2.0 \times 10^6\text{ N} = 4.6 \times 10^5\text{ lb} = 230\text{ toneladas} \end{aligned}$$

EVALUAR: Al igual que en el ejemplo 14.1, esta fuerza basta para hundir el piso. ¿Por qué no lo hace? Porque hay una fuerza de igual magnitud *hacia arriba* en el lado de abajo del piso. Si la casa tiene sótano, esa fuerza es ejercida por el aire bajo el piso. En este caso, si despreciamos el espesor del piso, la fuerza *neta* debida a la presión del aire es cero.

Presión, profundidad y ley de Pascal

Si podemos despreciar el peso del fluido, la presión en un fluido es la misma en todo su volumen. Usamos esta aproximación al ver el esfuerzo y la deformación de volumen en la sección 11.4, pero muchas veces el peso del fluido *no* es despreciable. La presión atmosférica es menor a gran altitud que al nivel del mar, lo que obliga a presurizar la cabina de un avión que vuela a 35,000 pies. Al sumergirnos en agua profunda, los oídos nos indican que la presión aumenta rápidamente al aumentar la profundidad.

Podemos deducir una relación general entre la presión p en cualquier punto de un fluido en reposo y la altura y del punto. Supondremos que la densidad ρ y la aceleración debida a la gravedad g tienen el mismo valor en todo el fluido (es decir, la densidad es *uniforme*). Si el fluido está en equilibrio, cada elemento de volumen está en equilibrio. Considere un elemento delgado, de altura dy (figura 14.5a). Las superficies inferior y superior tienen área A, y están a distancias y y $y + dy$ por arriba de algún nivel de referencia donde $y = 0$. El volumen del elemento fluido es $dV = A\,dy$, su masa es $dm = \rho\,dV = \rho A\,dy$, y su peso es $dw = dm\,g = \rho g A\,dy$.

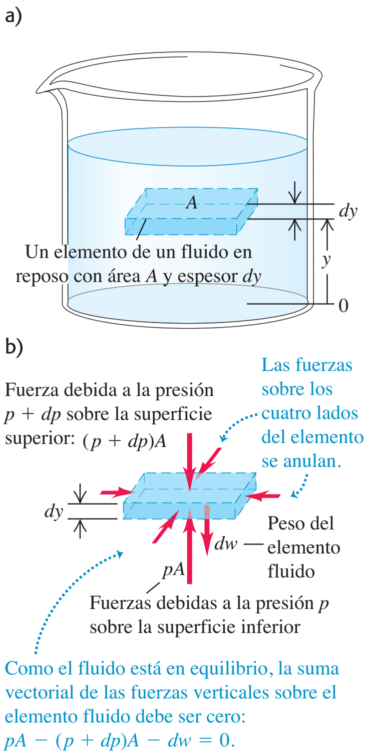
¿Qué otras fuerzas actúan sobre este elemento? (Véase la figura 14.5b.) Llamemos p a la presión en la superficie inferior; la componente y de fuerza total hacia arriba que actúa sobre esa superficie es pA. La presión en la superficie superior es $p + dp$, y la componente y de fuerza total (hacia abajo) sobre esta superficie es $-(p + dp)A$. El elemento de fluido está en equilibrio, así que la componente y de fuerza total, incluyendo el peso y las fuerzas en las superficies superior e inferior, debe ser cero:

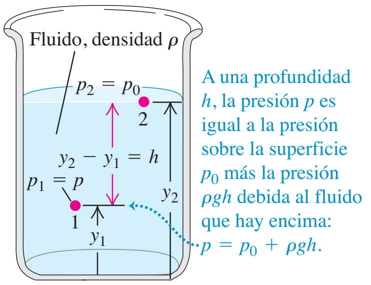
$$\sum F_y = 0 \qquad \text{así que} \qquad pA - (p + dp)A - \rho g A\,dy = 0$$

Dividiendo entre el área A y reordenando, obtenemos

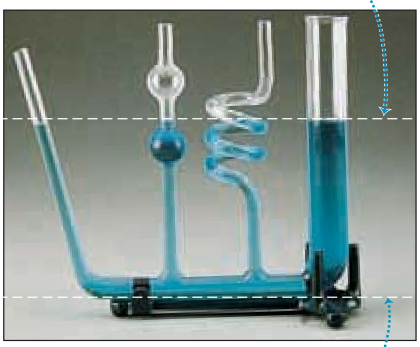
$$\frac{dp}{dy} = -\rho g \tag{14.4}$$

14.5 Las fuerzas sobre un elemento de fluido en equilibrio.

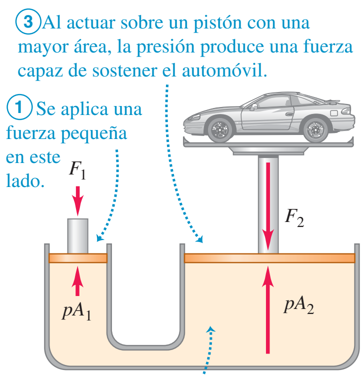




14.6 Cómo varía la presión en función de la profundidad en un fluido con densidad uniforme.



14.7 Todas las columnas de fluido tienen la misma altura, sin importar cuál sea su forma.



14.8 El elevador hidráulico es una aplicación de la ley de Pascal. El tamaño del recipiente lleno de fluido se ha exagerado por claridad.

Esta ecuación indica que si y aumenta, p disminuye; es decir, conforme se sube por el fluido, la presión disminuye, como esperaríamos. Si p_1 y p_2 son las presiones en las alturas y_1 y y_2 respectivamente, y si ρ y g son constantes, entonces

$$p_2 - p_1 = -\rho g(y_2 - y_1) \quad \text{(presión en un fluido de densidad uniforme)} \tag{14.5}$$

Suele ser útil expresar la ecuación (14.5) en términos de la *profundidad* bajo la superficie de un fluido (figura 14.6). Tomemos el punto 1 en cualquier nivel en el fluido y sea p la presión en ese punto. Tomemos el punto 2 en la *superficie* del fluido, donde la presión es p_0 (el subíndice indica profundidad cero). La profundidad del punto 1 bajo la superficie es $h = y_2 - y_1$, y la ecuación (14.5) se convierte en

$$p_0 - p = -\rho g(y_2 - y_1) = -\rho gh \qquad \text{o bien,}$$

$$p = p_0 + \rho gh \quad \text{(presión en un fluido de densidad uniforme)} \tag{14.6}$$

La presión p a una profundidad h es mayor que la presión p_0 en la superficie, en una cantidad ρgh. Observe que la presión es la misma en dos puntos cualesquiera situados en el mismo nivel en el fluido. La *forma* del recipiente no importa (figura 14.7).

La ecuación (14.6) nos dice que si aumentamos la presión p_0 en la superficie, tal vez usando un pistón que embona herméticamente en el recipiente para empujar contra la superficie del fluido, la presión p a cualquier profundidad aumenta exactamente en la misma cantidad. El científico francés Blaise Pascal (1623-1662) reconoció este hecho en 1653 y lo enunció en la llamada *ley de Pascal*.

Ley de Pascal: la presión aplicada a un fluido encerrado se transmite sin disminución a todas las partes del fluido y las paredes del recipiente.

El elevador hidráulico que se representa en la figura 14.8 ilustra la ley de Pascal. Un pistón con área transversal pequeña A_1 ejerce una fuerza F_1 sobre la superficie de un líquido (aceite). La presión aplicada $p = F_1/A_1$ se transmite a través del tubo conector a un pistón mayor de área A_2. La presión aplicada es la misma en ambos cilindros, así que

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \qquad \text{y} \qquad F_2 = \frac{A_2}{A_1}F_1 \tag{14.7}$$

El elevador hidráulico es un dispositivo multiplicador de la fuerza con un factor de multiplicación igual al cociente de las áreas de los pistones. Las sillas de los dentistas, los gatos hidráulicos para autos, muchos elevadores y los frenos hidráulicos se basan en este principio.

En el caso de los gases, el supuesto de que la densidad ρ es uniforme sólo es realista en distancias verticales cortas. En un cuarto de 3.0 m de altura lleno de aire con densidad uniforme de 1.2 kg/m^3, la diferencia de presión entre el piso y el techo, dada por la ecuación (14.6), es

$$\rho gh = (1.2\ \text{kg/m}^3)(9.8\ \text{m/s}^2)(3.0\ \text{m}) = 35\ \text{Pa}$$

es decir, cerca de 0.00035 atm, una diferencia muy pequeña. En cambio, entre el nivel del mar y la cumbre del Monte Everest (8882 m) la densidad del aire cambia casi en un factor de 3, y en este caso no podemos usar la ecuación (14.6). Los líquidos, en cambio, son casi incompresibles, y suele ser una buena aproximación considerar su densidad como independiente de la presión. Una presión de varios cientos de atmósferas sólo causa un pequeño incremento porcentual en la densidad de la mayoría de los líquidos.

Presión absoluta y presión manométrica

Si la presión dentro de un neumático es igual a la presión atmosférica, el neumático estará desinflado. La presión debe ser *mayor* que la atmosférica para poder sostener el vehículo, así que la cantidad significativa es la *diferencia* entre las presiones interior y exterior. Cuando decimos que la presión de un neumático es de "32 libras" (en realidad 32 lb/in^2, igual a 220 kPa o 2.2×10^5 Pa), queremos decir que es *mayor* que la presión atmosférica (14.7 lb/in^2 o 1.01×10^5 Pa) en esa cantidad. La presión *total* en el neumático es de 47 lb/in^2, o 320 kPa. El exceso de presión más allá de la atmosférica suele llamarse **presión manométrica**, y la presión total se llama **presión absoluta**. Los ingenieros usan las abreviaturas psig y psia para "lb/in^2 manométrica" y "lb/in^2 absoluta", respectivamente. Si la presión es *menor* que la atmosférica, como en un vacío parcial, la presión manométrica es negativa.

Ejemplo 14.3 Determinación de las presiones absoluta y manométrica

Un tanque de almacenamiento de 12.0 m de profundidad está lleno de agua. La parte superior del tanque está abierto al aire. ¿Cuál es la presión absoluta en el fondo del tanque? ¿Y la presión manométrica?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El agua es casi incompresible. (Imagine que trata de comprimir con un pistón un cilindro lleno de agua. ¡No podría hacerlo!) Por lo tanto, consideramos que el fluido tiene densidad uniforme.

PLANTEAR: El nivel de la parte superior del tanque corresponde al punto 2 de la figura 14.6, y el nivel del fondo del tanque corresponde al punto 1. Por lo tanto, la incógnita es p en la ecuación (14.6); nos indican que h = 12.0 m y, como el tanque está abierto a la atmósfera, p_0 es igual a 1 atm = 1.01×10^{-5} Pa.

EJECUTAR: De acuerdo con la ecuación (14.6), la presión absoluta es

$$\begin{aligned} p &= p_0 + \rho g h \\ &= (1.01 \times 10^5\ \text{Pa}) + (1000\ \text{kg/m}^3)(9.80\ \text{m/s}^2)(12.0\ \text{m}) \\ &= 2.19 \times 10^5\ \text{Pa} = 2.16\ \text{atm} = 31.8\ \text{lb/in}^2 \end{aligned}$$

La presión manométrica es

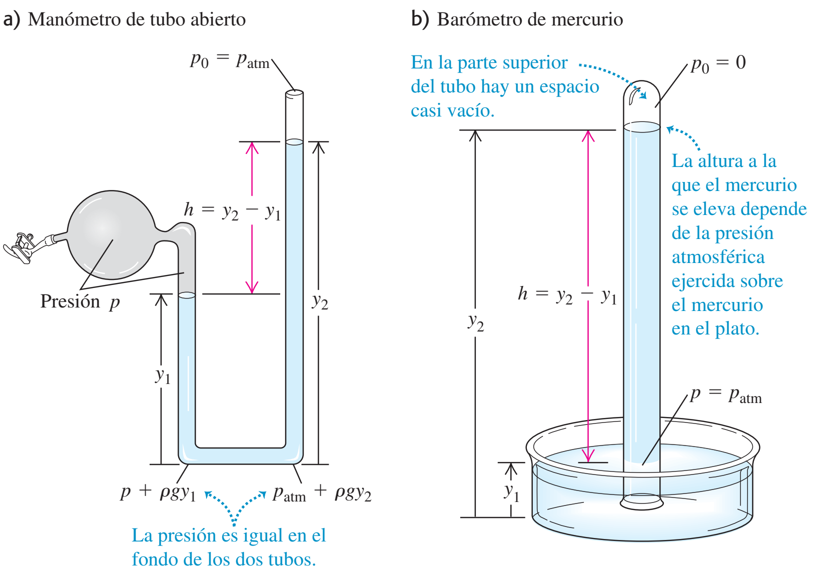
$$\begin{aligned} p - p_0 &= (2.19 - 1.01) \times 10^5\ \text{Pa} \\ &= 1.18 \times 10^5\ \text{Pa} = 1.16\ \text{atm} = 17.1\ \text{lb/in}^2 \end{aligned}$$

EVALUAR: Si un tanque así tiene un medidor de presión, seguramente estará calibrado para indicar la presión manométrica, no la presión absoluta. Como señalamos, la variación en la presión *atmosférica* a una altura de unos cuantos metros es despreciable.

Medidores de presión

El medidor de presión más sencillo es el *manómetro* de tubo abierto (figura 14.9a). El tubo en forma de U contiene un líquido de densidad ρ, con frecuencia mercurio o agua. El extremo izquierdo del tubo se conecta al recipiente donde se medirá la presión p, y el extremo derecho está abierto a la atmósfera, con $p_0 = p_{atm}$. La presión en el fondo del tubo debida al fluido de la columna izquierda es $p + \rho g y_1$, y la debida al fluido de la columna derecha es $p_{atm} + \rho g y_2$. Estas presiones se miden en el mismo punto, así que deben ser iguales:

$$\begin{aligned} p + \rho g y_1 &= p_{atm} + \rho g y_2 \\ p - p_{atm} &= \rho g (y_2 - y_1) = \rho g h \end{aligned} \tag{14.8}$$



14.9 Dos tipos de medidores de presión.

En la ecuación (14.8), p es la *presión absoluta*, y la diferencia $p - p_{atm}$ entre la presión absoluta y la atmosférica es la presión manométrica. Así, la presión manométrica es proporcional a la diferencia de altura $h = y_2 - y_1$ de las columnas de líquido.

Otro medidor de presión común es el **barómetro de mercurio**, que consiste en un largo tubo de vidrio, cerrado por un extremo, que se llena con mercurio y luego se invierte sobre un plato con mercurio (figura 14.9b). El espacio arriba de la columna sólo contiene vapor de mercurio, cuya presión es insignificante, así que la presión p_0 arriba de la columna es prácticamente cero. De acuerdo con la ecuación (14.6),

$$p_a = p = 0 + \rho g(y_2 - y_1) = \rho g h \qquad (14.9)$$

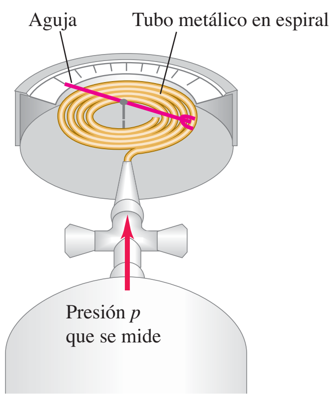
Así, el barómetro de mercurio indica la presión atmosférica p_{atm} directamente por la altura de la columna de mercurio.

Las presiones a menudo se describen en términos de la altura de la columna de mercurio correspondiente, como “pulgadas de mercurio” o “milímetros de mercurio” (que se abrevia mm Hg). Una presión de 1 mm Hg es 1 *torr*, en honor a Evangelista Torricelli, inventor del barómetro de mercurio. Sin embargo, estas unidades dependen de la densidad del mercurio, que varía con la temperatura, y del valor de g, que varía con el lugar, y por ello se prefiere el pascal como unidad de presión.

Un dispositivo común para medir la presión arterial, llamado *esfigmomanómetro*, usa un manómetro lleno de mercurio. Las lecturas de la presión arterial, como 130/80, se refieren a las presiones manométricas máxima y mínima en las arterias, medidas en mm Hg o torr. La presión arterial varía con la altura en el cuerpo; el punto de referencia estándar es la parte superior del brazo, a la altura del corazón.

Muchos tipos de medidores de presión usan un recipiente flexible sellado (figura 14.10). Un cambio en la presión adentro o afuera del recipiente provoca un cambio en sus dimensiones, que se detecta óptica, eléctrica o mecánicamente.

a)



b)

14.10 a) Medidor de presión de Bourdon. Al aumentar la presión dentro del tubo metálico en forma de espiral, éste se endereza y desvía la aguja unida a él. b) Medidor de presión tipo Bourdon empleado en un tanque de gas comprimido.

Ejemplo 14.4 Historia de dos fluidos

Un tubo de manómetro se llena parcialmente con agua. Después se vierte aceite (que no se mezcla con el agua y tiene menor densidad que el agua) en el brazo izquierdo del tubo hasta que la interfaz aceite-agua está en el punto medio del tubo. Ambos brazos del tubo están abiertos al aire. Determine la relación entre las alturas h_{aceite} y h_{agua}.

SOLUCIÓN

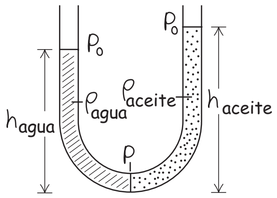
IDENTIFICAR: La relación entre presión y profundidad en un fluido sólo es válida para los fluidos de densidad uniforme. Por lo tanto, no podemos escribir una sola ecuación para el aceite y el agua juntos. Lo que sí podemos hacer es escribir una relación presión-profundidad para cada fluido por separado. Advierta que ambas columnas de fluido tienen la misma presión en la base (donde están en contacto y en equilibrio, así que las presiones deben ser iguales) y en la parte superior (donde ambas están en contacto con la atmósfera y en equilibrio con ella).

PLANTEAR: La figura 14.11 ilustra la situación. Sea p_0 la presión atmosférica, y p la presión en el fondo del tubo. Las densidades de los dos fluidos son ρ_{agua} y ρ_{aceite} (que es menor que ρ_{agua}). Usamos la ecuación (14.6) para cada fluido.

EJECUTAR: Para los dos fluidos, la ecuación (14.6) se convierte en

$$p = p_0 + \rho_{\text{agua}} g h_{\text{agua}}$$
$$p = p_0 + \rho_{\text{aceite}} g h_{\text{aceite}}$$

14.11 Nuestro esquema para este problema.



Puesto que la presión p en la base del tubo es la misma para ambos fluidos, igualamos las dos expresiones y despejamos h_{aceite} en términos de h_{agua}. Puede demostrarse que el resultado es

$$h_{\text{aceite}} = \frac{\rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{aceite}}} h_{\text{agua}}$$

EVALUAR: Puesto que el aceite es menos denso que el agua, la razón $\rho_{\text{agua}}/\rho_{\text{aceite}}$ es mayor que la unidad y h_{aceite} es mayor que h_{agua} (como se observa en la figura 14.11). Es decir, se necesita una mayor altura de aceite menos denso para producir la misma presión p en la base del tubo.

Evalúe su comprensión de la sección 4.2 El mercurio es menos denso a altas temperaturas que a bajas temperaturas. Suponga que saca al exterior un barómetro de mercurio que estaba dentro de un refrigerador bien sellado, en un caluroso día de verano, y observa que la columna de mercurio se mantiene a la misma altura en el tubo. En comparación con la presión del aire en el interior del refrigerador, la presión del aire en el exterior es i) mayor, ii) menor o iii) igual. (Ignore el pequeño cambio en las dimensiones del tubo de vidrio debido al cambio de temperatura.)

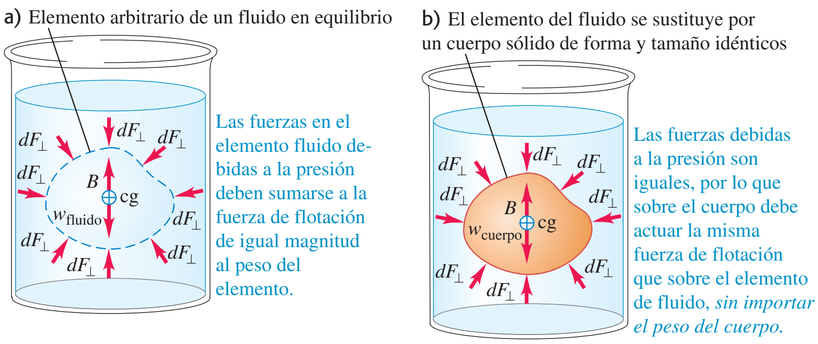
14.3 Flotación

La **flotación** es un fenómeno muy conocido: un cuerpo sumergido en agua parece pesar menos que en el aire. Si el cuerpo es menos denso que el fluido, entonces flota. El cuerpo humano normalmente flota en el agua, y un globo lleno de helio flota en el aire.

El principio de Arquímedes establece lo siguiente: si un cuerpo está parcial o totalmente sumergido en un fluido, éste ejerce una fuerza hacia arriba sobre el cuerpo igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo.

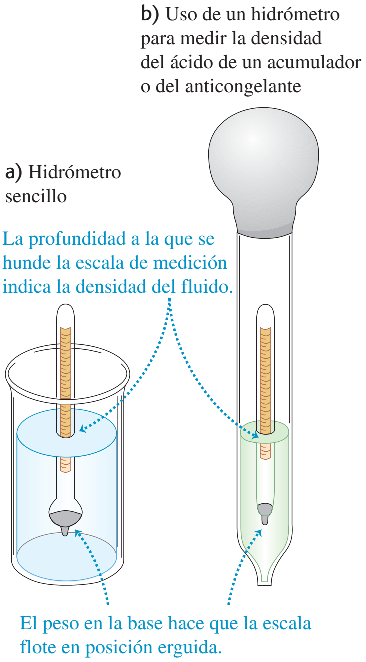
Para demostrar este principio, consideremos una porción arbitraria de fluido en reposo. En la figura 14.12a, el contorno irregular es la superficie que delimita esta porción de fluido. Las flechas representan las fuerzas que el fluido circundante ejerce sobre la superficie de frontera.

Todo el fluido está en equilibrio, así que la suma de todas las componentes y de fuerza sobre esta porción de fluido es cero. Por lo tanto, la suma de todas las componentes y de las fuerzas de *superficie* debe ser una fuerza hacia arriba de igual magnitud que el peso mg del fluido dentro de la superficie. Además, la suma de las torcas sobre la porción de fluido debe ser cero, así que la línea de acción de la componente y resultante de las fuerzas superficiales debe pasar por el centro de gravedad de esta porción de fluido.



14.12 Principio de Arquímedes.

14.13 Medición de la densidad de un fluido.



Ahora retiramos el fluido que está dentro de la superficie y lo sustituimos por un cuerpo sólido cuya forma es idéntica (figura 14.12b). La presión en cada punto es exactamente la misma que antes, de manera que la fuerza total hacia arriba ejercida por el fluido sobre el cuerpo también es la misma, igual en magnitud al peso mg del fluido que se desplazó para colocar el cuerpo. Llamamos a esta fuerza ascendente la **fuerza de flotación** que actúa sobre el cuerpo sólido. La línea de acción de la fuerza de flotación pasa por el centro de gravedad del fluido desplazado (que no necesariamente coincide con el centro de gravedad del cuerpo).

Si un globo flota en equilibrio en el aire, su peso (incluido el gas en su interior) debe ser igual al del aire desplazado por el globo. La carne de un pez es más densa que el agua; sin embargo, el pez puede flotar mientras está sumergido porque tiene una cavidad llena de gas dentro de su cuerpo. Esto hace que la densidad *media* del pez sea igual a la del agua, de manera que su peso neto es igual al peso del agua que desplaza. Un cuerpo cuya densidad media es *menor* que la de un líquido puede flotar parcialmente sumergido en la superficie superior libre del líquido. Cuanto mayor es la densidad del líquido menor será la porción sumergida del cuerpo. Si nadamos en agua de mar (densidad 1030 kg/m^3), flotamos más que en agua dulce (1000 kg/m^3).

Otro ejemplo conocido es el hidrómetro, empleado para medir la densidad de los líquidos (figura 14.13a). El flotador calibrado se hunde en el fluido hasta que el peso del fluido que desplaza es exactamente igual a su propio peso. El hidrómetro flota *más alto* en los líquidos más densos que en los líquidos menos densos, y tiene una escala en el tallo superior que permite leer directamente la densidad. La figura 14.13b ilustra un tipo de hidrómetro de uso común para medir la densidad del ácido de un acumulador o del anticongelante. La base del tubo grande se sumerge en el líquido; se aprieta el bulbo para expulsar el aire y luego se suelta, como si fuera un gotero gigante. El líquido sube por el tubo exterior, y el hidrómetro flota en la muestra de líquido.

Ejemplo 14.5 Flotación

Una estatua de oro sólido de 15.0 kg de peso está siendo levantada de un barco hundido (figura 14.14a). ¿Qué tensión hay en el cable cuando la estatua está *a*) en reposo y totalmente sumergida, y *b*) en reposo y fuera del agua?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Cuando la estatua está sumergida, experimenta una fuerza de flotación hacia arriba igual en magnitud al peso del fluido desplazado. Para calcular la tensión, observamos que la estatua está en equilibrio (en reposo) y consideramos las tres fuerzas que actúan sobre ella: su peso, la fuerza de flotación y la tensión en el cable.

PLANTEAR: La figura 14.14b ilustra el diagrama de cuerpo libre de la estatua en equilibrio. La incógnita es la tensión T. Nos dan el peso mg y podemos calcular la fuerza de flotación B usando el principio de Arquímedes. Haremos esto para dos casos: *a*) cuando la estatua está sumergida en el agua y *b*) cuando está fuera del agua e inmersa en el aire.

EJECUTAR: *a*) Para calcular la fuerza de flotación, primero calculamos el volumen de la estatua usando la densidad del oro de la tabla 14.1:

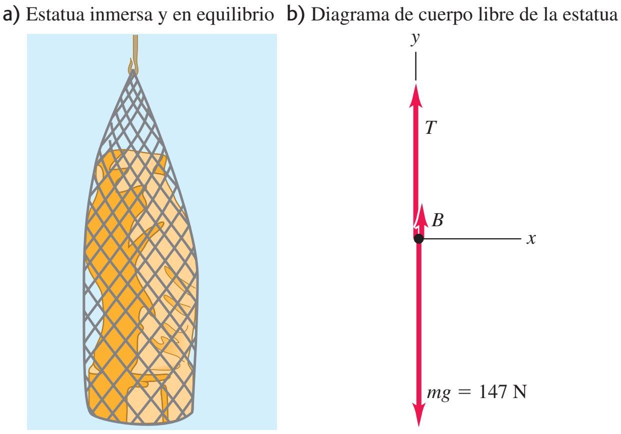
$$V = \frac{m}{\rho_{\text{oro}}} = \frac{15.0\ \text{kg}}{19.3 \times 10^3\ \text{kg/m}^3} = 7.77 \times 10^{-4}\ \text{m}^3$$

Usando otra vez la tabla 14.1, calculamos el peso de ese volumen de agua de mar:

$$\begin{aligned} w_{\text{am}} &= m_{\text{am}} g = \rho_{\text{am}} V g \\ &= (1.03 \times 10^3\ \text{kg/m}^3)(7.77 \times 10^{-4}\ \text{m}^3)(9.80\ \text{m/s}^2) \\ &= 7.84\ \text{N} \end{aligned}$$

Esto es igual a la fuerza de flotación B.

14.14 ¿Cuál es la tensión en el cable que levanta la estatua?



La estatua está en reposo, así que la fuerza externa neta que actúa sobre ella es igual a cero. De acuerdo con la figura 14.14b,

$$\sum F_y = B + T + (-mg) = 0$$

$$\begin{aligned} T &= mg - B = (15.0\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) - 7.84\ \text{N} \\ &= 147\ \text{N} - 7.84\ \text{N} = 139\ \text{N} \end{aligned}$$

Si hay una balanza de resorte unida al extremo superior del cable, marcará 7.84 N menos de lo que marcaría si la estatua no estuviera sumergida en agua de mar. Por ello, la estatua sumergida parece pesar 139 N, cerca del 5% menos que su peso real de 147 N.

b) La densidad del aire es de cerca de 1.2 kg/m^3, así que la fuerza de flotación del aire sobre la estatua es

$$B = \rho_{\text{aire}} V g = (1.2\ \text{kg/m}^3)(7.77 \times 10^{-4}\ \text{m}^3)(9.80\ \text{m/s}^2)$$
$$= 9.1 \times 10^{-3}\ \text{N}$$

Esto es sólo 62 millonésimas del peso real de la estatua. Este efecto es menor que la precisión de nuestros datos, así que lo despreciamos. Por lo tanto, la tensión en el cable con la estatua en el aire es igual al peso de la estatua, 147 N.

EVALUAR: Advierta que la fuerza de flotación es proporcional a la densidad del *fluido*, no a la densidad de la estatua. Cuanto más denso es el fluido, mayor será la fuerza de flotación y menor será la tensión en el cable. Si el fluido tuviera la misma densidad que la estatua, la fuerza de flotación sería igual al peso de la estatua y la tensión sería cero (el cable se aflojaría). Si el fluido fuera más denso que la estatua, la tensión sería *negativa*: la fuerza de flotación sería mayor que el peso de la estatua, y se requeriría una fuerza hacia abajo para evitar que la estatua se elevara.

Tensión superficial

Un objeto menos denso que el agua, como una pelota de playa inflada con aire, flota con una parte de su volumen bajo la superficie. Por otra parte, un *clip* puede descansar *sobre* una superficie de agua aunque su densidad es varias veces mayor que la del agua. Esto es un ejemplo de **tensión superficial**: la superficie del líquido se comporta como una membrana en tensión (figura 14.15). La tensión superficial se debe a que las moléculas del líquido ejercen fuerzas de atracción entre sí. La fuerza neta sobre una molécula dentro del volumen del líquido es cero, pero una molécula en la superficie es atraída hacia el volumen (figura 14.16). Por esa razón, el líquido tiende a reducir al mínimo su área superficial, tal como lo hace una membrana estirada.

La tensión superficial explica por qué las gotas de lluvia en caída libre son esféricas (*no* con forma de lágrima): una esfera tiene menor área superficial para un volumen dado que cualquier otra forma. También explica por qué se usa agua jabonosa caliente en el lavado de la ropa. Para lavarla bien, se debe hacer pasar el agua por los diminutos espacios entre las fibras (figura 14.17). Esto implica aumentar el área superficial del agua, lo que es difícil por la tensión superficial. La tarea se facilita aumentando la temperatura del agua y añadiendo jabón, pues ambas cosas reducen la tensión superficial.

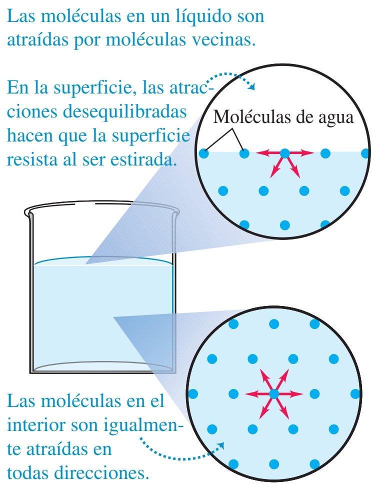
La tensión superficial es importante para una gota de agua de 1 mm de diámetro, que tiene un área relativamente grande en comparación con su volumen. (Una esfera de radio r tiene área $4\pi r^2$ y volumen $(4\pi/3)r^3$. La razón entre la superficie y el área es $3/r$, y aumenta al disminuir el radio.) En cambio, si la cantidad de líquido es grande, la razón entre superficie y volumen es relativamente pequeña y la tensión superficial es insignificante en comparación con las fuerzas de presión. En el resto del capítulo, sólo consideraremos volúmenes grandes de fluidos, así que ignoraremos los efectos de la tensión superficial.

Evalúe su comprensión de la sección 14.3 Usted coloca un recipiente con agua de mar sobre una báscula y toma nota de la lectura que indica la báscula. Ahora usted suspende la estatua del ejemplo 14.5 en el agua (figura 14.18). ¿Cómo cambia la lectura de la báscula? i) Se incrementa en 7.84 N; ii) disminuye en 7.84 N; iii) permanece igual; iv) ninguna de las respuestas anteriores es correcta.

14.18 ¿Cómo cambia la lectura de la báscula cuando la estatua se sumerge en el agua?

14.15 La superficie del agua actúa como membrana sometida a tensión, y permite a este insecto tejedor o zapatero de agua caminar literalmente sobre el agua.

14.16 Una molécula en la superficie es atraída hacia el volumen del líquido, y esto tiende a reducir el área superficial del líquido.



14.17 La tensión superficial dificulta el paso del agua por aberturas pequeñas. La presión requerida p del agua puede reducirse usando agua caliente con jabón, lo que reduce la tensión superficial.