MECÁNICA DE FLUIDOS

12

? 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?

OBJETIVOS 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 la presión en un fluido, y cómo se mide.
- Cómo calcular la fuerza de flotación que ejerce un fluido sobre un cuerpo sumergido en este.
- La importancia de un flujo laminar contra el flujo de un fluido turbulento, y cómo la rapidez del flujo en un tubo depende del tamaño de este último.
- Cómo utilizar la ecuación de Bernoulli para relacionar la presión y la rapidez en el flujo en diferentes puntos en ciertos tipos de fluidos.

Los fluidos desempeñan un papel crucial en muchos aspectos de la vida cotidiana. Los bebemos, los 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. En general, 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, esta se basa en la primera y tercera leyes de Newton. Exploraremos los conceptos clave de densidad, presión y flotación. La **dinámica de fluidos**, que es 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, estudiaremos muy superficialmente este tema tan amplio e interesante.

12.1 Densidad

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

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \text{(definición de densidad)} \qquad (12.1)$$

Dos objetos hechos del mismo material tienen la misma densidad, aunque pueden tener masas y volúmenes diferentes. Esto es porque la *proporción* de masa a volumen es la misma para los dos objetos (figura 12.1).

12.1 Dos objetos con diferentes masas y volúmenes, pero con la misma densidad.

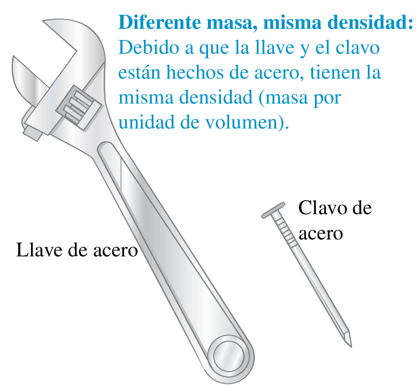


Tabla 12.1 Densidades de algunas sustancias comunes

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	Bronce	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
Cemento	2×10^3	Estrella enana blanca	10^{10}
Aluminio	2.7×10^3	Estrella de neutrones	10^{18}

*Para obtener la densidad en gramos por centímetro cúbico, simplemente divida entre 10^3.

La unidad del SI de la densidad es el kilogramo por metro cúbico ($1\ kg/m^3$). La unidad cgs, el gramo por centímetro cúbico ($1\ g/cm^3$), también se utiliza comúnmente:

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

En la tabla 12.1 se presentan las densidades de algunas sustancias comunes a temperaturas ordinarias. Observe la amplia gama de magnitudes. El material más denso que se encuentra en la Tierra es el metal osmio ($\rho = 22{,}500\ kg/m^3$), pero su densidad es pequeña en comparación con las densidades de exóticos objetos astronómicos, como las estrellas enanas blancas y las estrellas de neutrones.

La **gravedad específica** de un material es la razón entre su densidad y la densidad 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. La "gravedad específica" es un término inadecuado, ya que no tiene nada que ver con la fuerza de gravedad; "densidad relativa" habría sido un mejor término.

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 (aproximadamente $940\ kg/m^3$) y huesos de alta densidad (de 1700 a $2500\ kg/m^3$). Otros dos ejemplos son la atmósfera de la Tierra (que es menos densa a grandes altitudes) y los océanos (que son más densos a mayor profundidad). Para estos materiales, la ecuación (12.1) describe la **densidad media**. En general, la densidad de un material depende de factores ambientales tales como la temperatura y la presión.

La medición de la densidad es una técnica analítica importante. Por ejemplo, se puede determinar el nivel de carga de un acumulador mediante la medición de la densidad de su electrolito, que es una disolución de ácido sulfúrico. Conforme la batería se descarga, el ácido sulfúrico (H_2SO_4) se combina con el plomo en las placas de la batería para formar sulfato de plomo ($PbSO_4$) insoluble, disminuyendo la concentración de la disolución. La densidad disminuye de aproximadamente $1.30 \times 10^3\ kg/m^3$ para un acumulador completamente cargado a $1.15 \times 10^3\ kg/m^3$ para un acumulador descargado.

Otro ejemplo relacionado con los automóviles es el anticongelante de tipo permanente, que normalmente es una disolución de etilenglicol ($\rho = 1.12 \times 10^3\ kg/m^3$) y agua. El punto de congelación de la solución depende de la concentración del glicol, lo que puede determinarse midiendo su gravedad específica. Estas mediciones se realizan usando un dispositivo llamado hidrómetro, el cual estudiaremos en la sección 12.3.

Ejemplo 12.1 Peso de un cuarto lleno de aire

Calcule la masa y el peso del aire en una estancia a 20°C. El piso mide $4.0\ m \times 5.0\ m$, el techo se ubica a una altura de 3.0 m, y la estancia tiene la masa y el peso de un volumen igual de agua.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR y PLANTEAR: Suponemos que el aire es homogéneo, así que la densidad es la misma en todo el cuarto. (El aire es menos denso a grandes alturas 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 12.2). Utilizamos la ecuación (12.1) para relacionar la masa m_{aire} con el volumen V de la habitación (que vamos a calcular) y la densidad del aire ρ_{aire} (dada en la tabla 12.1).

EJECUTAR: Tenemos $V = (4.0\text{ m})(5.0\text{ m})(3.0\text{ m}) = 60\text{ m}^3$. De acuerdo con la ecuación (12.1),

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

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

La masa y el peso de un volumen igual de agua son

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

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

EVALUAR: Un cuarto lleno de aire pesa aproximadamente lo mismo que un adulto promedio. El agua es casi mil veces más densa que el aire, por lo que su masa y su peso son más grandes por el mismo factor. El peso de una habitación llena de agua hundiría el piso de una casa común.

Evalúe su comprensión de la sección 12.1 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 m^3; **v.** masa 2560 kg, volumen 1.28 m^3.

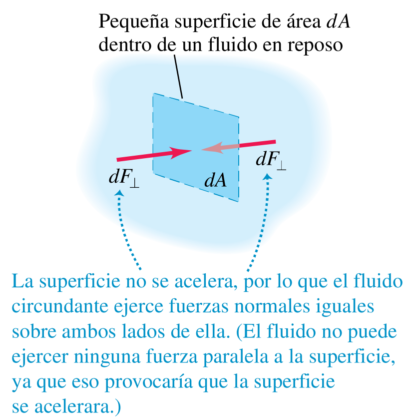
12.2 Presión en un fluido

Cuando un fluido (ya sea líquido o gas) está en reposo, ejerce una fuerza perpendicular a cualquier superficie en contacto con este, como la pared de un recipiente o un cuerpo sumergido en el fluido. Esta es la fuerza que sentimos en las piernas al introducirlas en una alberca. 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 12.2). 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 12.3):

$$p = \frac{dF_\perp}{dA} \qquad \text{(definición de presión)} \qquad (12.2)$$

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



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

$$p = \frac{F_\perp}{A} \qquad (12.3)$$

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

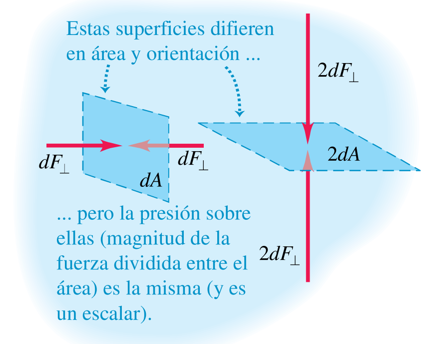
$$1\text{ pascal} = 1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2$$

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

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

12.3 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 cambio, la fuerza es un vector y sus unidades son newtons.



CUIDADO **No confunda presión con fuerza** En el lenguaje cotidiano, las palabras "presión" y "fuerza" significan casi lo mismo, pero en 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 12.3). 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 12.3, una superficie con el doble de área recibe el doble de fuerza ejercida por un fluido, por lo que la presión es igual.

Ejemplo 12.2 La fuerza del aire

En la estancia descrita en el ejemplo 12.1, ¿qué fuerza total descendente actúa sobre el piso debido a una presión del aire de 1.00 atm?

SOLUCIÓN

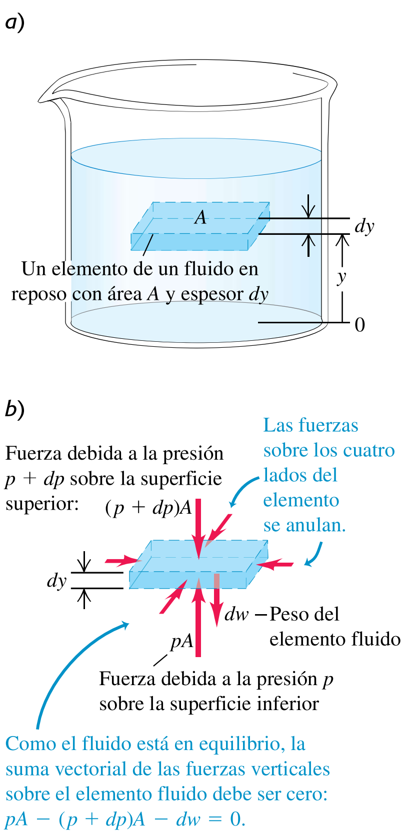
IDENTIFICAR y PLANTEAR: Este ejemplo utiliza la relación entre la presión p de un fluido (aire), el área A sujeta a esa presión y la fuerza normal resultante $F_\perp$ ejercida por el fluido. La presión es uniforme, así que usamos la ecuación (12.3), $F_\perp = pA$, para determinar la fuerza $F_\perp$. El piso es horizontal, por lo que $F_\perp$ es vertical (hacia abajo).

EJECUTAR: Tenemos $A = (4.0 \text{ m})(5.0 \text{ m}) = 20 \text{ m}^2$, así que de acuerdo con la ecuación (12.3),

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

EVALUAR: A diferencia del agua del ejemplo 12.1, $F_\perp$ no hunde el piso aquí, 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.

12.4 Las fuerzas sobre un elemento de fluido en equilibrio.



Video Tutor Demo **Video Tutor Demo**

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 con frecuencia, el peso del fluido *no* es despreciable. La presión atmosférica a gran altitud es menor 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 se incrementa 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 tiene el mismo valor en todo el fluido (es decir, la densidad es *uniforme*), al igual que la aceleración debida a la gravedad g. Si el fluido está en equilibrio, cada elemento de volumen está en equilibrio. Considere un elemento delgado, de espesor dy (figura 12.4*a*). 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 fluido (figura 12.4*b*)? 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 superior es $-(p + dp)A$. El elemento 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:

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

Dividiendo entre el área A y reordenando, obtenemos

$$\frac{dp}{dy} = -\rho g \tag{12.4}$$

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 r y g son constantes, entonces

$$p_2 - p_1 = -\rho g(y_2 - y_1) \quad \text{(presión en un fluido de densidad uniforme)} \qquad (12.5)$$

Con frecuencia es útil expresar la ecuación (12.5) en términos de la *profundidad* bajo la superficie de un fluido (figura 12.5). 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 (12.5) se convierte en

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

$$p = p_0 + \rho g h \qquad \text{(presión en un fluido de densidad uniforme)} \qquad (12.6)$$

La presión p a una profundidad h es mayor que la presión p_0 en la superficie, en una cantidad $\rho g h$. 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 12.6).

La ecuación (12.6) nos dice que si aumentamos la presión p_0 en la superficie superior, 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 12.7 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, por lo que

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \qquad \text{y} \qquad F_2 = \frac{A_2}{A_1}F_1 \qquad (12.7)$$

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

Para los gases, la suposición de que la densidad ρ es uniforme solo 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 (12.6), es

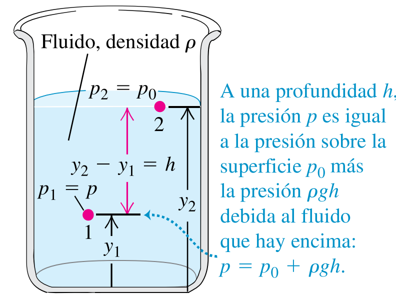
$$\rho g h = (1.2\ \text{kg/m}^3)(9.8\ \text{m/s}^2)(3.0\ \text{m}) = 35\ \text{Pa}$$

o aproximadamente 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 (12.6). Los líquidos, por su parte, son casi incompresibles, y suele ser una buena aproximación considerar su densidad como independiente de la presión. Una presión de varios cientos de atmósferas solo causa un pequeño incremento porcentual en la densidad de la mayoría de los líquidos.

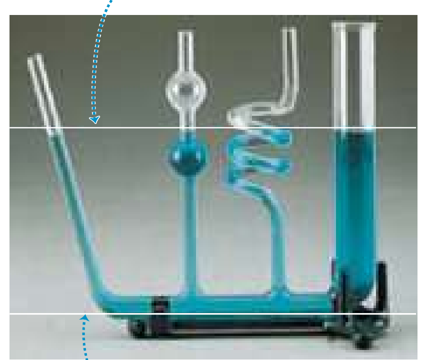
Presión absoluta y presión manométrica

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

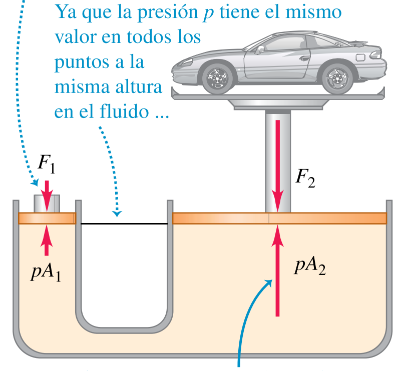
12.5 Cómo varía la presión en función de la profundidad en un fluido con densidad uniforme.



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



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



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 (por las siglas de *pounds per square inch gauge* y *pounds per square inch absolute*). Si la presión es *menor* que la atmosférica, como en un vacío parcial, la presión manométrica es negativa.

Ejemplo 12.3 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 abierta al aire. ¿Cuál es la presión absoluta en el fondo del tanque? ¿Y la presión manométrica?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR y PLANTEAR: La tabla 11.2 indica que el agua es casi incompresible. Por lo tanto, consideramos que el fluido tiene densidad uniforme. El nivel de la parte superior del tanque corresponde al punto 2 de la figura 12.5, y el nivel del fondo del tanque corresponde al punto 1. La incógnita es p en la ecuación (12.6). Tenemos $h = 12.0$ m y $p_0 = 1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^5$ Pa.

EJECUTAR: De acuerdo con la ecuación (12.6), las presiones son

Absoluta:

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

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

EVALUAR: Si un tanque en el fondo tiene un medidor de presión, seguramente estará calibrado para indicar la presión manométrica, no la presión absoluta.

Medidores de presión

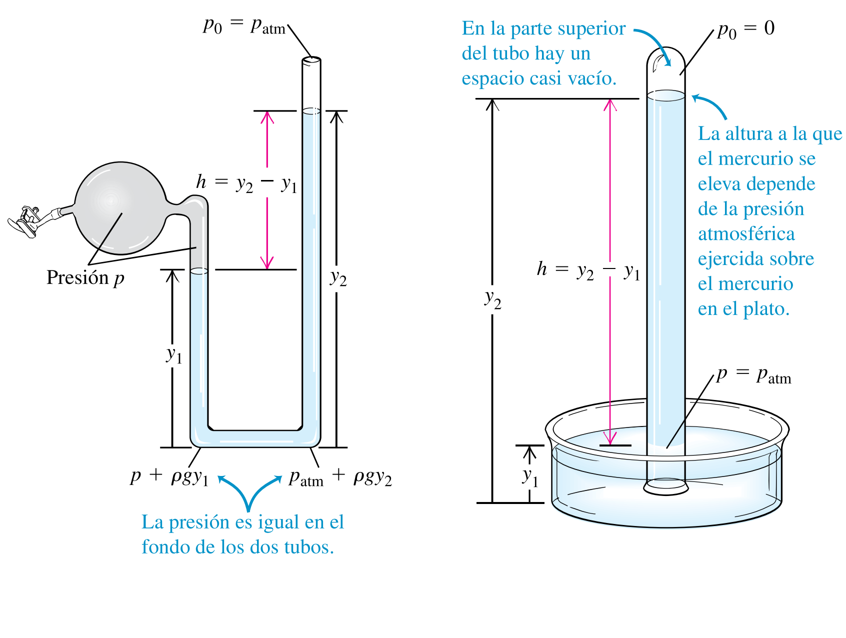
El medidor de presión más sencillo es el *manómetro* de tubo abierto (figura 12.8*a*). El tubo en forma de U contiene un líquido de densidad ρ, con frecuencia mercurio o agua. El extremo izquierdo del tubo se conecta al recipiente donde se medirá la presión p, y el extremo derecho está abierto a la atmósfera, 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 al mismo nivel, así que deben ser iguales:

$$\begin{aligned} p + \rho g y_1 &= p_{atm} + \rho g y_2 \\ p - p_{atm} &= \rho g (y_2 - y_1) = \rho g h \end{aligned} \qquad (12.8)$$

En la ecuación (12.8), 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.

12.8 Dos tipos de medidores de presión.

a) Manómetro de tubo abierto *b)* Barómetro de mercurio



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 12.8*b*). El espacio arriba de la columna solo 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 (12.6),

$$p_{\text{atm}} = p = 0 + \rho g(y_2 - y_1) = \rho g h \qquad (12.9)$$

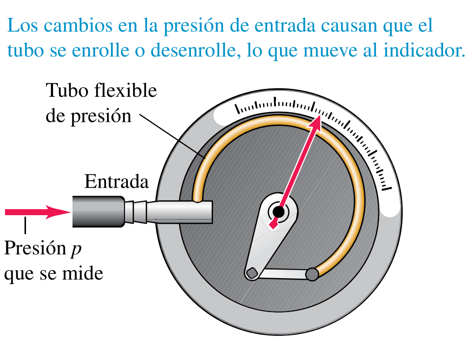
Así, el barómetro de mercurio indica la presión atmosférica p_{atm} directamente a partir de la altura de la columna de mercurio.

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 de Evangelista Torricelli, el 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.

Muchos tipos de medidores de presión usan un recipiente flexible sellado (figura 12.9). Un cambio en la presión adentro o afuera del recipiente provoca un cambio en sus dimensiones, que se detecta de manera óptica, eléctrica o mecánica.

Aplicación Manómetro para medir la presión arterial
Lecturas de presión arterial, tales como el 130/80, dan las presiones manométricas máxima y mínima en las arterias, medidas en mm Hg o en torr. La presión arterial varía con la posición vertical dentro del cuerpo; el punto de referencia estándar es la parte superior del brazo, a la altura del corazón.

a)



b)

12.9 *a*) Medidor de presión de Bourdon. Al aumentar la presión dentro del tubo flexible, este se endereza un poco y desvía la aguja unida a él. *b*) Este tipo de medidor de presión tipo Bourdon se conecta a una línea de gas a alta presión. La presión manométrica indica que está casi sobre los 5 bars (1 bar = 10^5 Pa).

Ejemplo 12.4 Historia de dos fluidos

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

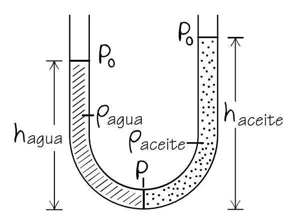
SOLUCIÓN

IDENTIFICAR y PLANTEAR: La figura 12.10 muestra nuestro esquema. La relación entre presión y profundidad en un fluido dada por la ecuación (12.6) solo es válida para fluidos de densidad uniforme; tenemos dos fluidos de densidades diferentes, así que debemos escribir una relación presión-profundidad para cada fluido por separado. Ambas columnas de fluido tienen la misma presión p en la base (donde están en contacto y en equilibrio), y ambas están a la presión atmosférica p_0 en la parte superior (donde ambas están en contacto y en equilibrio con el aire).

EJECUTAR: Para los dos fluidos, la ecuación (12.6) se convierte en

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

12.10 Diagrama 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}. Se puede demostrar que el resultado es

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

EVALUAR: El agua ($\rho_{\text{agua}} = 1000\ \text{kg/m}^3$) es más densa que el aceite ($\rho_{\text{aceite}} \approx 850\ \text{kg/m}^3$), por lo que h_{aceite} es mayor que h_{agua}, como se observa en la figura 12.10. 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 12.2 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).

12.3 Flotación

MasteringPHYSICS
PhET: Balloons & Buoyancy

Video Tutor Demo

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.

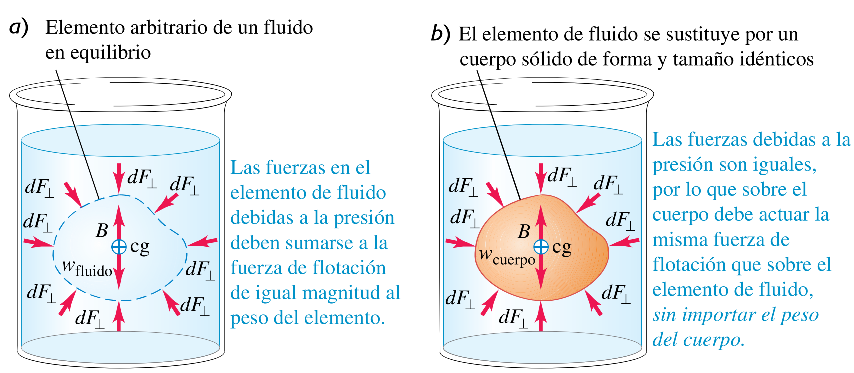
El principio de Arquímedes establece lo siguiente: Si un cuerpo está parcial o totalmente sumergido en un fluido, este ejerce una fuerza hacia arriba sobre el cuerpo igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo.

Para demostrar este principio, consideremos un elemento arbitrario del fluido en reposo. En la figura 12.11*a*, el contorno irregular es la superficie que delimita este elemento 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 este elemento de fluido es cero. Por lo tanto, la suma de todas las componentes *y* de las fuerzas de *superficie* debe ser una fuerza ascendente de igual magnitud que el peso *mg* del fluido dentro de la superficie. Además, la suma de las torcas sobre el elemento de fluido debe ser cero, así que la línea de acción de la componente *y* resultante de las fuerzas de superficie debe pasar por el centro de gravedad de este elemento de fluido.

Ahora retiramos el fluido que está dentro de la superficie y lo sustituimos por un cuerpo sólido cuya forma es idéntica (figura 12.11*b*). 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



12.11 Principio de Arquímedes.

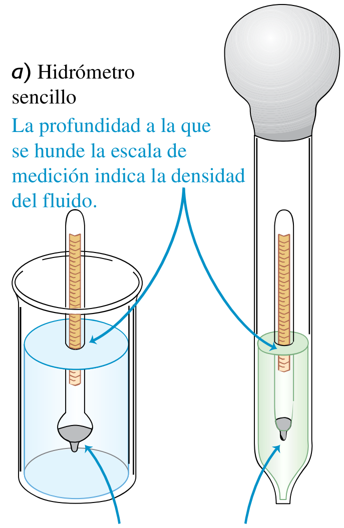
porque tiene una cavidad llena de gas dentro de su cuerpo. Esto hace que la densidad *media* del pez sea igual a la del agua, de manera que su peso neto es igual al peso del agua que desplaza. Un cuerpo cuya densidad media es *menor* que la de un líquido puede flotar parcialmente sumergido en la superficie superior libre del líquido. Cuanto mayor es la densidad del líquido, menor será la parte 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 de flotación es el hidrómetro, empleado para medir la densidad de los líquidos (figura 12.12*a*). 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 12.12*b* 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.

12.12 Medición de la densidad de un fluido.

b) Uso de un hidrómetro para medir la densidad del ácido de un acumulador o del anticongelante

a) Hidrómetro sencillo



Ejemplo 12.5 Flotación

Una estatua de oro sólido de 15.0 kg de peso está siendo levantada de un barco hundido (figura 12.13*a*). ¿Qué tensión hay en el cable (que se supone de masa despreciable) cuando la estatua está *a*) en reposo y totalmente sumergida, y *b*) en reposo y fuera del agua?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR y PLANTEAR: En ambos casos, la estatua se encuentra en equilibrio y experimenta tres fuerzas: su peso, la tensión en el cable y la fuerza de flotación hacia arriba igual en magnitud al peso del fluido desplazado [agua de mar en el inciso *a*), aire en el inciso *b*)]. La figura 12.13b muestra el diagrama de cuerpo libre de la estatua. Nuestras incógnitas son los valores de la tensión en agua de mar (T_{am}) y en el aire (T_{aire}). Conocemos la masa m_{estatua} y podemos calcular la fuerza de flotación en agua de mar (B_{am}) y en el aire (B_{aire}) usando el principio de Arquímedes.

EJECUTAR: *a*) Para calcular la fuerza de flotación B_{am}, primero calculamos el volumen V de la estatua usando la densidad del oro de la tabla 12.1:

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

La fuerza de flotación B_{am} es igual al peso del mismo volumen de agua de mar. Usando otra vez la tabla 12.1:

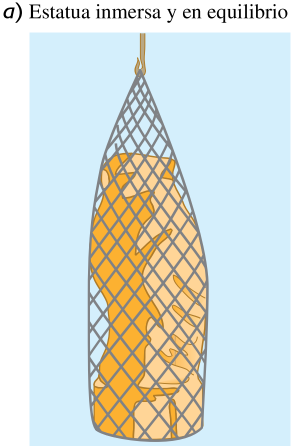
$$\begin{aligned} B_{\text{am}} &= w_{\text{am}} = m_{\text{am}}\,g = \rho_{\text{am}} V g \\ &= (1.03 \times 10^3\ \text{kg/m}^3)(7.77 \times 10^{-4}\ \text{m}^3)(9.80\ \text{m/s}^2) \\ &= 7.84\ \text{N} \end{aligned}$$

La estatua se encuentra en reposo, así que la fuerza externa neta que actúa sobre ella es igual a cero. A partir de la figura 12.13*b*,

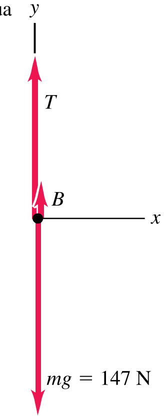
$$\begin{aligned} \textstyle\sum F_y &= B_{\text{am}} + T_{\text{am}} + (-m_{\text{estatua}}\,g) = 0 \\ T_{\text{am}} &= m_{\text{estatua}}\,g - B_{\text{am}} = (15.0\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) - 7.84\ \text{N} \\ &= 147\ \text{N} - 7.84\ \text{N} = 139\ \text{N} \end{aligned}$$

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

a) Estatua inmersa y en equilibrio



b) Diagrama de cuerpo libre de la estatua



Si hay una balanza de resorte unida al extremo superior del cable, marcará 7.84 N menos que su peso real $m_{\text{estatua}}\,g = 147$ N.

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

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

Esto es despreciable comparado con el peso real de la estatua $m_{\text{estatua}}\,g = 147$ N. Por lo que dentro de la precisión de nuestros datos, la tensión en el cable con la estatua en el aire es igual al peso de la estatua, $T_{\text{aire}} = m_{\text{estatua}}\,g = 147$ N.

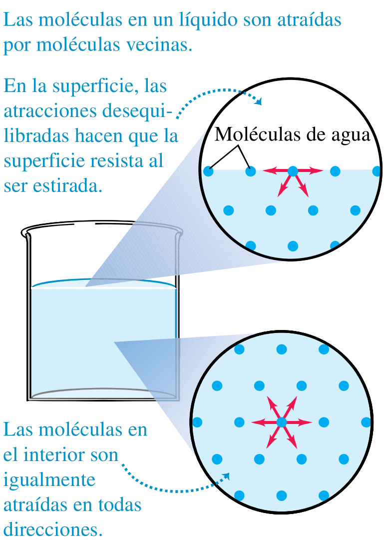
EVALUAR: Observe que la fuerza de flotación es proporcional a la densidad del *fluido* en el que está sumergida la estatua, *no* a la densidad de

Continúa

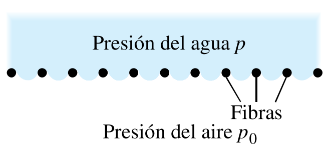
la estatua. Cuanto más denso es el fluido, mayor será la fuerza de flotación y menor será la tensión en el cable. Si el fluido tuviera la misma densidad que la estatua, la fuerza de flotación sería igual al peso de la estatua y la tensión sería cero (el cable se aflojaría). Si el fluido fuera más denso 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.

12.14 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.

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



12.16 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.



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 12.14). 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 12.15). Por esa razón, el líquido tiende a minimizar 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): para un volumen dado, una esfera tiene menor área superficial 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 12.16). Esto implica aumentar el área superficial del agua, lo que es difícil de lograr por la tensión superficial. La tarea se facilita aumentando la temperatura del agua y añadiendo jabón, ya que ambas cosas reducen la tensión superficial.

La tensión superficial es importante para una gota de agua de un milímetro 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 la superficie y el volumen es relativamente pequeña y la tensión superficial es insignificante en comparación con las fuerzas de presión. En el resto del capítulo, solo consideraremos volúmenes grandes de fluidos, así que ignoraremos los efectos de la tensión superficial.

Evalúe su comprensión de la sección 12.3 Usted coloca un recipiente con agua de mar sobre una báscula y toma nota de la lectura que indica la báscula. Ahora suspende la estatua del ejemplo 12.5 en el agua (figura 12.17). ¿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.

12.4 Flujo de fluido

Ahora ya estamos preparados para considerar el *movimiento* de un fluido. El flujo de fluidos suele ser extremadamente complejo, como se aprecia en las corrientes de los rápidos de los ríos o en las llamas de una fogata. Pero algunas situaciones se pueden representar con modelos idealizados relativamente sencillos. Un **fluido ideal** es *incompresible* (es decir, su densidad no puede cambiar) y no tiene fricción interna (llamada **viscosidad**). Los líquidos son aproximadamente incompresibles en casi todas las situaciones, y también podemos tratar un gas como incompresible si las diferencias de presión de una región a otra no son muy grandes. La fricción interna en un fluido causa esfuerzos de corte cuando dos capas adyacentes de fluido se mueven una en relación con la otra, como cuando un fluido fluye dentro de un tubo o alrededor de un obstáculo. En algunos casos, podemos despreciar estas fuerzas de corte en comparación con las fuerzas debidas a la gravedad y a diferencias de presión.

La trayectoria de una partícula individual en un fluido en movimiento se llama **línea de flujo**. Si el patrón global de flujo no cambia con el tiempo, el flujo se llama **flujo estable**. En un flujo estable, cada elemento que pasa por un punto dado sigue la