FÍSICA
CONCEPTOS Y APLICACIONES
Sexta edición

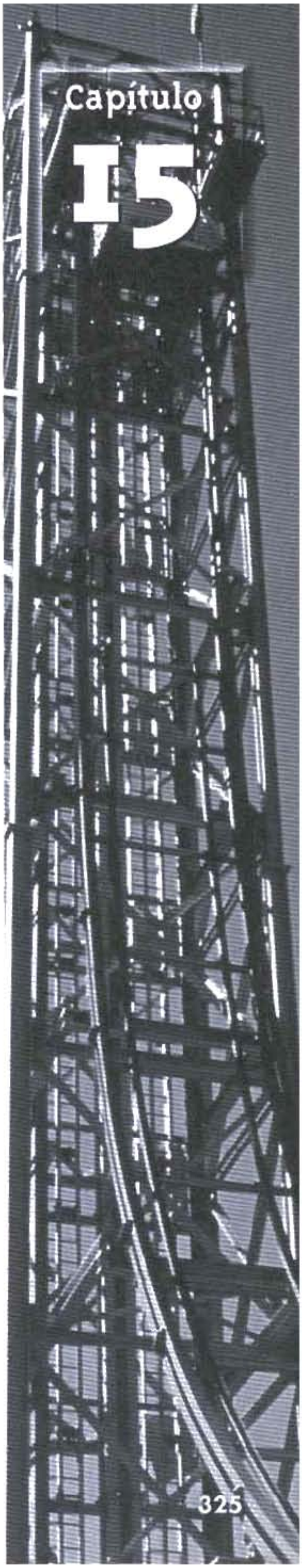
Paul E. Tippens
Departamento de Física
Southern Polytechnic State University
Marietta, Georgia

Revisión técnica:
Manuel Ricardo Garduño Romero
Instituto Politécnico Nacional

Traducción:
Ángel Carlos González Ruiz
Universidad Nacional Autónoma de México

McGRAW-HILL

MÉXICO • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA • LISBOA • MADRID • NUEVA YORK
SAN JUAN • SANTAFÉ DE BOGOTÁ • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • ST. LOUIS • SYDNEY • TORONTO



Fluidos

OBJETIVOS

Después de completar el estudio de este capítulo el alumno:

1. Definirá y aplicará los conceptos de presión de fluidos y empuje vertical hacia arriba (fuerza de flotación) para resolver problemas físicos similares a los que se presentan como ejemplos en el texto.
2. Escribirá e ilustrará con dibujos los cuatro principios básicos de la presión de fluidos como se resumen en la sección 15-3 para demostrar que los ha comprendido.
3. Definirá *presión absoluta, presión manométrica* y *presión atmosférica,* y demostrará mediante ejemplos su comprensión de la relación entre estos términos.
4. Escribirá y aplicará fórmulas para calcular la ventaja mecánica de una prensa hidráulica en términos de las fuerzas o de las áreas de entrada y de salida.
5. Definirá el régimen de flujo (gasto) de un fluido y resolverá problemas que relacionen el régimen de flujo con la velocidad y el área transversal.
6. Escribirá la ecuación de Bernoulli en su forma general y describirá la ecuación cuando se aplica a (*a*) un fluido en reposo, (*b*) un flujo de fluido a presión constante y (*c*) el flujo a través de un tubo horizontal.
7. Aplicará la ecuación de Bernoulli para resolver problemas que incluyan presión absoluta P, densidad ρ, elevación del fluido h, y velocidad del fluido v.

Los líquidos y los gases se conocen como fluidos porque fluyen libremente y tienden a llenar los recipientes que los contienen. En este capítulo aprenderemos que los fluidos ejercen fuerzas sobre las paredes de los recipientes donde están contenidos. Esas fuerzas actúan sobre áreas definidas y originan una condición de presión. En la prensa hidráulica se utiliza la presión del fluido para elevar cargas pesadas. La estructura de los depósitos de agua, las presas y los grandes tanques de aceite se diseñan, en gran parte, tomando en cuenta la presión. En el diseño de barcos, submarinos y globos meteorológicos se deben tomar en cuenta la presión y la densidad del fluido circundante. Estudiaremos también los aspectos fundamentales del flujo de fluidos y las leyes de Bernoulli que gobiernan dicho movimiento.

15-1 DENSIDAD

Antes de estudiar la estática y la dinámica de fluidos, es importante entender la relación entre el peso de un cuerpo y su volumen. Por ejemplo, nos referimos al plomo o al hierro como materiales pesados, mientras que a la madera y al corcho los consideramos ligeros. Lo que en realidad queremos expresar es que un bloque de madera es más ligero que un bloque de plomo si ambos son de tamaño similar. Los términos ligero y pesado son de carácter comparativo. Como se ilustra en la figura 15-1, es posible que un bloque de plomo pese lo mismo que un bloque de madera si su tamaño relativo difiere en forma considerable. Por otra parte, 1 ft^3 de plomo pesa más de 6 veces lo que pesa 1 ft^3 de madera.

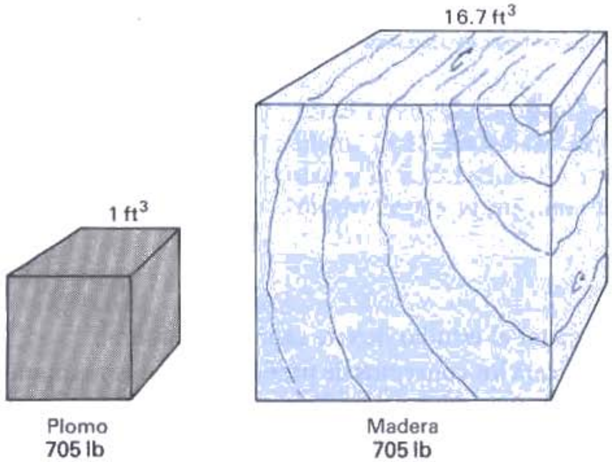


Figura 15-1 Comparación de la relación peso y volumen para plomo y madera.

La cantidad que relaciona el peso de un cuerpo con su volumen se conoce como ***peso específico.***

El peso específico *D* de un cuerpo se define como la relación de su peso *W* entre su volumen *V*. Las unidades son el newton por metro cúbico (N/m^3) y la libra por pie cúbico (lb/ft^3).

$$D = \frac{W}{V} \qquad W = DV \tag{15-1}$$

Por lo tanto, si un objeto de 20 lb ocupa un volumen de 4 ft^3, tiene un peso específico 5 lb/ft^3.

Como se mencionó en el capítulo 7, el peso de un cuerpo no es constante sino que varía de acuerdo al lugar. Una relación más útil para la densidad aprovecha el hecho de que la masa es una constante universal, independientemente de la gravedad.

La densidad o masa específica ρ de un cuerpo se define como la relación de su masa *m* con respecto a su volumen *V*.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad m = \rho V \tag{15-2}$$

Las unidades de la densidad son el resultado del cociente de unidad de masa entre unidad de volumen, por ejemplo, gramos por centímetro cúbico, kilogramos por metro cúbico, o slugs por pie cúbico.

La relación entre peso específico y densidad se determina recordando que $W = mg$. Por consiguiente,

$$D = \frac{mg}{V} = \rho g \tag{15-3}$$

En las unidades del SUEU, la materia se describe generalmente en términos de su peso. Por esta razón, el peso específico se usa con más frecuencia cuando se trabaja con este sistema de unidades. En cambio, en las unidades del SI, la masa es la cantidad más conveniente y se prefiere emplear la densidad de masa. La Tabla 15-1 muestra los pesos específicos y las densidades de algunas sustancias ordinarias.

TABLA 15-1 Densidad de masa y peso específico

Sustancia	D,lb/ft^3	ρ g/cm^3	ρ kg/m^3
Sólidos:			
Aluminio	169	2.7	2,700
Latón	540	8.7	8,700
Cobre	555	8.89	8,890
Vidrio	162	2.6	2,600
Oro	1204	19.3	19,300
Hielo	57	0.92	920
Hierro	490	7.85	7,850
Plomo	705	11.3	11,300
Roble	51	0.81	810
Plata	654	10.5	10,500
Acero	487	7.8	7,800
Líquidos:			
Alcohol	49	0.79	790
Benceno	54.7	0.88	880
Gasolina	42	0.68	680
Mercurio	850	13.6	13,600
Agua	62.4	1.0	1,000
Gases (0°C):			
Aire	0.0807	0.00129	1.29
Helio	0.0110	0.000178	0.178
Hidrógeno	0.0058	0.000090	0.090
Nitrógeno	0.0782	0.00126	1.25
Oxígeno	0.0892	0.00143	1.43

EJEMPLO 15-1

Un tanque cilíndrico de gasolina tiene 3 m de longitud y 1.2 m de diámetro. ¿Cuántos kilogramos de gasolina es capaz de almacenar el tanque?

Solución

Primero se calcula el volumen:

$$V = \pi r^2 h = \pi(0.6\ \text{m})^2(3\ \text{m}) = 3.39\ \text{m}^3$$

Sustituyendo el volumen y la densidad de masa en la ecuación (15-2), obtenemos

$$m = \rho V = (680\ \text{kg/m}^3)(3.39\ \text{m}^3) = 2310\ \text{kg}$$

Otro método para indicar las densidades de las sustancias es por medio de su gravedad específica, la cual compara su densidad con la del agua. Por ejemplo, una sustancia que es la mitad de densa que el agua tendrá una gravedad específica de 0.5.

La gravedad específica de una sustancia se define como la relación de su densidad con respecto a la densidad del agua a 4°C (1000 kg/m³).

Un mejor nombre para esta cantidad es densidad relativa, pero el término gravedad específica se usa más ampliamente.

15-2 PRESIÓN

*inter*NET CONEXIÓN

www.LMNOeng.com

En esta página de LMNO Engineering en Internet podrá encontrar ecuaciones, cálculos, conversión de unidades, tablas y discusiones sobre hidráulica.

La eficiencia de una cierta fuerza a menudo depende del área sobre la que actúa. Por ejemplo, una mujer que usa tacones puntiagudos daña más los pisos que si usara tacones anchos. Aun cuando la dama ejerce la misma fuerza hacia abajo en ambos casos, con los tacones agudos su peso se reparte sobre un área mucho menor. A la fuerza normal por unidad de área se le llama ***presión***. Simbólicamente, la presión P está dada por

$$P = \frac{F}{A} \qquad \text{15-4}$$

donde A es el área donde se aplica la fuerza perpendicular F. La unidad de presión resulta de la relación entre cualquier unidad de fuerza entre la unidad de área. Por ejemplo, newtons por metro cuadrado y libras por pulgada cuadrada. En el sistema SI de unidades, al N/m² se le llama *pascal* (Pa). El *kilopascal* (kPa) es la unidad de medida más apropiada para la presión de fluidos.

$$1\ \text{kPa} = 1000\ \text{N/m}^2 = 0.145\ \text{lb/in}^2$$

EJEMPLO 15-2

Un zapato de golf tiene 10 tacos, cada uno con un área de 0.01 in² en contacto con el piso. Suponga que, al caminar, hay un instante en que los 10 tacos soportan el peso completo de una persona de 180 lb. ¿Cuál es la presión ejercida por los tacos sobre el suelo? Exprese la respuesta en unidades del SI.

Solución

El área total que está en contacto con el piso es 0.1 in² (10×0.01 in²). Sustituyendo en la ecuación (15-4) queda

$$P = \frac{F}{A} = \frac{180\ \text{lb}}{0.1\ \text{in}^2} = 1800\ \text{lb/in}^2$$

Convirtiendo a unidades del SI, obtenemos

$$P = (1800\ \text{lb/in}^2)\left(\frac{1\ \text{kPa}}{0.145\ \text{lb/in}^2}\right) = 1.24 \times 10^4\ \text{kPa}$$

En la medida en que disminuye el área del zapato que está en contacto con el suelo, la presión se vuelve mayor. Es fácil darse cuenta de por qué se debe tomar en cuenta este factor cuando se va a construir el piso.

15-3 PRESIÓN DEL FLUIDO

Es importante la diferencia entre cómo actúa la fuerza sobre un fluido y cómo lo hace sobre un sólido. Puesto que el sólido es un cuerpo rígido, puede soportar que se le aplique una fuerza sin que cambie apreciablemente su forma. Por otra parte, un líquido puede soportar una fuerza únicamente en una superficie o frontera cerrada. Si el fluido no está restringido en su movimiento, empezará a fluir bajo el efecto del esfuerzo cortante, en lugar de deformarse elásticamente.

La fuerza que ejerce un fluido sobre las paredes del recipiente que lo contiene siempre actúa en forma perpendicular a esas paredes.

Ésta es una característica propia de los fluidos que hace que el concepto de presión sea muy útil. Si se perforan agujeros a los lados y al fondo de un barril con agua (fig. 15-2), se demuestra que la fuerza ejercida por el agua es en cualquier parte perpendicular a la superficie del barril.

Al reflexionar un momento se deduce que el líquido también ejerce una presión hacia arriba. Cualquier persona que haya tratado de mantener una balsa por debajo de la superficie del agua se convence de inmediato de la existencia de una presión hacia arriba. En realidad nos damos cuenta de que

Los fluidos ejercen presión en todas direcciones.

La figura 15-3 muestra un líquido bajo presión. Las fuerzas actúan sobre la cara del émbolo, sobre las paredes del recipiente y sobre las superficies del objeto suspendido, como se aprecia en la figura.

De igual manera que los grandes volúmenes de objetos sólidos ejercen grandes fuerzas contra el lugar que los soporta, los fluidos ejercen gran presión al aumentar la profundidad. El fluido en el fondo de un recipiente siempre está sometido a una presión mayor que la que experimenta cerca de la superficie. Esto se debe al peso del líquido que se encuentra arriba. Sin embargo, es preciso señalar una diferencia entre la presión ejercida por los sólidos y la que se produce en el caso de los líquidos. Un objeto sólido puede ejercer únicamente una fuerza hacia abajo debido a su peso. A cualquier profundidad en un fluido la presión es la misma en todas direcciones. Si esto no fuera cierto, el fluido podría fluir bajo la influencia de una presión resultante hasta que se alcanzara una nueva condición de equilibrio.

Laboratorio de bolsillo

Un asunto jugoso

Con un lápiz afilado haga marcas a los 2.0 cm, 4.0 cm y 6.0 cm de altura en el interior de una lata de jugo. Llene de agua la lata hasta la marca de 2.0 cm y mida la masa de la lata y el agua en una balanza. Llene de agua la lata hasta la marca de 6.0 cm y mida de nuevo la masa en la balanza. Haga una gráfica de la masa (eje vertical) contra la altura (eje horizontal). Pronostique cuál será la masa cuando la lata contenga 4.0 cm de agua. La gráfica deberá tener la forma aproximada de una línea recta. Explique por qué la gráfica no pasa por 0,0. ¿Cuál es el significado de la pendiente en esta gráfica?

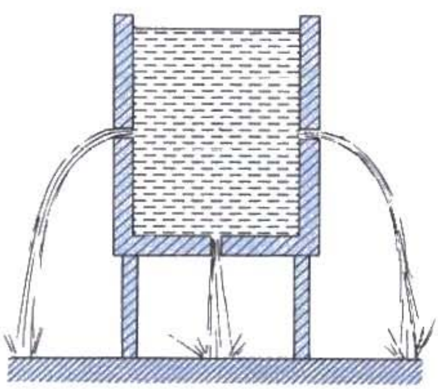


Figura 15-2 Las fuerzas ejercidas por un fluido sobre las paredes del recipiente que lo contiene son perpendiculares en todos los puntos.

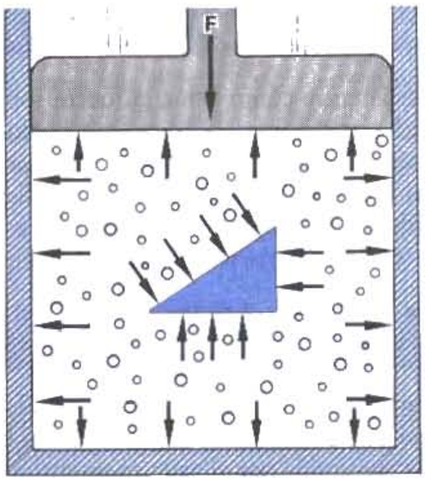


Figura 15-3 Los fluidos ejercen presión en todas direcciones.

P.S.I.

El dentífrico que brota cuando oprimimos el tubo, la maniobra de Heimlich (en la cual se ejerce una brusca presión ascendente sobre el abdomen de una persona para desalojar un objeto atascado en su garganta), y un elevador hidráulico son ejemplos de la ley de Pascal.

Puesto que el peso del fluido que está por arriba de un punto en cuestión es proporcional a su densidad, la presión a cualquier profundidad es también proporcional a la densidad del fluido. Esto puede visualizarse considerando una columna rectangular de agua cuyas dimensiones van desde la superficie hasta la profundidad h, como se muestra en la figura 15-4. El peso de la columna completa actúa sobre el área A en el fondo de la columna.

Partiendo de la ecuación (15-1), podemos escribir el peso de la columna como

$$W = DV = DAh$$

donde D es la densidad de peso del fluido. La presión (peso por unidad de área) a la profundidad h está dada por

$$P = \frac{W}{A} = Dh$$

o bien, en términos de densidad,

$$P = Dh = \rho p h \qquad \text{15-5}$$

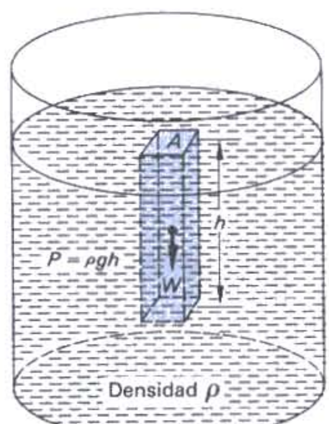


Figura 15-4 Relación entre presión, densidad y profundidad.

La presión del fluido en cualquier punto es directamente proporcional a la densidad del fluido y a la profundidad bajo la superficie del fluido.

EJEMPLO 15-3

La presión del agua en una casa es de 160 lb/in^2 ¿A qué altura debe estar el nivel del agua del recipiente de almacenamiento por encima de la toma de agua de la casa?

Solución

La densidad de peso del agua es 62.4 lb/ft^3. La presión es 160 lb/in^2. Para evitar incongruencia entre las unidades, convertimos la presión a unidades de libras por pie cuadrado.

$$P = (160 \text{ lb/in}^2)\,\frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} = 23\,040 \text{ lb/ft}^2$$

Despejando h en la ecuación (15-5), tenemos

$$h = \frac{P}{D} = \frac{23\,040 \text{ lb/ft}^2}{62.4 \text{ lb/ft}^2} = 369 \text{ ft}$$

En el ejemplo anterior no se mencionó la forma o el tamaño del tanque de almacenamiento del agua. Tampoco se dio información acerca de la trayectoria que sigue el agua o el tamaño de las tuberías que conectan el tanque con la toma de la casa. ¿Debemos suponer que nuestra respuesta es correcta cuando se fundamenta tan sólo en la diferencia de niveles del agua? ¿No tienen algún efecto la forma o el área del depósito sobre la presión del líquido? Para responder estas preguntas, debemos recordar algunas de las características ya estudiadas acerca de los fluidos.

Considere una serie de recipientes que se comunican entre sí y que tienen diferentes áreas y formas, como muestra la figura 15-5. Parecería a primera vista que el mayor volumen contenido en el recipiente A ejercería mayor presión en el fondo que el recipiente D. El efecto de tal diferencia de presión forzaría al líquido a elevarse más en el recipiente D. Sin embargo, si se llenan los recipientes con líquido se demuestra que los niveles son iguales en todos los recipientes.

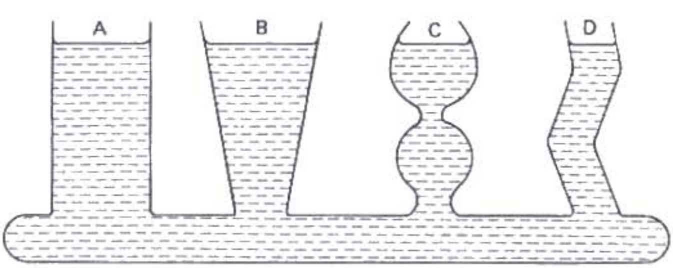


Figura 15-5 El agua siempre busca su propio nivel, lo cual indica que la presión es independiente del área o de la forma del recipiente.

Parte del problema de entender esta paradoja proviene de la confusión de los términos presión y fuerza total. Como la presión se mide en términos de la unidad de área, no consideramos el área total cuando se resuelven problemas que incluyen a la presión. Por ejemplo, en el recipiente A el área del líquido en el fondo del recipiente es mucho mayor que el área del fondo del recipiente D. Esto significa que el líquido en el recipiente A ejercerá una fuerza total mayor en el fondo que el líquido del recipiente D. Pero la fuerza más grande se aplica sobre una área mayor, por lo que la presión es la misma en ambos recipientes.

Si el fondo de los recipientes B, C y D tuvieran la misma área podríamos decir que las fuerzas totales también son iguales en el fondo de estos recipientes. (Por supuesto, las presiones son iguales a cualquier profundidad). Se puede preguntar por qué las fuerzas totales pueden ser iguales cuando los recipientes B y C contienen un mayor volumen de agua. El agua adicional en cada caso se apoya mediante componentes verticales de las fuerzas ejercidas por las paredes del recipiente sobre el fluido. (*Véase* figura 15-6.) Cuando las paredes del recipiente son verticales, las fuerzas que actúan sobre los lados no tienen componentes hacia arriba. Por lo tanto, la fuerza total al fondo de un recipiente es igual al peso de una columna recta de agua sobre el área de la base.

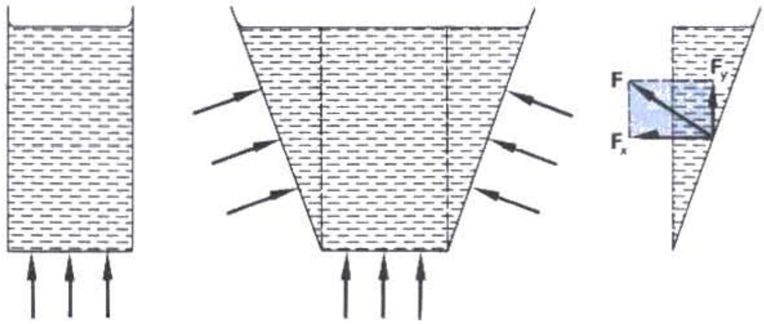


Figura 15-6 La presión en el fondo de cada recipiente sólo es función de la profundidad del líquido y es la misma en todas direcciones. Puesto que el área en el fondo es la misma en ambos recipientes, la fuerza total ejercida sobre el fondo de cada uno de ellos es también igual.

EJEMPLO 15-4

Suponga que los recipientes de la figura 15-5 se llenan con gasolina hasta que el nivel del fluido es de 20 cm por arriba de la base de cada recipiente. Las áreas de las bases de los recipientes A y B son de 20 cm^2 y de 10 cm^2, respectivamente. Compare la presión y la fuerza total sobre la base de cada recipiente.

Solución

La presión es la misma en la base de cualquier recipiente y está dada por

$$P = \rho gh = (680\ \text{kg/m}^3)(9.8\ \text{m/s}^2)(0.20\ \text{m}) = 1330\ \text{Pa}$$

La fuerza total en cada caso es el producto de la presión por el área de la base ($F = PA$). Recuerde que 1 cm^2 = 1×10^{-4} m^2.

$$F = PA = (1330\ \text{Pa})(20 \times 10^{-4}\ \text{m}^2) = 2.67\ \text{N}$$
$$F = PA = (1330\ \text{Pa})(10 \times 10^{-4}\ \text{m}^2) = 1.33\ \text{N}$$

Estrategia para resolver de problemas

Antes de considerar otras aplicaciones de la presión del fluido, vamos a resumir los principios estudiados en esta sección para los fluidos en reposo.

1. Las fuerzas ejercidas por un fluido sobre las paredes del recipiente que lo contiene son siempre perpendiculares a dichas paredes.
2. La presión del fluido es directamente proporcional a la profundidad del fluido y a su densidad.
3. A cualquier profundidad, la presión del fluido es la misma en todas direcciones.
4. La presión del fluido es independiente de la forma o del área del recipiente que lo contiene.

15-4 MEDICIÓN DE LA PRESIÓN

La presión que se estudió en la sección previa se debe únicamente al propio fluido y puede calcularse a partir de la ecuación (15-5). Desafortunadamente, este caso no es el más frecuente. Cualquier líquido en un recipiente abierto, por ejemplo, está sujeto a la presión atmosférica además de la presión debida a su propio peso. Puesto que el líquido es relativamente incompresible, la presión externa de la atmósfera se trasmite por igual a través del volumen del líquido. El primero en enunciar este hecho fue el matemático francés Blas Pascal (1623-1662), y se conoce como ley de Pascal. En general, se enuncia como sigue:

Una presión externa aplicada a un fluido confinado se transmite uniformemente a través del volumen del líquido.

La mayoría de los dispositivos que permiten medir la presión directamente miden en realidad la diferencia entre la ***presión absoluta*** y la ***presión atmosférica***. El resultado obtenido se conoce como la presión manométrica.

Presión absoluta = presión manométrica + presión atmosférica

La presión atmosférica al nivel del mar es 101.3 kPa, o 14.7 lb/in^2. Debido a que la presión atmosférica participa en gran número de cálculos, con frecuencia se usa una unidad de presión de 1 ***atmósfera*** (atm), definida como la presión media que la atmósfera ejerce al nivel del mar, es decir, 101.3 kPa.

Un aparato muy común para medir la presión manométrica es el manómetro de tubo abierto, mostrado en la figura 15-7. El manómetro consiste en un tubo en forma de U que contiene un líquido, que generalmente es mercurio. Cuando ambos extremos del tubo están abiertos, el mercurio busca su propio nivel ya que se ejerce 1 atm de presión en cada uno de los extremos abiertos. Cuando uno de los extremos se conecta a una cámara presurizada, el mercurio se eleva en el tubo abierto hasta que las presiones se igualan. La diferencia entre los dos niveles de mercurio es una medida de la presión manométrica: la diferencia entre la presión absoluta en la cámara y la presión atmosférica en el extremo abierto. El manómetro se usa con tanta frecuencia en situaciones de laboratorio que la presión atmosférica y otras presiones se expresan a menudo en *centímetros de mercurio o pulgadas de mercurio.*

Por lo general, la presión atmosférica se mide en el laboratorio con un barómetro de mercurio. El principio de su operación se muestra en la figura 15-8. Un tubo de

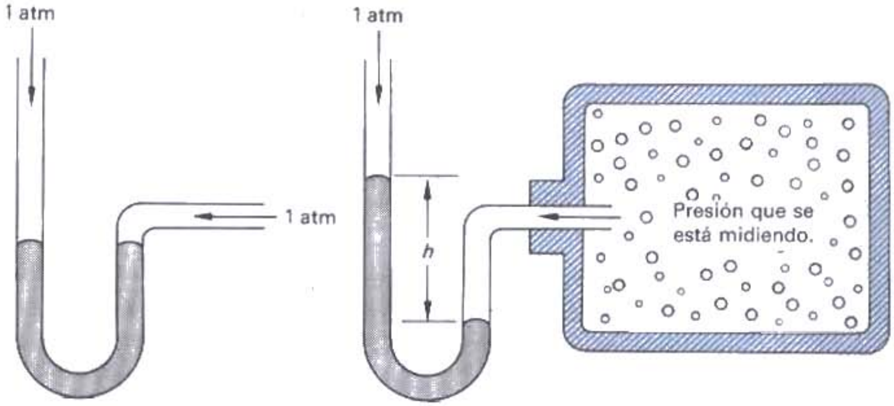


Figura 15-7 Manómetro de tubo abierto. La presión se mide por la altura h de la columna de mercurio.

vidrio, cerrado en un extremo, se llena de mercurio. El extremo abierto se tapa y el tubo se invierte en una cubeta de mercurio. Si no se tapa el extremo abierto, el mercurio fluye hacia afuera del tubo hasta que la presión ejercida por la columna de mercurio equilibra exactamente la presión atmosférica que actúa sobre el mercurio de la cubeta. Puesto que la presión en el tubo sobre la columna de mercurio es cero, la altura de la columna por arriba del nivel del mercurio en la cubeta indica la presión atmosférica. Al nivel del mar, una presión atmosférica de 14.7 lb/in^2 hará que el nivel del mercurio en el tubo se estabilice a una altura de 76 cm, o 30 in.

En resumen, podemos escribir las siguientes medidas equivalentes de la presión atmosférica:

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 101.3 \text{ kPa} = 14.7 \text{ lb/in}^2 = 76 \text{ cm de mercurio} \\ &= 30 \text{ in de mercurio} = 2116 \text{ lb/ft}^2 \end{aligned}$$

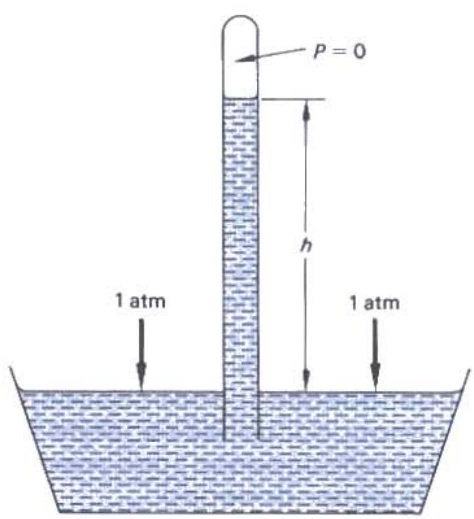


Figura 15-8 Barómetro.

EJEMPLO 15-5

El manómetro de mercurio se usa para medir la presión de un gas dentro de un tanque. (Consulte la figura 15-7). Si la diferencia entre los dos niveles de mercurio es de 36 cm, ¿cuál es la presión absoluta dentro del tanque?

Solución

La presión manométrica es de 36 cm de mercurio, y la presión atmosférica es de 76 cm de mercurio. Por lo tanto, la presión absoluta se determina partiendo de la ecuación (15-5).

$$\text{Presión absoluta} = 36 \text{ cm} + 76 \text{ cm} = 112 \text{ cm de mercurio}$$

La presión en el tanque es equivalente a la presión que ejercería una columna de mercurio de 112 cm de altura.

$$\begin{aligned} P &= Dh = \rho g h \\ &= (13{,}600 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)(1.12 \text{ m}) \\ &= 1.49 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 149 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Verifique que esta presión absoluta es equivalente a 21.6 lb/in^2 o 1.47 atm.

15-5 LA PRENSA HIDRÁULICA

La aplicación más frecuente de la ley de Pascal es la prensa hidráulica, que se ilustra en la figura 15-9. De acuerdo con el principio de Pascal, una presión aplicada al líquido en la columna izquierda se transmitirá íntegramente al líquido de la columna de la derecha. Por lo tanto, si una fuerza de entrada $\mathbf{F}_i$ actúa sobre un émbolo de área A_i, causará una fuerza de salida $\mathbf{F}_o$ que actúa sobre un émbolo de área A_o de modo que

Presión de entrada = presión de salida

$$\frac{F_i}{A_i} = \frac{F_o}{A_o} \qquad \textbf{15-6}$$

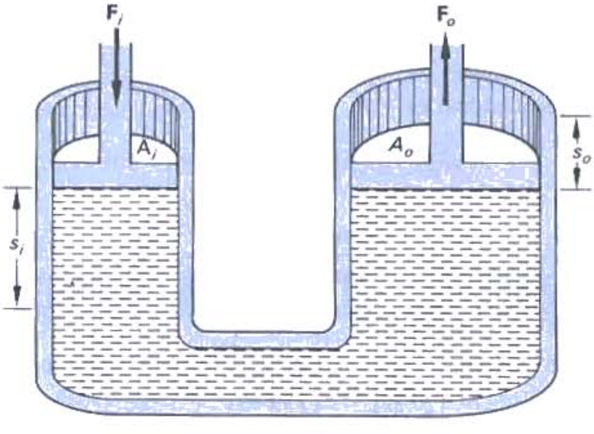


Figura 15-9 Prensa hidráulica.

Sugerencia de matemáticas

Si la presión de entrada es igual a la presión de salida, ¿podemos demostrar que se ha efectuado el mismo trabajo en el lado de la entrada de una prensa hidráulica y en el lado de la salida? En el caso de una prensa hidráulica,

$$\frac{F_i}{F_r} = \frac{A_e}{A_o}$$

en la cual F_i es la fuerza de entrada, F_o es la fuerza de salida, A_i es el área transversal del pistón de entrada, y A_o es el área transversal del pistón de salida. En una prensa hidráulica, el volumen del fluido hidráulico que el cilindro de entrada empuja hacia el cilindro de salida permanece constante. El volumen del fluido es el producto del área transversal del pistón por la distancia que dicho pistón se desplaza. Para los pistones de entrada y salida, respectivamente, $V = A_i s_i$ y $V = A_o s_o$. En virtud de que

$$V_i = V_o$$
$$A_i s_i = A_o s_o$$

si dividimos los dos lados entre $A_o s_i$,

$$\frac{A_i \cancel{s_i}}{A_o \cancel{s_i}} = \frac{\cancel{A_o} s_o}{\cancel{A_o} s_i}$$

resulta

$$\frac{A_i}{A_o} = \frac{s_o}{s_i}$$

Ahora, recordando que $F_i / F_o = A_i / A_o$, obtenemos

$$\frac{F_i}{F_o} = \frac{s_o}{s_i}$$

Multiplicando ahora las fracciones en forma cruzada:

$$F_i s_i = F_o s_o$$

Trabajo de entrada= trabajo de salida

Por lo tanto, las fuerzas de entrada y las fuerzas de salida realizan el mismo trabajo.

La ventaja mecánica ideal de tal dispositivo es igual a la relación de la fuerza de salida con respecto a la fuerza de entrada. Simbólicamente escribimos

$$M_I = \frac{F_o}{F_i} = \frac{A_o}{A_i} \qquad \text{15-7}$$

Una pequeña fuerza de entrada puede ser multiplicada para producir una fuerza de salida mucho mayor utilizando simplemente un émbolo de salida con una área mucho mayor que la del émbolo de entrada. La fuerza de salida está dada por

$$F_o = F_i \frac{A_o}{A_i} \qquad \text{15-8}$$

De acuerdo con los métodos desarrollados en el capítulo 12 para las máquinas simples, el trabajo de entrada debe ser igual al trabajo de salida si despreciamos la fricción. Si la fuerza de entrada F_i recorre una distancia si mientras la fuerza de salida F_o viaja una distancia s_o, podemos escribir

Trabajo de entrada = trabajo de salida

$$F_i s_i = F_o s_o$$

Esta relación conduce a otra expresión útil para la ventaja mecánica ideal de una prensa hidráulica:

$$M_I = \frac{F_o}{F_i} = \frac{s_i}{s_o} \qquad \text{15-9}$$

Observe que la ventaja mecánica se gana a expensas de la distancia de entrada. Por esta razón, la mayoría de las aplicaciones utilizan un sistema de válvulas para permitir que el pistón de salida se eleve por una serie de impulsos cortos del pistón de entrada.

EJEMPLO 15-6

El émbolo más pequeño y el más grande de una prensa hidráulica tienen diámetros de 2 y 24 in, respectivamente. (*a*) ¿Qué fuerza de entrada se requiere para proporcionar una fuerza total de salida de 2000 lb al émbolo grande? (*b*) ¿Qué desplazamiento debe tener el émbolo pequeño para elevar el grande 1 in?

Solución (a)

La ventaja mecánica ideal es

$$M_I = \frac{A_o}{A_i} = \frac{\pi d_o^2/4}{\pi d_i^2/4} = \left(\frac{d_o}{d_i}\right)^2$$

$$= \left(\frac{24 \text{ in}}{2 \text{ in}}\right)^2 = (12)^2 = 144$$

La fuerza de entrada requerida es

$$F_i = \frac{F_o}{M_I} = \frac{2000 \text{ lb}}{144} = 13.9 \text{ lb}$$

Solución (b)

Aplicando la ecuación (15-9), podemos calcular la distancia de entrada.

$$s_i = M_I s_o = (144)(1 \text{ in}) = 144 \text{ in}$$

El principio de la prensa hidráulica se aprovecha en múltiples dispositivos mecánicos y de ingeniería. Entre los ejemplos más comunes están: la dirección hidráulica de vehículos (servodirección), el gato hidráulico, los amortiguadores y el sistema de frenos de los automóviles.

Estrategia para resolver problemas

Fluidos en reposo

1. Dibuje una figura y márquela con las cantidades proporcionadas y las que deben calcularse. Use unidades congruentes para el área, volumen, densidad y presión.
2. No confunda presión absoluta con presión manométrica o densidad con peso específico. Debe usar la presión absoluta a menos que el problema incluya una diferencia de presión. Tenga cuidado con las unidades si intenta usar peso específico, que es fuerza por unidad de volumen.
3. La diferencia de presión entre dos puntos es proporcional a la densidad del fluido y a la profundidad en el fluido:

$$P_2 - P_1 = \rho g h \qquad \rho = \frac{m}{V} \qquad P = \frac{F}{A}$$

4. El principio de Arquímedes establece que un objeto total o parcialmente sumergido en un fluido experimenta una fuerza hacia arriba (empuje), igual al peso del fluido desalojado:

$$F_B = mg = \rho g V \qquad \textit{(fuerza de empuje)}$$

5. Recuerde que el empuje depende tanto de la densidad como del volumen del fluido desalojado. No tiene ninguna relación con la masa o la densidad del objeto sumergido en el fluido. Si el objeto se encuentra totalmente sumergido, el volumen del objeto y el fluido desplazado son iguales. Este hecho puede aprovecharse para determinar empuje en esos casos.
6. Para un objeto que está flotando en el fluido, el empuje debe ser igual al peso del objeto. Esto significa que el peso del objeto debe ser igual al peso del fluido desalojado. Por consiguiente podemos escribir:

$$m_x g = m_f g \qquad \text{o} \qquad \rho_x V_x = \rho_f V_f$$

El subíndice x se refiere al objeto que flota y el subíndice f se refiere al fluido desalojado. Por ejemplo, si un objeto con un volumen de 3 m^3 flota con dos tercios de su volumen sumergido, entonces $V_x = 3$ m^3 y $V_f = 2$ m^3.

15-6 PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Cualquier persona que está familiarizada con la natación y otros deportes acuáticos ha observado que los objetos parecen perder peso cuando se sumergen en agua. En realidad, el objeto puede incluso flotar en la superficie debido a la presión hacia arriba ejercida por el agua. Un antiguo matemático griego, Arquímedes (287-212 a.C.), fue el

P.S.I.

Usted podrá poner a prueba el principio de Arquímedes si sumerge un objeto en un fluido, por ejemplo, agua. Si el objeto no es tan denso como el fluido, se sumergirá sólo hasta el punto en el cual se desplace suficiente agua para igualar el peso del objeto. Así demostrará que el peso del volumen de agua desplazado y el peso del objeto son iguales.

primero que estudió el empuje vertical hacia arriba ejercido por los fluidos. El principio de Arquímedes se enuncia en la siguiente forma:

> **Un objeto que se encuentra parcial o totalmente sumergido en un fluido experimenta una fuerza ascendente (empuje) igual al peso del fluido desalojado.**

El principio de Arquímedes se puede demostrar estudiando las fuerzas que ejerce el fluido sobre un cuerpo que se encuentra suspendido en él. Considere un disco de área A y de altura H que está totalmente sumergido en un fluido, como se muestra en la figura 15-10. Recuerde que la presión a cualquier profundidad h en el fluido está dada por

$$P = \rho g h$$

donde ρ es la densidad de masa del fluido y g es la aceleración de la gravedad. Por supuesto, si deseamos representar la presión absoluta dentro del fluido, tenemos que sumar también la presión externa ejercida por la atmósfera. La presión total hacia abajo P_1 ejercida sobre la parte superior del disco, según la figura 15-10, es por lo tanto:

$$P_1 = P_a + \rho g h_1 \qquad \text{(hacia abajo)}$$

donde Pa es la presión atmosférica y h_1 es la profundidad en la parte superior del disco. En forma similar, la presión hacia arriba P_2 en la parte inferior del disco es

$$P_2 = P_a + \rho g h_2 \qquad \text{(hacia arriba)}$$

donde h_2 es la profundidad medida en la parte inferior del disco. Puesto que h_2 es mayor que h_1, la presión registrada en la parte inferior del disco es mayor que la presión en su parte superior, lo cual da por resultado una fuerza neta hacia arriba. Si representamos la fuerza hacia abajo como F_1 y la fuerza hacia arriba como F_2, podemos escribir

$$F_1 = P_1 A \qquad F_2 = P_2 A$$

La fuerza neta hacia arriba ejercida por el fluido sobre el disco se llama ***empuje*** y está dada por

$$\begin{aligned} F_B &= F_2 - F_1 = A(P_2 - P_1) \\ &= A\,(P_a + \rho g h_2 - P_a - \rho g h_1) \\ &= A\rho g(h_2 - h_1) = A\rho g H \end{aligned}$$

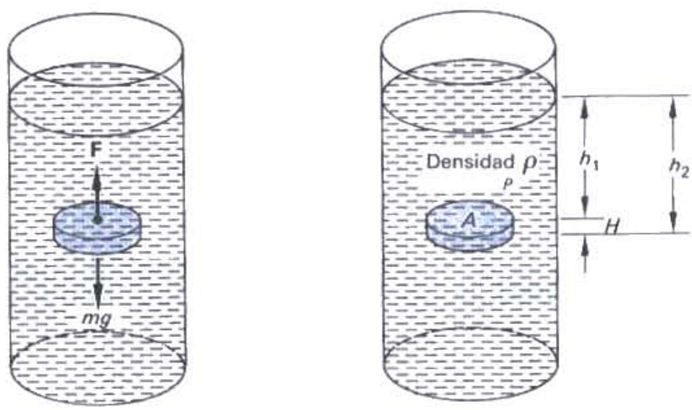


Figura 15-10 El empuje que se ejerce sobre el disco es igual al peso del fluido que se desaloja.

donde $H = h_2 - h_1$ es la altura del disco. Finalmente, si recordamos que el volumen del disco es $V = AH$, obtenemos este importante resultado:

$$F_B = V\rho g = mg \tag{15-10}$$

$$\textit{empuje} = \textit{peso del fluido desalojado}$$

que es el principio de Arquímedes.

Al aplicar este resultado debemos recordar que la ecuación (15-10) nos permite calcular únicamente el empuje ocasionado por la diferencia de presiones. No representa en realidad la fuerza resultante. Un cuerpo se sumergirá si el peso del fluido que desaloja (el empuje) es menor que el peso de dicho cuerpo. Si el peso del fluido desalojado es exactamente igual al peso del cuerpo sumergido, éste ni se hunde ni se va hasta arriba. En este caso, el cuerpo estará en equilibrio. Si el peso del fluido desalojado excede al peso del cuerpo sumergido, el cuerpo se elevará hasta la superficie y flotará. Cuando el cuerpo flota y alcanza el equilibrio en la superficie, desplazará su propio peso de líquido. La figura 15-11 demuestra esto mediante el uso de un recipiente cilíndrico con vertedero y un vaso para recibir el fluido desalojado por un bloque de madera.

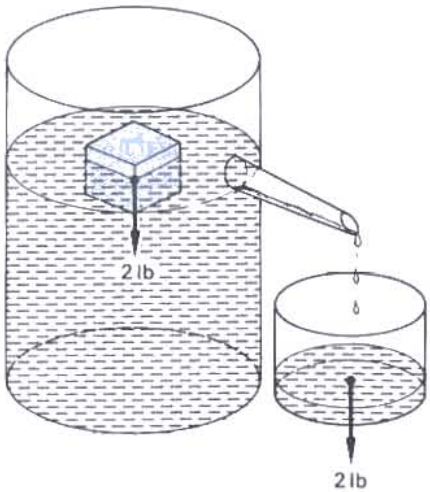


Figura 15-11 Un cuerpo que flota desaloja su propio peso de fluido.

CUESTIONES DE FÍSICA

El tornillo de Arquímedes
Un invento de Arquímedes está a punto de aplicarse, en gran escala, en los futuros parques acuáticos. El tornillo de Arquímedes es un tornillo helicoidal giratorio que permite elevar agua. El Aquavator, un tubo de tornillo helicoidal de 40 ft de altura, tiene su base sumergida en una piscina en la cual la gente espera ser transportada hasta la parte superior de un tobogán acuático. Las personas flotan en la parte inferior del tubo. El tubo gira y los individuos que flotan en el agua capturada por el tubo ascienden lentamente hasta la cumbre, donde son soltados directamente en el tobogán acuático.

EJEMPLO CONCEPTUAL 15-7

Un corcho tiene un volumen de 4 cm^3 y una densidad de 207 kg/m^3. *(a)* ¿Qué volumen del corcho se encuentra bajo la superficie cuando el corcho flota en agua? *(b)* ¿Qué fuerza hacia abajo es necesaria para sumergir el corcho por completo?

Solución (a)

El corcho desplazará un volumen de agua igual a su propio peso. Recordando que 1 cm^3 = 1×10^{-6} m^3, el peso de 4 cm^3 de corcho es

$$\begin{aligned} W = \rho g V &= (207 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)(4 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \\ &= 8.11 \times 10^{-3} \text{ N} \end{aligned}$$

Puesto que $W = \rho g V$, el volumen del agua desalojada es

$$V = \frac{W}{\rho g} = \frac{8.11 \times 10^{-3} \text{ N}}{(1000 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)}$$
$$= 8.28 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ o } 0.828 \text{ cm}^3$$

Por lo tanto, el volumen del corcho bajo el agua es también 0.828 cm^3.

Si el área de la superficie flotante fuera conocida, se podría calcular a qué profundidad se sumergiría el corcho en el agua. Observe que aproximadamente el 21 por ciento del corcho se encuentra bajo el agua. Como un ejemplo adicional, demuestre usted que la fracción de volumen que está sumergida es igual a la gravedad específica de un objeto.

Solución (b)

Para sumergir el corcho se debe ejercer una fuerza descendente F, además del peso W del corcho. La suma de estas fuerzas es igual al empuje F_B:

$$F + W = F_B$$

La fuerza necesaria F es por lo tanto igual a la diferencia entre el empuje y el peso del corcho.

$$F = F_B - W$$

El empuje es igual al peso de 4 cm^3 de agua.

$$\begin{aligned} F_B &= \rho g V = (1000 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)(4 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \\ &= 39.2 \times 10^{-3} \text{N} \end{aligned}$$

La fuerza requerida F para sumergir al corcho es

$$F = 39.2 \times 10^{-3} \text{ N} - 8.11 \times 10^{-3} \text{ N} = 31.1 \times 10^{-3} \text{ N}$$

EJEMPLO 15-8

Un globo meteorológico tiene que operar a una altitud donde la densidad del aire es 0.9 kg/m^3. A esa altitud, el globo tiene un volumen de 20 m^3 y está lleno de hidrógeno ($\rho_H = 0.09$ kg/m^3). Si la bolsa del globo pesa 118 N, ¿qué carga es capaz de soportar a este nivel?

Solución

El empuje es igual al peso del aire desalojado. Por lo tanto,

$$F_B = \rho g V = (0.9 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)(20 \text{ m}^3) = 176 \text{ N}$$

El peso de 20 m^3 de hidrógeno es

$$W_H = \rho_H g V = (0.09 \text{ kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)(20 \text{ m}^3) = 17.6 \text{ N}$$

La carga que soporta es

$$\begin{aligned} W_L &= F_B - W_H - W_B \\ &= 176 \text{ N} - 17.6 \text{ N} - 118 \text{ N} = 40.4 \text{ N} \end{aligned}$$

Los globos grandes pueden conservar una condición de equilibrio a cualquier altitud mediante el ajuste de su peso o del empuje. El peso puede aligerarse soltando lastre que sirve para ese propósito. El empuje puede disminuir, dejando salir gas del globo, o aumentar insuflando gas al globo flexible. Los globos de aire caliente usan la baja densidad del aire caliente para poder flotar.

15-7 FLUJO DE FLUIDOS

Hasta ahora, nuestro estudio de los fluidos se ha restringido a condiciones de reposo, que son considerablemente más sencillas que el estudio de fluidos en movimiento. Las dificultades matemáticas a las que hay que enfrentarse cuando se intenta describir el movimiento de un fluido son formidables. La tarea se facilitará si hacemos ciertas suposiciones. Ante todo, consideraremos que todos los fluidos en movimiento muestran una corriente laminar o flujo aerodinámico.

El flujo aerodinámico es el movimiento de un fluido en el cual cada partícula en el fluido sigue la misma trayectoria (pasa por un punto particular) que siguió la partícula anterior.

La figura 15-12 muestra las líneas de corriente de flujo de aire que pasan por dos obstáculos estacionarios. Observe que las líneas de corriente se rompen cuando el aire pasa sobre el segundo obstáculo, generando corriente turbulenta y remolinos. Estos pequeños remolinos representan el ***flujo turbulento*** y absorben gran parte de la energía del fluido, incrementando el arrastre por fricción a través del fluido.

Vamos a considerar, además, que los fluidos son incompresibles y que no presentan una fricción interna apreciable. En estas condiciones, se pueden hacer algunas predicciones acerca de la velocidad de flujo del fluido a lo largo de una tubería o de otro recipiente.

El gasto se define como el volumen de fluido que pasa a través de cierta sección transversal en la unidad de tiempo.

Para expresar esta relación en forma cuantitativa, consideraremos el caso de un líquido que fluye a lo largo de una tubería como la que se ilustra en la figura 15-13, con una velocidad media v. En un intervalo de tiempo t, cada partícula en la corriente se mueve

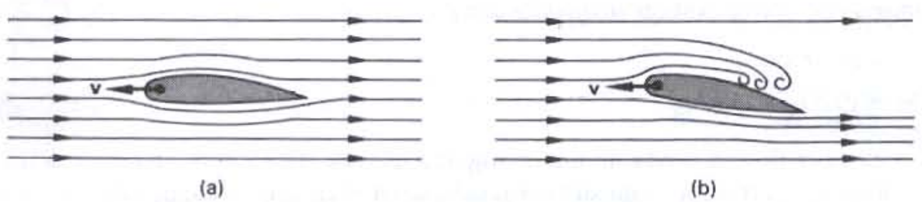


Figura 15-12 Flujos laminar y turbulento en la trayectoria de un fluido.

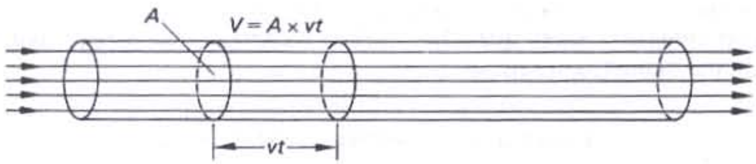


Figura 15-13 Cálculo de la velocidad de un fluido que circula por un tubo.

Tecnología actual

¿Bats de béisbol con hoyuelos?

Tal vez haya visto usted, o incluso probado, un nuevo tipo de bat de béisbol que tiene hoyuelos en toda su superficie, similares a los de una pelota de golf. En realidad, estos hoyuelos ayudan a que el bat gire más rápidamente en el aire, debido a la dinámica de fluidos. Los hoyuelos producen una turbulencia microscópica que, a su vez, da lugar a un flujo más aerodinámico.

a través de una distancia vt. El volumen V que fluye a través de la sección transversal A está dado por

$$V = Avt$$

Por lo tanto, el gasto (volumen por unidad de tiempo) se puede calcular partiendo de

$$R = \frac{Avt}{t} = vA \qquad 15\text{-}11$$

$$\textit{Gasto} = \textit{velocidad} \times \textit{sección transversal}$$

Las unidades de R expresan la relación de una unidad de volumen entre una unidad de tiempo. Ejemplos frecuentes de esto son: pies cúbicos por segundo, metros cúbicos por segundo, litros por segundo y galones por minuto.

Si el fluido es incompresible y no tomamos en cuenta los efectos de la fricción interna, el gasto R permanecerá constante. Esto significa que una variación en la sección transversal en la tubería, como se muestra en la figura 15-14, da por resultado un cambio en la velocidad del líquido, de tal modo que el producto vA permanece constante. Simbólicamente escribimos

$$R = v_1A_1 = v_2A_2 \qquad 15\text{-}12$$

Un líquido fluye con más rapidez a través de una sección estrecha de tubería y más lentamente a través de secciones más amplias. Este principio es la causa de que el agua fluya más rápido cuando las orillas de un arroyo en algunas partes están más cercanas entre sí.

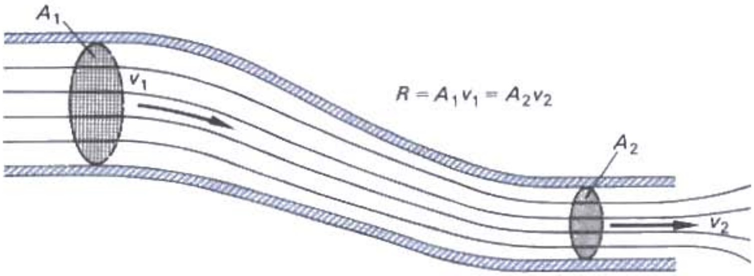


Figura 15-14 En el flujo laminar, el producto de la velocidad del fluido por el área de la sección transversal del tubo es constante en cualquier punto.

EJEMPLO 15-9

El agua fluye a través de una manguera de hule de 2 cm de diámetro a una velocidad d 4 m/s. *(a)* ¿Qué diámetro debe tener el chorro si el agua sale a 20 m/s? *(b)* ¿Cuál es el gasto en metros cúbicos por minuto?

Solución (a)

El gasto es constante, o sea que $A_1v_1 = A_2v_2$. Como el área A es proporcional al cuadrado del diámetro, tenemos

$$d_1^2v_1 = d_2^2v_2 \qquad \text{o bien} \qquad d_2^2 = \frac{v_1}{v_2}d_1^2$$

de donde

$$d_2^2 = \frac{4\text{ m/s}}{20\text{ m/s}}(2\text{ cm})^2 = 0.8\text{ cm}^2$$

Sacando raíz cuadrada a cada término de la ecuación nos da

$$d_2 = 0.894\text{ cm}$$

Solución (b)

Para calcular el gasto, primero debemos determinar el área de la manguera de 2 cm de diámetro.

$$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi(2\text{ cm})^2}{4} = 3.14\text{ cm}^2$$

$$= 3.14\text{ cm}^2\left(\frac{1 \times 10^{-4}\text{ m}^2}{1\text{ cm}^2}\right) = 3.14 \times 10^{-4}\text{ m}^2$$

El gasto es $R = A_1v_1$, así que

$$R = (3.14 \times 10^{-4}\text{ m}^2)(4\text{ m/s}) = 1.26 \times 10^{-3}\text{ m}^3\text{/s}$$
$$= (1.26 \times 10^{-3}\text{ m}^3\text{/s})(60\text{ s/min}) = 0.0754\text{ m}^3\text{/min}$$

El mismo valor debe obtenerse considerando el producto A_2v_2.

interNET CONEXIÓN

www.sciam.com/1197issue/1197amsci.html
Si desea construir en su casa un túnel de viento en el cual pueda realizar medidas aerodinámicas, visite esta página de Internet.

Estrategia para resolver problemas

Problemas sobre gasto

1. Lea el problema cuidadosamente, y después de dibujar un esquema, haga una lista con la información proporcionada.
2. Recuerde que el gasto R representa el volumen del fluido que pasa por una determinada sección transversal en la unidad de tiempo.
3. Cuando un volumen de fluido pasa de una sección transversal A_1 a otra A_2, el gasto no cambia.

$$R = v_1A_1 = v_2A_2$$

Asegúrese de utilizar unidades congruentes para el volumen y el área.

4. Puesto que el área A de una tubería es proporcional al cuadrado de su diámetro d, una forma más útil de expresar la ecuación anterior puede ser:

$$v_1d_1^2 = v_2d_2^2$$

5. Las unidades elegidas para la velocidad o el diámetro en una sección de la tubería deben ser las mismas que se usen en la segunda sección de la tubería.

15-8 PRESIÓN Y VELOCIDAD

Hemos observado que la velocidad de un fluido aumenta cuando fluye a través de un angostamiento. Un incremento en la velocidad únicamente se puede deber a la presencia de una fuerza de aceleración. Para acelerar un líquido que entra a la constricción, la fuerza de empuje proveniente de la sección transversal amplia debe ser mayor que la fuerza de resistencia de la constricción. En otras palabras, la presión en los puntos A y C, en la figura 15-15 debe ser mayor que la presión en B. Los tubos insertados en la tubería sobre dichos puntos indican claramente la diferencia de presión. El nivel

Tecnología actual

Las válvulas del corazón son una de las milagrosas proezas de ingeniería de la naturaleza. Actualmente, las válvulas enfermas o con malformaciones pueden ser remplazadas por una válvula cardiaca artificial. Numerosos y distintos diseños reflejan los problemas que surgen al trabajar con el flujo de fluidos dentro del cuerpo. La válvula de pivote abierto **(www.atsmedical.com)** usa dos respiraderos semicirculares de carbón pirolítico encerrados en una cubierta de PTFE endurecida con un anillo rígido de titanio. El objetivo es reducir la turbulencia manteniendo la válvula más abierta de lo que sería posible con una sola compuerta circular. La turbulencia en el flujo de sangre significa pérdida de energía y, además, provoca la ruptura de las células sanguíneas y puede debilitar prematuramente las partes móviles de la válvula por efecto de la agitación. Otro de los diseños es el disco individual inclinable, que puede ser girado por el cirujano para minimizar la turbulencia **(www.medtronic.com)**. Con un solo punto pivote y una parte móvil (a diferencia de las dos del pivote abierto), esta válvula cardiaca podría ser más durable. Una cosa sí es segura: ¡nadie quiere que una de esas válvulas falle bajo la carga de presión

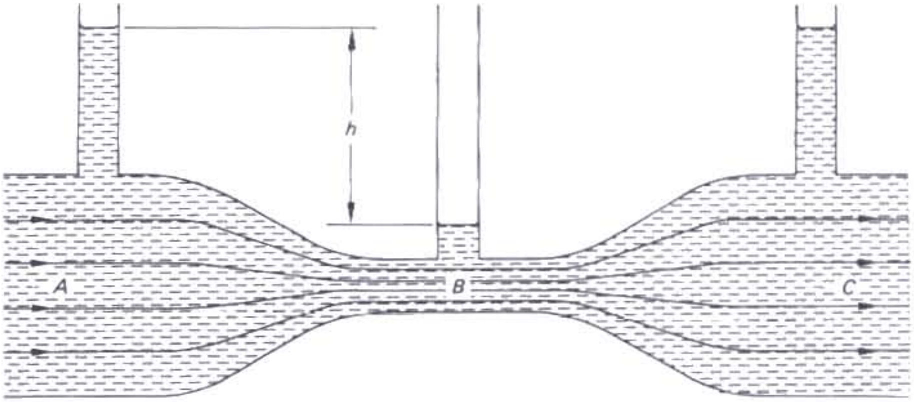


Figura 15-15 El incremento de la velocidad de un fluido que se desplaza a través de una sección más estrecha de un tubo provoca una caída en la presión.

del fluido en el tubo situado sobre la parte angosta es más bajo que el nivel en las áreas adyacentes. Si h es la diferencia de altura, la diferencia de presión está dada por

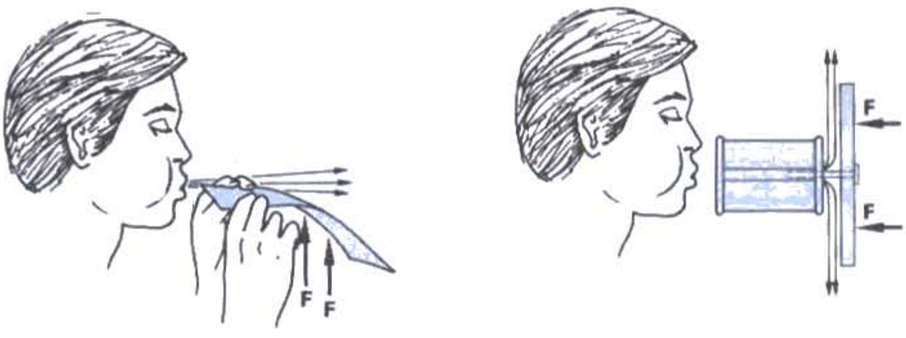
$$P_A - P_B = \rho g h \tag{15-13}$$

Esto es cierto si se supone que la tubería está en posición horizontal y que no se producen cambios de presión debido al cambio de energía potencial.

El ejemplo anterior, como se muestra en la figura 15-15, muestra el principio del medidor venturi. Partiendo de la determinación de la diferencia de la presión, este dispositivo hace posible el cálculo de la velocidad del agua en una tubería horizontal.

El ***efecto venturi*** tiene muchas otras aplicaciones tanto para líquidos como para gases. El carburador de un automóvil utiliza el principio venturi para mezclar vapor de gasolina y aire. El aire que pasa a través de una constricción en su camino hacia los cilindros, origina un área de baja presión a medida que aumenta su velocidad. La disminución en la presión se usa para enviar combustible a la columna de aire, donde se vaporiza rápidamente.

La figura 15-16 muestra dos métodos que se pueden usar para demostrar la disminución de la presión debida al aumento de velocidad. Un ejemplo más sencillo consiste en soplar aire por encima de la superficie de una hoja de papel, como se puede ver en la figura 15-16a. La presión en la corriente de aire por encima del papel se



(a) (b)

Figura 15-16 Demostraciones de la disminución de presión que resulta de un incremento en las velocidades del aire.

reducirá. Esto permite que el exceso de presión en la parte inferior empuje al papel hacia arriba.

Una segunda demostración requiere de un carrete, un disco de cartulina y un alfiler (figura 15-16b). El alfiler se clava a través del disco de cartulina y se coloca en uno de los extremos del carrete, como muestra la figura. Si se sopla a través del extremo abierto, descubrirá que el disco se adhiere más al otro extremo. Uno esperaría que el disco de cartulina se despegara de inmediato. La explicación es que el aire que fue soplado en el carrete debe escapar a través del estrecho espacio entre el disco y el extremo del carrete. Esta acción crea un área de baja presión, lo que permite que la presión atmosférica externa empuje al disco contra el carrete.

P.S.I.

Un bumerang vuela describiendo un círculo a causa de la forma y curvatura de sus brazos. El borde exterior del brazo superior y el borde interior del brazo inferior generan una superficie de sustentación de aire. Cuando se arroja el bumerang, la presión del aire lo empuja hacia la izquierda, creando un momento de torsión. Dado que la presión del aire actúa hacia uno de los lados, la aceleración centrípeta impulsa al artefacto en su trayectoria circular.

15-9 LA ECUACIÓN DE BERNOULLI

En nuestro estudio sobre fluidos, hemos destacado cuatro parámetros: la presión P, la densidad r, la velocidad v y la altura h sobre algún nivel de referencia. El primero en establecer la relación entre estas cantidades y su capacidad para describir fluidos en movimiento fue el matemático suizo Daniel Bernoulli (1700-1782). Los pasos que condujeron al desarrollo de esta relación fundamental se pueden comprender considerando la figura 15-17.

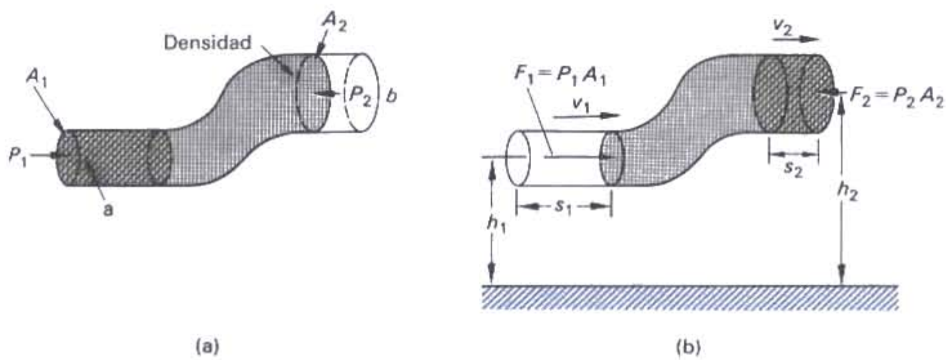


Figura 15-17 Deducción de la ecuación de Bernoulli.

Puesto que un fluido tiene masa, debe obedecer a las mismas leyes de la conservación establecidas para los sólidos. En consecuencia, el trabajo necesario para mover cierto volumen de fluido a lo largo de la tubería debe ser igual al cambio total en energía potencial y cinética. Consideremos el trabajo requerido para mover el fluido del punto a al punto b en la figura 15-17a. El trabajo neto debe ser la suma del trabajo realizado por la fuerza de entrada $\mathbf{F}_1$ y el trabajo negativo efectuado por la fuerza de resistencia $\mathbf{F}_2$.

$$\text{Trabjo neto} = F_1 s_1 - F_2 s_2$$

Pero $F_1 = P_1 A_1$ y $F_2 = P_2 A_2$, de modo que

$$\text{Trabajo neto} = P_1 A_1 s_1 - P_2 A_2 s_2$$

El producto del área y la distancia representa el volumen V del fluido que se mueve a través de la tubería. Puesto que este volumen es el mismo en la parte inferior que en la parte superior de la tubería, podemos sustituir

$$V = A_1 s_1 = A_2 s_2$$

interNET CONEXIÓN

howthingswork. virginia.edu

Para obtener respuestas a preguntas del tipo: "¿Por qué aumenta la velocidad del aire cuando éste fluye sobre el ala de un avión?, visite este sitio.

y obtener

$$\text{Trabajo neto} = P_1 V - P_2 V = (P_1 - P_2)V$$

La energía cinética E_k de un fluido se define como $\frac{1}{2}mv^2$, donde m es la masa del fluido y v es su velocidad. Puesto que la masa permanece constante, únicamente hay un cambio en la energía cinética ΔE_k debido a la diferencia de velocidad del fluido. En nuestro ejemplo, el cambio en la energía cinética es

$$\Delta E_k = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$

La energía potencial de un fluido a una altura h sobre algún punto de referencia se define como mgh, donde mg representa el peso del fluido. El volumen del fluido que se mueve a lo largo de la tubería es constante. Por consiguiente, el cambio en la energía potencial ΔE_p es el resultado del incremento de altura del fluido de h_1 a h_2:

$$\Delta E_p = mgh_2 - mgh_1$$

Ahora estamos preparados para aplicar el principio de la conservación de la energía. El trabajo neto realizado sobre el sistema debe ser igual a la suma de los incrementos en energía cinética y energía potencial. Por lo tanto,

$$\text{Trabajo neto} = \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$(P_1 - P_2)V = (\tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2) + (mgh_2 - mgh_1)$$

Si la densidad del fluido es ρ, podemos sustituir $V = m/\rho$, lo que nos da

$$(P_1 - P_2)\frac{m}{\rho} = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2 + mgh_2 - mgh_1$$

Si se multiplica por ρ/m y se reordenan los términos se obtiene la ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + \rho gh_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 \qquad \textbf{15-14}$$

En vista de que los subíndices 1 y 2 se refieren a dos puntos cualesquiera, la ecuación de Bernoulli se puede enunciar en una forma más simple como

$$P + \rho gh + \tfrac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante} \qquad \textbf{15-15}$$

La ecuación de Bernoulli encuentra aplicación en casi todos los aspectos del flujo de fluidos. La presión P debe reconocerse como la presión absoluta y no la presión manométrica. Recuerde que ρ es la densidad y no el peso específico del fluido. Observe que las unidades de cada término de la ecuación de Bernoulli son unidades de presión.

15-10 APLICACIONES DE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI

En gran número de situaciones físicas, la velocidad, la altura o la presión de un fluido son constantes. En tales casos, la ecuación de Bernoulli adquiere una forma simple. Por ejemplo, cuando un líquido es estacionario, tanto v_1 como v_2 valen cero. La

Solución

El área $A = 1\ \text{cm}^2 = 10^{-4}\ \text{m}^2$ y la altura $h = 4$ m. Sustituyendo estos valores directamente en la ecuación (15-18) nos da

$$R = A\sqrt{2gh} = (10^{-4}\ \text{m}^2)\sqrt{(2)(9.8\ \text{m/s}^2)(4\ \text{m})}$$
$$= (10^{-4}\ \text{m}^2)(8.85\ \text{m/s}) = 8.85 \times 10^{-4}\ \text{m}^3/\text{s}$$

Un ejemplo interesante para demostrar el principio de Torricelli se muestra en la figura 15-19. La velocidad de descarga aumenta con la profundidad. Observe que el alcance máximo se logra cuando la abertura se encuentra a la mitad de la columna de agua. Aunque la velocidad de descarga aumenta por debajo del punto medio, el agua golpea el piso más cerca. Esto ocurre porque llega al piso más pronto. Las perforaciones equidistantes por encima y por abajo del punto medio tendrán el mismo alcance horizontal.

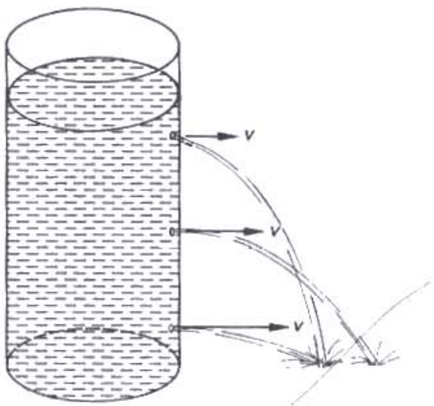


Figura 15-19 La velocidad de descarga aumenta con la profundidad por debajo de la superficie, pero el alcance es máximo en el punto medio.

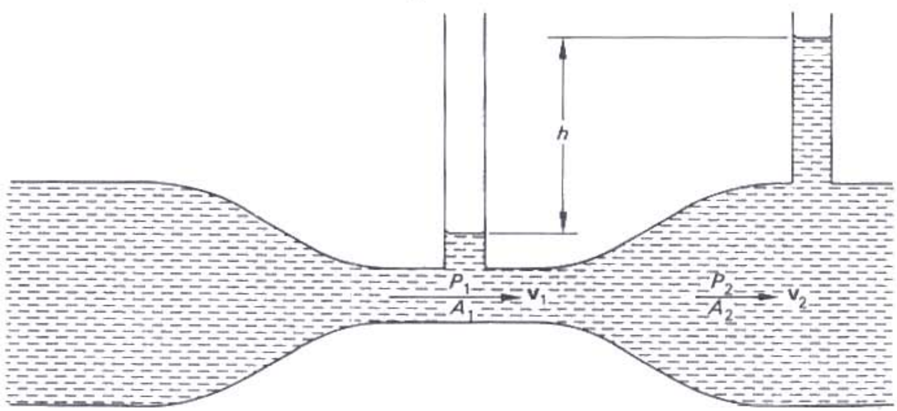


Figura 15-20 Flujo de un fluido a lo largo de un estrechamiento en una tubería horizontal.

Como una aplicación final, considere el efecto venturi que describe el movimiento de un fluido a lo largo de una constricción. Si la tubería de la figura 15-20 es horizontal, podemos establecer que $h_1 = h_2$ en la ecuación de Bernoulli, lo que nos da ecuación de Bernoulli nos mostrará que la diferencia de presiones es

$$P_2 - P_1 = \rho g(h_1 - h_2) \qquad 15\text{-}16$$

Esta ecuación es idéntica a la relación estudiada para fluidos en reposo.

Otro resultado importante se presenta cuando no hay cambio en la presión ($P_1 = P_2$). En la figura 15-18 un líquido sale de un orificio situado cerca del fondo de un tanque abierto. Su velocidad cuando sale del orificio puede determinarse a partir de la ecuación de Bernoulli. Debemos suponer que el nivel del líquido en el tanque desciende lentamente en comparación con la velocidad de salida, de tal modo que la velocidad v_2 en la parte superior puede considerarse cero. Además, debe tomarse en cuenta que la presión del líquido tanto en la parte superior como en el orificio es igual a la presión atmosférica. Entonces, $P_1 = P_2$ y $v_2 = 0$, lo que reduce la ecuación de Bernoulli a

$$\rho g h_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = \rho g h_2$$

o bien

$$v_1^2 = 2g(h_2 - h_1) = 2gh$$

Esta relación se conoce como ***teorema de Torricelli:***

$$v = \sqrt{2gh} \qquad 15\text{-}17$$

Note que la velocidad de salida de un líquido a la profundidad h es la misma que la de un objeto que se dejara caer del reposo desde una altura h.

La velocidad a la cual un líquido fluye desde un orificio está dada por vA según la ecuación (15-10). La relación de Torricelli nos permite expresar el gasto en términos de la altura del líquido sobre el orificio. O sea,

$$R = vA = A\sqrt{2gh} \qquad 15\text{-}18$$

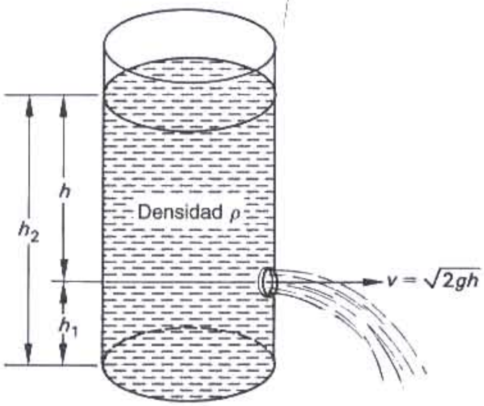


Figura 15-18 Teorema de Torricelli.

EJEMPLO 15-10

Una hendidura en un tanque de agua tiene un área de sección transversal de 1 cm^2. ¿Con qué rapidez se sale el agua del tanque si el nivel del agua en éste es de 4 m sobre la abertura?

CUESTIONES DE FÍSICA

Delfines eléctricos Los delfines logran una notable eficiencia de propulsión cuando nadan. Los científicos que estudian la dinámica de fluidos han supuesto por mucho tiempo que los delfines controlan la turbulencia moviendo su piel. Aplicando esta teoría a los aviones, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos está usando el microtroquelado para fabricar CI y microsensores que conviertan las alas de un avión en una piel electrónica sensible que sea capaz de reducir el arrastre ocasionado por turbulencias.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \qquad 15\text{-}19$$

Puesto que v_1 es mayor que v_2, se deduce que la presión P_1 debe ser menor que la presión P_2 para que se satisfaga la ecuación (15-19). Esta relación entre la velocidad y la presión ya se ha estudiado.

Estrategia para resolver problemas

Aplicaciones de la ecuación de Bernoulli

1. Lea el problema detalladamente y dibuje después un esquema indicando en él la información proporcionada como datos. Asegúrese de que las unidades sean congruentes en el caso de la presión, la altura y la densidad.
2. La altura h de un fluido se mide partiendo de un punto de referencia común al centro de masa del fluido. Por ejemplo, una constricción en una tubería horizontal como en la figura (15-20) no representa un cambio en altura ($h_1 = h_2$).
3. En la ecuación de Bernoulli, la densidad ρ es densidad de masa y las unidades apropiadas son kg/m^3 y $slugs/ft^3$.
4. Escriba la ecuación de Bernoulli para el problema y simplifique eliminando aquellos factores que no cambian:

$$P_1 + \rho g h_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

5. Para un fluido estacionario $v_1 = v_2$ y el tercer término de cada lado se elimina; los términos de en medio desaparecen para una tubería horizontal ($h_1 = h_2$), y, si no hay cambio en la presión ($P_1 = P_2$), los primeros términos no aparecen y el resultado es el teorema de Torricelli (ecuación 15-17). Consulte las ecuaciones que aparecen en el resumen.
6. Sustituya las cantidades proporcionadas como datos y despeje la que no se conoce.

EJEMPLO CONCEPTUAL 15-11

Por un tubo Venturi como el de la figura 15-20 fluye agua inicialmente a 10 ft/s. Si $h = 4$ in, ¿qué velocidad tiene el agua en la parte donde está la constricción?

Solución

La diferencia de presión, a partir de la ecuación (15-13), es

$$P_2 - P_1 = \rho g h$$

La diferencia de presión, partiendo de la ecuación de Bernoulli, es

$$P_2 - P_1 = \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 - \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

Combinando estas dos relaciones, tenemos

$$\rho g h = \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 - \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

Multiplicando ambos lados por $2/\rho$ nos da

$$2gh = v_1^2 - v_2^2$$

Note que esta relación es similar a la de la caída libre de un cuerpo con una velocidad inicial v_2. Despejando v_1^2, tenemos

$$\begin{aligned} v_1^2 &= 2gh + v_2^2 \\ &= (2)(32\ \text{ft/s}^2)(0.333\ \text{ft}) + (10\ \text{ft/s})^2 \\ &= 21.3\ \text{ft}^2/\text{s}^2 + 100\ \text{ft}^2/\text{s}^2 = 121.3\ \text{ft}^2/\text{s}^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la velocidad a lo largo de la constricción es

$$v_1 = \sqrt{121.3} = 11\ \text{ft/s}$$

En el ejemplo anterior, la densidad del fluido no participó en nuestros cálculos debido a que el fluido de los tubos colocados arriba de la tubería era el mismo que el que fluía por la tubería. Cuando se considere la densidad del fluido, debe tomarse en cuenta que el símbolo ρ es la densidad y no el peso específico.

Resumen y repaso

Resumen

Hemos presentado aquí los conceptos de fluidos en reposo y en movimiento. Se definieron y aplicaron a muchos ejemplos físicos la densidad, las fuerzas de flotación y otras cantidades. Se estableció la relación entre el gasto de fluidos y la velocidad de éstos, así como el área de sección de tubos, y se presentó la ecuación de Bernoulli para abordar una descripción más completa de la dinámica de fluidos. Los conceptos esenciales serán resumidos a continuación:

- Una propiedad física importante de la materia es la *densidad.* El peso específico D y la densidad ρ se definen en la siguiente forma:

$$\textit{Peso específico} = \frac{\textit{peso}}{\textit{volumen}} \qquad D = \frac{W}{V}$$

$$\mathrm{N/m^3 \text{ o } lb/ft^3}$$

$$\textit{Densidad} = \frac{\textit{masa}}{\textit{volumen}} \qquad \rho = \frac{m}{V}$$

$$\mathrm{kg/m^3 \text{ o } slug/ft^3}$$

- dado que $W = mg$, la relación entre D y ρ es

$$D = \rho g$$

Peso específico = densidad × gravedad

- Puntos importantes que conviene recordar acerca de la presión de fluidos:

  a. Las fuerzas ejercidas por un fluido sobre las paredes de su recipiente siempre son perpendiculares a dichas paredes.

  b. La presión de un fluido es directamente proporcional a la profundidad del fluido y a su densidad.

$$P = \frac{F}{A} \qquad P = Dh \qquad P = \rho g h$$

  c. A cualquier profundidad particular, la presión del fluido es la misma en todas las direcciones.

  d. La presión de un fluido es independiente de la forma o el área del recipiente.

- La ley de Pascal establece que una *presión externa aplicada a un fluido confinado se transmite uniformemente a través del volumen del líquido.*
- Cuando mida presiones de fluidos, asegúrese de distinguir entre la presión absoluta y la presión manométrica:

Presión absoluta

= presión manométrica + presión atmosférica

Presión atmosférica

$$= 1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$
$$= 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 14.7 \text{ lb/in}^2$$
$$= 76 \text{ cm de mercurio}$$

- Aplicando la ley de Pascal a la prensa hidráulica se obtiene la siguiente expresión para la ventaja mecánica ideal:

$$M_I = \frac{F_o}{F_i} = \frac{s_o}{s_i}$$ *Ventaja mecánica ideal de la prensa hidráulica*

- Principio de Arquímedes: *Un objeto que está sumergido total o parcialmente en un fluido experimenta una fuerza ascendente (empuje) igual al peso del fluido desalojado.*

$$F_B = mg \quad \text{o bien} \quad F_B = V\rho g$$ *Fuerza de empuje*

- El *gasto* se define como el volumen de fluido que pasa a través de cierta sección transversal A por unidad de tiempo t. En función de la velocidad del fluido v, escribimos

$$R = \frac{V}{t} = vA$$ *Gasto = velocidad × área de la sección transversal*

- Para un fluido incompresible que fluye a través de tubos cuyas secciones transversales varían, el gasto es constante:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \qquad d_1^2 v_1 = d_2^2 v_2$$

donde v es la velocidad del fluido, A es el área de la sección transversal del tubo y d es el diámetro del tubo.

- El trabajo neto realizado sobre un fluido es igual a los cambios de la energía cinética y potencial de dicho fluido. La ecuación de Bernoulli expresa este hecho en términos de la presión P, la densidad ρ, la altura del fluido h y su velocidad v.

$$P + \rho gh + \tfrac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante}$$

Ecuación de Bernoulli

Si un volumen de fluido cambia de un estado 1 a un estado 2, como muestra la figura 15-17, podemos escribir:

$$P_1 + \rho gh_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

- Las aplicaciones especiales de la ecuación de Bernoulli se presentan cuando uno de los parámetros no cambia:

Para un líquido estacionario

$(v_1 = v_2)$ $$P_2 - P_1 = \rho g(h_1 - h_2)$$

Si la presión es constante

$(P_1 - P_2)$ $$v = \sqrt{2gh}$$

Para un tubo horizontal

$(h_1 = h_2)$ $$P_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

Conceptos clave

1. peso específico
2. densidad
3. presión
4. fuerza total
5. ley de Pascal
6. presión absoluta
7. presión manométrica
8. manómetro
9. principio de Arquímedes
10. fuerza de flotación (empuje)
11. flujo o corriente laminar
12. flujo turbulento
13. gasto
14. efecto venturi
15. teorema de Bernoulli
16. teorema de Torricelli

Preguntas de repaso

15-1. Haga una lista de las unidades que corresponden al peso específico y las unidades similares para la densidad.

15-2. ¿Qué es numéricamente mayor: al peso específico de un objeto o su densidad?

15-3. En la tabla 15-1 se indica que la densidad del agua es 62.4 lb/ft^3. Al realizar un experimento con agua en la superficie de la luna, ¿tendría usted confianza en este valor? Explique su respuesta.

15-4. ¿Qué pesa más, 870 kilogramos de bronce o 3.5 pies cúbicos de cobre?

15-5. ¿Por qué las represas son mucho más anchas en la parte inferior que en la parte alta? ¿Acaso la presión que se ejerce sobre la represa depende de la longitud del embalse perpendicular a la represa?

15-6. Un trozo de hielo grande flota en un cubo de agua, de modo que el nivel de ésta queda hasta el borde del cubo. ¿Se derramará el agua cuando se derrita el hielo ? Explique su respuesta.

15-7. Una tina llena de agua está colocada sobre una balanza que indica 40 lb de peso total. ¿Se incrementará el peso total cuando un pez de 5 lb flote sobre la superficie del agua? Comente.

15-8. Suponga que un bloque de hierro, sostenido por una cuerda, se sumerge totalmente en la tina de la pregunta 15.7. ¿Cómo se afectará la lectura en la balanza?

15-9. Un muchacho que está aprendiendo a nadar descubre que puede flotar con más facilidad sobre la superficie cuando inhala aire. Observa también que puede acelerar su descenso al fondo de la piscina si exhala el aire durante el descenso. Explique sus observaciones.

15-10. Un velero de juguete lleno de monedas de un centavo flota en una pequeña tina de agua. Si las monedas se arrojan al agua, ¿qué pasa con el nivel del agua en la tina?

15-11. ¿Es más difícil sostener un corcho cuando apenas flota bajo la superficie, que cuando se encuentra a una profundidad de 5 ft? Explique su respuesta.

15-12. ¿Es posible construir un barómetro usando agua en lugar de mercurio? ¿A qué altura llegará la columna de agua si la presión externa es de 1 atm?

15-13. Comente el funcionamiento de un submarino y el de un globo meteorológico. ¿Por qué se eleva el globo hasta una altura definida y allí se detiene? ¿Un submarino se hundirá hasta una profundidad determinada y allí se detendrá si no se realizan cambios en él después de sumergirlo?

15-14. ¿Qué suposiciones y generalizaciones se hacen en relación con el estudio de la dinámica de fluidos?

15-15. ¿Por qué disminuye el flujo de agua de una llave cuando alguien abre otra llave en el mismo edificio?

15-16. Dos botes de remos que avanzan paralelamente entre sí, en la misma dirección, se atraen mutuamente. Explique la causa.

15-17. Explique qué pasaría en un jet moderno que volara a alta velocidad si un secuestrador disparara una bala a través de la ventana o si abriera por la fuerza una escotilla de escape.

15-18. Durante los ventarrones de alta velocidad o los huracanes, los techos de las casas se desprenden en algunas ocasiones; sin embargo, éstas no sufren ningún otro daño. Explique la causa por medio de diagramas.

15-19. Un niño pequeño golpea con un globo sobre el ducto de calefacción de su casa y se sorprende al ver que el globo se mantiene suspendido arriba del conducto, balanceándose de un lado a otro. Explique la causa.

15-20. ¿Qué condiciones determinarán la capacidad máxima de sustentación del ala de un avión aerodinámico? Justifique su respuesta con dibujos.

15-21. Explique por medio de diagramas cómo logra un lanzador de béisbol arrojar una bola rápida ascendente, una curva hacia fuera y una rápida descendente. ¿Cree que él preferiría lanzar a favor o en contra del viento para producir los tres efectos descritos con anterioridad?

15-22. Dos recipientes idénticos están colocados sobre el piso uno junto a otro. Uno está lleno de mercurio y el otro está lleno de agua. Se hace un orificio en cada recipiente, a la misma profundidad por debajo de la superficie. Compare el alcance de los dos fluidos al salir.

Problemas

Sección 15-1—Densidad

15-1. ¿Qué volumen ocupan 0.4 kg de alcohol? ¿Cuál es el peso de este volumen?

Resp. 5.06×10^{-4} m^3, 3.92 N

15-2. Una sustancia desconocida tiene un volumen de 20 ft^3 y pesa 3 370 lb. ¿Cuáles son el peso específico y la densidad?

15-3. ¿Qué volumen de agua tiene la misma masa que 100 cm^3 de plomo? ¿Cuál es el peso específico del plomo?

Resp. 1130 cm^3, 1.11×10^5 N/m^3

*15-4. Un matraz de 200 ml (l = 1 000 cm3) está lleno de un líquido desconocido. Una balanza electrónica indica que el líquido en cuestión tiene una masa de 176 g. ¿Cuál es la gravedad específica del líquido? ¿Puede usted adivinar qué es ese líquido?

Sección 15-3—Presión de fluidos

15-5. Halle la presión en kilopascales producida por una columna de mercurio de 60 cm de alto. ¿Cuál es esa presión en lb/in^2 y en atmósferas?

Resp . 80.0 kPa, 11.6 lb/in^2, 0.79 atm

15-6. Un tubo contiene agua bajo una presión manométrica de 400 kPa. Si se cubre un orificio de 4 mm de diámetro en el tubo, con un trozo de cinta adhesiva, ¿qué fuerza tendrá que ser capaz de resistir la cinta?

*15-7. Un submarino se sumerge a una profundidad de 120 ft y se nivela. El interior del submarino se mantiene a la presión atmosférica. ¿Cuáles son la presión y la fuerza total aplicadas a una escotilla de 2 ft de ancho y 3 ft de largo? El peso específico del agua del mar es de 64 lb/ft^3 aproximadamente. **Resp.** 53.3 lb/in^2, 46,100 lb

15-8. Si usted construye un barómetro usando agua en lugar de mercurio, ¿qué altura del agua in-

dicará una presión de una atmósfera?

15-9. Un pistón de 20 kg descansa sobre una muestra de gas en un cilindro de 8 cm de diámetro. ¿Cuál es la presión manométrica sobre el gas? ¿Y la presión absoluta?

Resp. 39.0 kPa, 140.3 kPa

***15-10.** Un tubo abierto en forma de U como el que muestra la figura 15-21 tiene 1 cm^2 de sección transversal. ¿Qué volumen de agua deberá verterse en el tubo de la derecha para que el mercurio del tubo de la izquierda se eleve 1 cm por encima de su posición original?

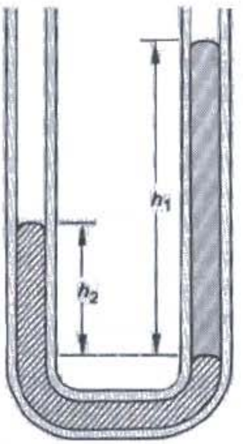


Figura 15-21

15-11. La presión manométrica en un neumático de automóvil es de 28 lb/in^2. Si la rueda soporta 1 000 lb, ¿cuál es el área del neumático que está en contacto con el suelo? Resp. 35.7 $in.^2$

***15-12.** Dos líquidos que no reaccionan químicamente se encuentran en un tubo doblado como el que aparece en la figura 15-21. Demuestre que las alturas de los líquidos por encima de su superficie de separación son inversamente proporcionales a sus densidades:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

***15-13.** Suponga que los dos líquidos contenidos en el tubo en forma de U de la figura 15-21 son agua y aceite. Calcule la densidad del aceite si el agua se mantiene 19 cm por encima de la entrecara y el aceite permanece a 24 cm por encima de dicha zona de encuentro. Use como referencia el problema 15.12 Resp. 792 kg/m^3

15-14. Un manómetro de presión de agua indica una presión de 50 lb/in^2 al pie de un edificio. ¿Cuál es la máxima altura a la cual subirá el agua en el edificio?

Sección 15-5—La prensa hidráulica

15-15. Las áreas de los pistones grande y pequeño de una prensa hidráulica son 0.5 y 25 in^2 respectivamente. ¿Cuál es la ventaja mecánica ideal de la prensa? ¿Qué fuerza se tendrá que ejercer para levantar una carga de 1 tonelada (2 000 lb)? ¿A través de qué distancia deberá actuar la fuerza de entrada para levantar esta carga hasta una distancia de 1 in?

Resp. 50, 40 lb, 50 in

15-16. Una fuerza de 400 N se aplica al pistón pequeño de una prensa hidráulica cuyo diámetro es 4 cm. ¿Cuál deberá ser el diámetro del pistón grande para que pueda levantar una carga de 200 kg?

15-17. El tubo de entrada que suministra presión de aire para operar un gato hidráulico tiene 2 cm de diámetro. El pistón de salida es de 32 cm de diámetro. ¿Qué presión de aire (presión manométrica) se tendrá que usar para levantar un automóvil de 1 800 kg? Resp. 219 kPa

15-18. El área de un pistón en una bomba de fuerza es de 10 in^2. ¿Qué fuerza se requiere para elevar el agua con el pistón hasta una altura de 100 ft?

Sección 15-6—El principio de Arquímedes

15-19. Un cubo de 100 g que mide 2 cm por lado se ata al extremo de una cuerda y se sumerge totalmente en agua. ¿Cuál es el empuje y cuál es la tensión sobre la cuerda?

Resp. 0.0784 N, 0.902 N

***15-20.** Un objeto sólido pesa 8 N en el aire. Cuando este objeto se cuelga de una balanza de resorte y se sumerge en agua, su peso aparente es de sólo 6.5 N. ¿Cuál es la densidad del objeto?

***15-21.** Un cubo de madera cuyas aristas miden 5.0 cm cada una, flota en agua con tres cuartas partes de su volumen sumergidas. **a)** ¿Cuál es el peso del cubo? **b)** ¿Cuál es la masa del cubo? **c)** ¿Cuál es la gravedad específica del cubo?

Resp. (a) 0.919 N, (b) 93.8 g, (c) 0.75

***15-22.** Un trozo de metal de 20 g tiene una densidad de 4 000 kg/m3. Está atada a un hilo delgado y se sumerge en un recipiente de aceite (1 500 kg/m^3) hasta que se sumerge por completo. ¿Cuál es la tensión en el hilo?

***15-23.** Se ha observado que la masa de un fragmento de cierta roca es de 9.17 g en el aire. Cuando el trozo se sumerge en un fluido de 873 kg/m^3 de densidad, su masa aparente es de sólo 7.26 g. ¿Cuál es la densidad de esa roca?

Resp. 4191 kg/m^3

***15-24.** Un globo de 40 cm de diámetro está lleno de helio. La masa del globo, y la canastilla que lleva adjunta, es de 18 kg. ¿Qué masa adicional puede levantar consigo este globo?

Sección 15-7—Flujo de fluidos

15-25. A través de una manguera de 1 in de diámetro fluye gasolina a una velocidad promedio de 5 ft/s. ¿Cuál es el gasto en galones por minuto (1 ft^3 = 7.48 gal)? ¿Cuánto tiempo tardaría en llenar un tanque de 20 gal?

Resp. 12.2 gal/min, 1.63 min

15-26. A partir de un depósito terminal de 3 cm de diámetro, fluye agua con una velocidad promedio de 2 m/s. ¿Cuál es el gasto en litros por minuto (1 l = 0.001 m^3)? ¿Cuánto tardará en llenarse un recipiente de 40 l?

15-27. ¿Cuál tendrá que ser el diámetro de una manguera para que pueda conducir 8 l de petróleo en 1 min con una velocidad de salida de 3 m/s?

Resp. 7.52 mm

***15-28.** El agua que fluye de un tubo de 2 in sale horizontalmente a razón de 8 gal/min. ¿Cuál es la velocidad de salida? ¿Cuál es el alcance horizontal del chorro de agua si el tubo está a 4 ft del suelo?

15-29. El agua que fluye a 6 m/s por un tubo de 6 cm pasa a otro tubo de 3 cm conectado al primero. ¿Cuál es su velocidad en el tubo pequeño? ¿Es mayor el gasto en el tubo más pequeño?

Resp. 24 m/s, no

Sección 15-10—Aplicaciones de la ecuación de Bernoulli

15-30. Considere la situación descrita en el problema 15.29. Si los centros de ambos tubos están sobre la misma recta horizontal, ¿cuál es la diferencia de presión entre los dos tubos conectados?

15-31. ¿Cuál es la velocidad de salida del agua a través de una grieta del recipiente localizada 6 m por debajo de la superficie del agua? Si el área de la grieta es 1.3 cm^2, ¿con qué gasto sale el agua del recipiente?

Resp. 10.8 m/s, 1.41 × 10^{-3} m^3/s

15-32. En el costado de un depósito de agua hay un orificio de 2 cm de diámetro, localizado 5 m por debajo del nivel del agua que contiene el depósito. ¿Cuál es la velocidad de salida del agua del orificio? ¿Qué volumen de agua escapará por ese orificio en 1 min?

***15-33.** A través de un tubo horizontal fluye agua a razón de 82 ft^3/min. Un manómetro de presión, colocado en una sección transversal de 6 in de este tubo, presenta la lectura 16 lb/in^2. ¿Cuál es la presión manométrica en una sección del tubo donde el diámetro es de 3 in?

Resp. 11.1 lb/in^2

***15-34.** El agua fluye a razón de 6 gal/min a través de una abertura que se localiza en el fondo de un depósito cilíndrico. El agua del depósito tiene 16 ft de profundidad. ¿Cuál sería el régimen de salida si se aplicara una presión adicional de 9 lb/in^2 a la fuente de suministro del agua?

***15-35.** El agua circula a través de un tubo a 4 m/s bajo una presión absoluta de 200 kPa. El tubo se estrecha después hasta la mitad de su diámetro original. ¿Cuál es la presión absoluta en la parte angosta del tubo?

Resp. 80.0 kPa

***15-36.** El agua fluye continuamente por un tubo horizontal. En un punto donde la presión absoluta es de 300 kPa, la velocidad es de 2 m/s. Más adelante, el tubo se estrecha bruscamente, haciendo que la presión absoluta descienda a 100 kPa. ¿Cuál será la velocidad del agua en esta zona angosta?

Problemas reto

***15-37.** A un paciente humano se le administra sangre con una densidad de 1 050 kg/m^3, desde un recipiente colocado a una distancia de 60 cm por encima de su brazo. ¿Cuánto más alta es la presión en esta posición que si el recipiente se mantuviera al mismo nivel del brazo? **Resp. 6.17 kPa**

*15-38. Un depósito cilíndrico de 50 ft de altura y 20 ft de diámetro está lleno de agua. **a**) ¿Cuál es la presión del agua en el fondo del depósito? **b**) ¿Cuál es la fuerza total en el fondo? **c**) ¿Cuál es la presión en un tubo para agua colocado 90 ft por debajo del nivel del agua del depósito?

*15-39. Un bloque de madera pesa 16 lb en el aire. Un lastre de plomo, que tiene un peso aparente de 28 lb en el agua, se ata a la madera y ambos se sumergen en agua. Si su peso aparente combinado en el agua es de 18 lb, halle la densidad del bloque de madera

Resp. 38.4 lb/ft^3

*15-40. Un bloque de madera de 100 g tiene un volumen de 120 cm^3. ¿Podrá flotar en el agua? ¿y en gasolina?

*15-41. Un tubo de ensayo vertical contiene 3 cm de aceite (0.8 g/cm^3) flotando sobre 9 cm de agua. ¿Cuál es la presión en el fondo del tubo?

Resp. 1.12 kPa

15-42. ¿Qué porcentaje de un iceberg suele permanecer por debajo de la superficie del agua del mar (1 030 kg/m^3)?

*15-43. ¿Cuál es el área más pequeña de una capa de hielo de 30 cm de espesor que es capaz de sostener a un hombre de 90 kg? El hielo está flotando en agua dulce.

Resp. 3.75 m^2

15-44. Una balanza de resorte marca un peso de 40 N cuando un objeto se cuelga de ella en el aire. Cuando el mismo objeto se sumerge en agua, el peso registrado se reduce a sólo 30 N. ¿Cuál es la densidad del objeto?

15-45. Una taza de metal con paredes delgadas tiene una masa de 100 g y un volumen total de 250 cm^3. ¿Cuál es el número máximo de monedas de un centavo que se puede colocar dentro de la taza sin que ésta se hunda en agua? La masa de cada moneda es de 3.11 g.

Resp. 48

15-46. ¿Cuál es la presión absoluta en el fondo de un lago de 30 m de profundidad?

15-47. Un fluido se extrae a presión de un tubo de 6 mm de diámetro, de manera que 200 ml brotan de él en 32 s. ¿Cuál es la velocidad promedio del fluido dentro del tubo?

Resp. 0.221 m/s

*15-48. Una bomba cuya potencia de salida es de 2 kW extrae agua de un sótano hasta la calle situada 6 m más arriba. ¿A razón de cuántos litros por segundo se vaciará el sótano?

15-49. Un tubo horizontal de 120 mm de diámetro tiene una reducción de 40 mm de diámetro. La velocidad del agua en el tubo es de 60 cm/s y la presión es de 150 kPa. **a**) ¿Cuál es la velocidad en la zona más angosta? **b**) ¿Cuál es la presión en dicha zona?

Resp. (a) 540 cm/s, (b) 136 kPa

*15-50. La columna de agua dentro del recipiente que ilustra la figura 15-20 se sostiene a una altura H por encima de la base del recipiente. Demuestre que la profundidad h necesaria para lograr un alcance horizontal de x está dado por

$$h = \frac{H}{2} \pm \frac{\sqrt{H^2 - x^2}}{2}$$

¿En qué forma muestra esta ecuación que los orificios equidistantes arriba y abajo del punto medio tendrán el mismo alcance horizontal?

*15-51. Una columna de agua se eleva 16 ft por encima de la base de su recipiente. ¿Cuáles son las dos profundidades a las cuales el agua saldrá por un orificio con un alcance horizontal de 8 ft?

Resp. 1.07 ft, 14.9 ft

*15-52. Tome como referencia la figura 15-20 y el problema 15.50. Demuestre que el alcance horizontal está dado por

$$x = 2\sqrt{h(H - h)}$$

Use esta relación para mostrar que el alcance máximo es igual a la altura H de la columna de agua.

*15-53. El agua fluye por un tubo horizontal a razón de 60 gal/min (1 ft^3 = 7.48 gal). ¿Cuál es la velocidad en una sección estrecha del tubo, donde el diámetro de éste se reduce de 6 a 1 in?

Resp. 24.5 ft/s

15-54. ¿Cuál tendrá que ser la presión manométrica en una manguera contra incendios si la boquilla expulsa el agua hasta una altura de 20 m?

*15-55. El agua fluye a través del tubo que muestra la figura 15-22 a razón de 30 l/s. La presión absoluta en el punto A es de 200 kPa y el punto B está 8 m más arriba que el punto A. La sección inferior del tubo tiene un diámetro de 16 cm y la sección superior se estrecha hasta un diámetro de 10 cm. **a)** Halle las velocidades de la corriente en los puntos A y B. **b)** ¿Cuál es la presión absoluta en el punto B?

Resp. (a) 1.49 m/s, 3.82 m/s; (b) 115 kPa

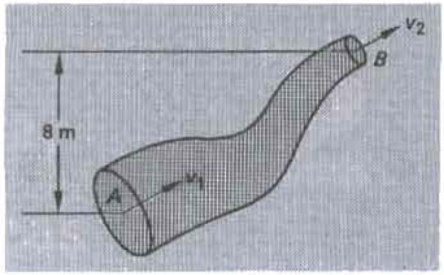


Figura 15-22

Preguntas para la reflexión crítica

15-56. Una sala tiene las siguientes dimensiones: el piso 4.50 m por 3.20 m, y su altura es de 2.40 m. La densidad del aire es de 1.29 kg/m^3. ¿Cuánto pesa el aire contenido en el salón? ¿Qué fuerza ejerce la atmósfera sobre el piso del salón? Resp. 437 N, 1.46 x 10^6 N

15-57. Una lata de estaño para café que está flotando en agua (1.00 g/cm^3) tiene un volumen interno de 180 cm^3 y una masa de 112 g. ¿Cuántos gramos de metal se pueden agregar a la lata sin que ésta se hunda en el agua?

***15-58.** Un bloque de madera flota en agua con dos tercios de su volumen sumergidos. El mismo bloque flota en aceite con 9 décimos de su volumen sumergidos. ¿Cuál es la razón de la densidad del aceite a la densidad del agua (la gravedad específica)? Resp. 0.741

***15-59.** El ala de un avión mide 25 ft de largo y 5 ft de ancho y experimenta una fuerza de sustentación de 800 lb. ¿Cuál es la diferencia entre las presiones en la superficie superior e inferior del ala?

***15-60.** Suponga que el aire (ρ = 1.29 kg/m^3) fluye hacia atrás por la superficie superior del ala de un avión a 36 m/s. El aire en movimiento que pasa por la superficie inferior del ala tiene una velocidad de 27 m/s. Si el ala tiene un peso de 2 700 N y una área de 3.5 m^2, ¿cuál es la fuerza de empuje sobre el ala? Resp. 1280 N

***15-61.** El agua de mar tiene un peso específico de 64 lb/ft^3. Dicha agua se bombea a través de un sistema de tubos (*véase* la figura 15-23) a razón de 4 ft^3/min. Los diámetros de los tubos en los extremos superior e inferior son de 4 in y 2 in respectivamente. El agua se descarga en la atmósfera en el extremo superior a una distancia de 6 in por arriba de la sección inferior. ¿Cuáles son las velocidades de flujo en los tubos superior e inferior? ¿Cuáles son las presiones en las secciones superior e inferior?

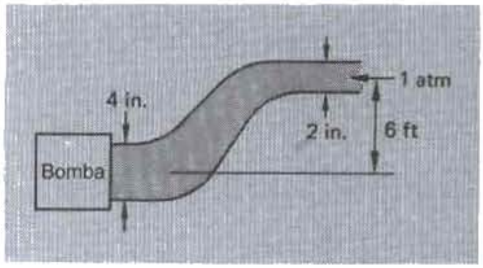


Figura 15-23