16 Fuerzas debido a los fluidos en movimiento

16.1 Panorama

Mapa de aprendizaje

- Siempre que una corriente de fluido se desvía de su dirección inicial o su velocidad cambia, se requiere una fuerza que efectúe dicho cambio.
- Usted debe ser capaz de determinar la magnitud y dirección de tales fuerzas, con el fin de diseñar la estructura para contener el fluido con seguridad.
- A veces, la fuerza del fluido ocasiona un movimiento que se desea, como cuando un chorro de agua golpea las aspas de una turbina. La rotación de la turbina genera potencia útil.

Descubrimientos

- ¿Cuál ha sido su experiencia respecto a las fuerzas provocadas por fluidos en movimiento?
- Considere situaciones en su hogar, automóvil, una fábrica o en ciertas instalaciones públicas.
- Describa el efecto de las fuerzas ocasionadas por los fluidos en movimiento cuando se desvían de su dirección inicial o cuando la velocidad del flujo cambia.

En este capítulo, aprenderá los principios fundamentales que gobiernan la generación de fuerzas debido a fluidos en movimiento.

Conceptos introductorios

Siempre que una corriente de fluido se desvía de su dirección inicial o su velocidad cambia, se requiere una fuerza que efectúe dicho cambio. En ciertas ocasiones la fuerza se desea, en otras es destructiva.

Haga una lista de situaciones en las que haya observado los efectos de las fuerzas provocadas cuando una corriente de fluido se desvió, o cuando su velocidad se hubiera modificado. Considere los ejemplos siguientes:

- ¿Ha sacado alguna vez la cabeza por la ventanilla abierta de un automóvil que viajaba a alta velocidad?
- ¿Lo ha azotado el viento al tratar de caminar durante una tormenta?
- ¿Ha usado el chorro de una manguera para quitar la mugre de la banqueta?
- ¿Ha visto cómo luchan los bomberos para controlar la boquilla de una manguera que lanza un chorro fuerte de agua a gran velocidad? Deben aplicar mucha fuerza para mantenerla quieta, y si aflojan, la boquilla se agita fuera de control y se torna peligrosa.
- Los vientos que actúan sobre la vela de una embarcación generan fuerzas considerables que la impulsan sobre el agua. Esto puede ser excitante. Al mismo tiempo, el casco del bote experimenta fuerzas de arrastre que tienden a disminuir su velocidad, debido al movimiento relativo entre el casco y en el agua.
- Los vientos también pueden ser muy dañinos. Las tormentas con vientos de 60 a 100 millas por hora (96 a 160 km/h) destruyen techos, señales de tránsito y desplazan camiones y casas móviles. Los tornados y huracanes generan vientos de hasta 300 millas por hora (482 km/h) y ocasionan enorme devastación. ¿Ha experimentado la acción de una tormenta alguna vez?

- Las fuerzas de arrastre sobre automóviles, camiones, embarcaciones y aeronaves, retardan su movimiento. Sus motores deben generar más potencia para superar el arrastre.
- Es posible obtener energía útil de las fuerzas que provocan los fluidos en movimiento. Los chorros de agua a gran velocidad que impactan en los álabes o aspas de una turbina la hacen girar, y permiten que impulse un generador que produce energía eléctrica.
- En una turbina de gas, los gases calientes en combustión se expanden a través de las ruedas de ella y desarrollan niveles muy altos de energía que impulsan un aeroplano, helicóptero o navío.
- Es frecuente que el flujo de aire comprimido de una boquilla se utilice para mover los artículos de un sistema productivo o para quitar astillas metálicas y otros residuos.
- Se emplean corrientes de agua concentradas y a velocidad muy grande para cortar materiales fibrosos como el pavimento y la tela, en sistemas de corte con chorros de agua.
- Los sistemas de tubería que conducen volúmenes grandes de fluidos a presión experimentan fuerzas elevadas, conforme el fluido pasa alrededor de los codos o se ve restringido por una contracción de la corriente. Así, cualquier parte del sistema donde la dirección del flujo cambia o donde la magnitud de la velocidad se modifica, debe anclarse con seguridad.

En este capítulo aprenderá los principios fundamentales que gobiernan la generación de fuerzas debido a fluidos en movimiento. Se ilustrará con varios problemas prácticos. Después, en el capítulo 17, se abundará en este tema para incluir fuerzas de arrastre sobre muchas formas de objetos y fuerzas de elevación en aparatos aerodinámicos.

16.2 OBJETIVOS

Al terminar este capítulo podrá:

1. Emplear la segunda ley del movimiento de Newton, $F = ma$, para desarrollar la *ecuación de fuerza*, que se emplea para calcular la fuerza que ejerce un fluido cuando cambia la dirección de su movimiento o velocidad.
2. Relacionar la ecuación de fuerza con el *impulso-cantidad de movimiento*.
3. Utilizar la ecuación de fuerza para calcular la fuerza que se ejerce sobre un objeto estacionario que ocasiona el cambio en la dirección de una corriente de fluido.
4. Emplear la ecuación de fuerza para calcular la fuerza que se ejerce sobre las vueltas de las tuberías.
5. Emplear la ecuación de fuerza para calcular la fuerza que se aplica sobre objetos en movimiento, como las aspas del impulsor de una bomba.

16.3 ECUACIÓN DE FUERZA

Siempre que cambia la magnitud o dirección de la velocidad de un cuerpo, se requiere una fuerza que provoque el cambio. Es frecuente que se utilice la segunda ley del movimiento de Newton para expresar este concepto en forma matemática; su forma más común es:

$$F = ma \tag{16-1}$$

La fuerza es igual a la masa multiplicada por la aceleración. La aceleración es la tasa de cambio de la velocidad con respecto del tiempo. Sin embargo, como la velocidad es una cantidad vectorial que tiene magnitud y dirección, al cambiarse la magnitud o la dirección se originará una aceleración. De acuerdo con la ecuación (16-1), se requiere de una fuerza para efectuar el cambio.

La ecuación (16-1) es conveniente para utilizarla en cuerpos sólidos, porque la masa permanece constante y es posible determinar la aceleración de todo el cuerpo. En problemas de movimiento de fluidos, se hace que un flujo continuo experimente la aceleración, y es deseable que la ecuación de Newton tenga otra forma. Debido a que la aceleración es la tasa de cambio de la velocidad con respecto del tiempo, la ecuación (16-1) puede escribirse como:

$$F = ma = m\frac{\Delta v}{\Delta t} \tag{16-2}$$

El término $m/\Delta t$ se interpreta como el flujo másico, es decir, la cantidad de masa que fluye en una cantidad de tiempo dada. En el análisis del movimiento de fluidos, en el capítulo 6, el flujo másico se denotaba con el símbolo M. Además, la M se relacionaba con el flujo volumétrico Q, por medio de la relación

$$M = \rho Q \tag{16–3}$$

donde ρ es la densidad del fluido. Entonces, la ecuación (16-2) se convierte en

FORMA GENERAL DE LA ECUACION DE FUERZA

$$F = (m/\Delta t)\Delta v = M\,\Delta v = \rho Q\,\Delta v \tag{16–4}$$

Ésta es la forma general de la ecuación de fuerza que se emplea en problemas de flujo, porque involucra la velocidad y el flujo volumétrico, conceptos que por lo general son conocidos en un sistema de fluido.

16.4 ECUACIÓN DEL IMPULSO-CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La ecuación de fuerza (16-4) se relaciona con otro principio de la dinámica de fluidos: la ecuación del *impulso-cantidad de movimiento*. Se define al impulso como la fuerza que actúa sobre un cuerpo durante un periodo de tiempo, y se indica por medio de

$$\text{Impulso} = F(\Delta t)$$

Esta forma, que depende del cambio total del tiempo Δt, es apropiada para tratar en condiciones de flujo estable. Si las condiciones varían, se emplea la forma instantánea de la ecuación:

$$\text{Impulso} = F(dt)$$

donde dt es la cantidad diferencial de cambio con respecto al tiempo.

Se define a la *cantidad de movimiento* como el producto de la masa de un cuerpo por su velocidad. El cambio en la cantidad de movimiento es

$$\text{Cambio en el cantidad de movimiento} = m(\Delta v)$$

En un sentido instantáneo,

$$\text{Cambio en la cantidad de movimiento} = m(dv)$$

Ahora, la ecuación (16-2) se reacomoda en la forma

$$F(\Delta t) = m(\Delta v)$$

Aquí hemos mostrado la ecuación de impulso-cantidad de movimiento para condiciones de flujo estable. En un sentido instantáneo,

$$F(dt) = m(dv)$$

16.5 MÉTODO DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS POR MEDIO DE LAS ECUACIONES DE FUERZA

Recordemos que en los problemas que involucran fuerzas se debe tomar en cuenta las direcciones en que dichas fuerzas actúan. En la ecuación (16-4), tanto la fuerza como la velocidad son cantidades vectoriales. La ecuación es válida sólo cuando todos los términos tienen la misma dirección. Por esta razón, se escriben ecuaciones diferentes para cada dirección de interés en el caso particular. En general, si se denominan tres direcciones perpendiculares como x, y y z, se escribe una ecuación distinta para cada dirección:

ECUACIONES DE FUERZA EN LAS DIRECCIONES x, y Y z

$$F_x = \rho Q\,\Delta v x = \rho Q(v_{2_x} - v_{1_x}) \tag{16–5}$$
$$F_y = \rho Q\,\Delta v y = \rho Q(v_{2_y} - v_{1_y}) \tag{16–6}$$
$$F_z = \rho Q\,\Delta v z = \rho Q(v_{2_z} - v_{1_z}) \tag{16–7}$$

Ésta es la forma de la ecuación de fuerza que se empleará en este libro, con las direcciones elegidas de acuerdo con la situación física. En una dirección particular, por ejemplo x, el término F_x se refiere a la fuerza externa neta que actúa sobre el fluido en esa dirección. Por tanto, es la suma algebraica de *todas* las fuerzas externas, inclusive la que ejerce una superficie sólida y las que se deben a la presión del fluido. El término Δv_x se refiere al cambio de la velocidad en la dirección x. Además, v_1 es la velocidad cuando el fluido entra al dispositivo y v_2 es la velocidad cuando sale. Entonces v_{1_x} es la componente de v_1 en la dirección x, y v_{2_x} es la componente de v_2 en la dirección x.

El enfoque específico a problemas que emplean la ecuación de fuerza depende un poco de la naturaleza de los datos proporcionados. Veamos un procedimiento general:

PROCEDIMIENTO PARA EMPLEAR LAS ECUACIONES DE FUERZA

1. Identificar una porción de la corriente de fluido para considerarla un cuerpo libre. Ésta será la parte donde el fluido cambia su dirección o donde la geometría de la corriente de flujo se modifica.
2. Establecer ejes de referencia para las direcciones de las fuerzas. Por lo general, se elige un eje que sea paralelo a una parte de la corriente. En los siguientes problemas modelo, se escoge que las direcciones positivas de x y de y estén en la misma dirección que las fuerzas de reacción.
3. Identificar y mostrar en el diagrama de cuerpo libre todas las fuerzas externas que actúan sobre el fluido. Todas las superficies sólidas que afecten la dirección del flujo ejercen fuerzas. Asimismo, la presión del fluido que actúa sobre el área de la sección transversal de la corriente, ejerce una fuerza en dirección paralela a la corriente, en la frontera del cuerpo libre.
4. Mostrar la dirección de la velocidad de flujo conforme entra y sale del cuerpo libre.
5. Escribir las ecuaciones de fuerza en las direcciones pertinentes, con los datos que se muestren en el cuerpo libre. Se emplea la ecuación (16-5), (16-6) o (16-7).
6. Sustituir los datos y despejar la cantidad que se desea.

Este procedimiento se ilustra en los problemas modelo presentados en las secciones siguientes.

16.6 FUERZAS SOBRE OBJETOS ESTACIONARIOS

Cuando objetos estacionarios desvían corrientes de fluido libre, deben ejercerse fuerzas externas, con el fin de mantener el objeto en equilibrio. A continuación presentamos algunos ejemplos.

PROBLEMA MODELO 16.1

Un chorro de agua de 1 pulgada de diámetro, que tiene una velocidad de 20 pies/s, se desvía 90° con una paleta curvada, como se observa en la figura 16.1. El chorro fluye libremente en la atmósfera en un plano horizontal. Calcule las fuerzas x y y que el agua ejerce sobre la paleta.

FIGURA 16.1 Chorro de agua que desvía una paleta curvada.

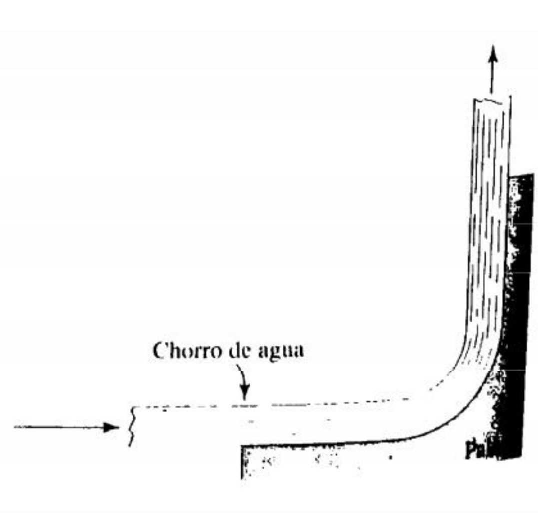
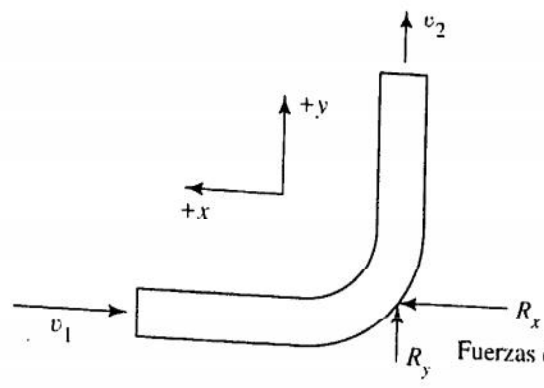


FIGURA 16.2 Diagrama de fuerzas para el fluido que desvía la paleta.



Solución Con el diagrama de la figura 16.2, escribimos la ecuación de fuerzas para la dirección x, así

$$F_x = \rho Q(v_{2_x} - v_{1_x})$$
$$R_x = \rho Q[0 - (-v_1)] = \rho Q v_1$$

Sabemos que

$$Q = Av = (0.00545 \text{ pie}^2)(20 \text{ pies/s}) = 0.109 \text{ pie}^3/\text{s}$$

Entonces, se supone que $\rho = 1.94 \text{ slugs/pie}^3 = 1.94 \text{ lb·s}^2/\text{pie}^4$, y escribimos

$$R_x = \rho Q v_1 = \frac{1.94 \text{ lb·s}^2}{\text{pie}^4} \times \frac{0.109 \text{ pie}^3}{\text{s}} \times \frac{20 \text{ pies}}{\text{s}} = 4.23 \text{ lb}$$

Para la dirección y, se supone $v_2 = v_1$, la fuerza es

$$F_y = \rho Q(v_{2_y} - v_{1_y})$$
$$R_y = \rho Q(v_2 - 0) = (1.94)(0.109)(20) \text{ lb} = 4.23 \text{ lb}$$

PROBLEMA MODELO 16.2 En una fuente de ornato, 0.05 m^3/s de agua que tiene una velocidad de 8 m/s se desvía por la rampa en ángulo que se ilustra en la figura 16.3. Determine las reacciones sobre la rampa en las direcciones x y y mostradas. Asimismo, calcule la fuerza total resultante y la dirección en la que actúa. Ignore los cambios de elevación.

Solución La figura 16.4 muestra las componentes x y y de los vectores de velocidad, y las direcciones que se suponen para R_x y R_y. La ecuación de fuerza en la dirección x es

$$F_x = \rho Q(v_{2_x} - v_{1_x})$$

Sabemos que

$$v_{2_x} = -v_2 \text{ sen } 15° \quad \text{(hacia la derecha)}$$
$$v_{1_x} = -v_1 \cos 45° \quad \text{(hacia la derecha)}$$

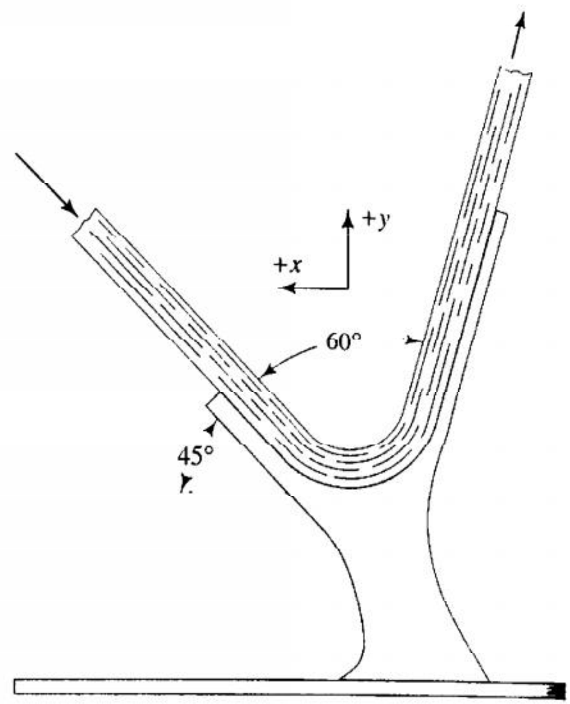
Si en la rampa se ignora la fricción, suponemos que $v_2 = v_1$. La única fuerza externa es R_x. Entonces, tenemos

$$R_x = \rho Q[-v_2 \text{sen } 15° - (-v_1 \cos 45°)]$$
$$= \rho Q v(-\text{sen } 15° + \cos 45°) = 0.448\ \rho Q v$$

Como para el agua, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, obtenemos

$$R_x = \frac{(0.448)(1000 \text{ kg})}{\text{m}^3} \times \frac{0.05 \text{ m}^3}{\text{s}} \times \frac{8 \text{ m}}{\text{s}} = \frac{179 \text{ kg·m}}{\text{s}^2} = 179 \text{ N}$$

FIGURA 16.3 Fuente de ornato que desvía un chorro de agua.



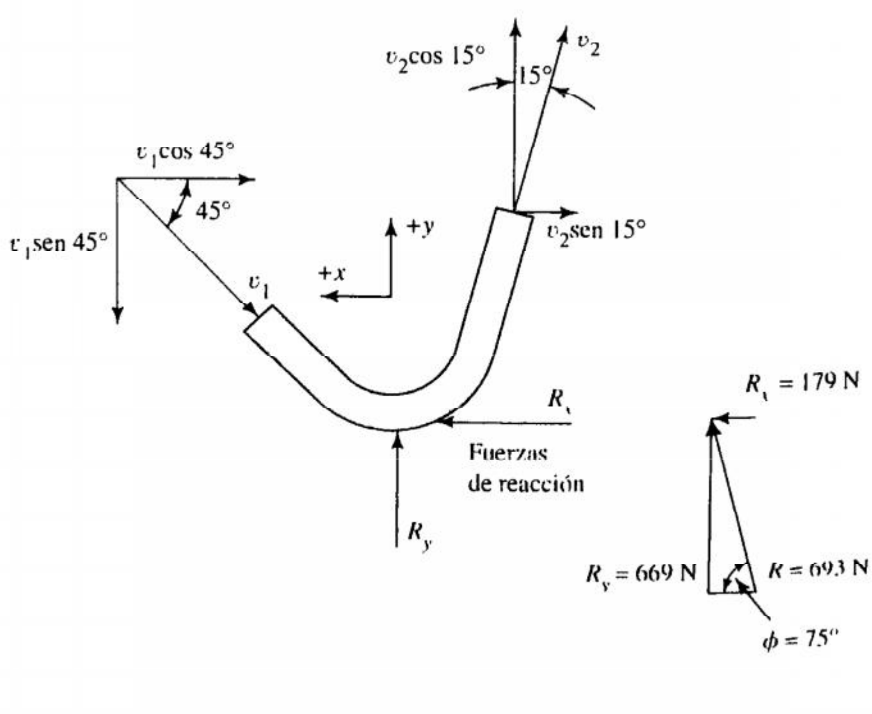
En la dirección y, la ecuación de fuerza es

$$F_y = \rho Q(v_{2_y} - v_{1_y})$$

Sabemos que

$$v_{2_y} = v_2 \cos 15° \qquad \text{(hacia arriba)}$$
$$v_{1_y} = -v_1 \operatorname{sen} 45° \qquad \text{(hacia abajo)}$$

FIGURA 16.4 Diagrama de fuerzas para el fluido desviado por la base de la fuente.



Entonces, tenemos

$$\begin{aligned} R_y &= \rho Q[v_2 \cos 15^\circ - (-v_1 \text{sen } 45^\circ)] \\ &= \rho Q v(\cos 15^\circ + \text{sen } 45^\circ) \\ &= (1000)(0.05)(8)(0.966 + 0.707) \text{ N} \\ R_y &= 699 \text{ N} \end{aligned}$$

La fuerza resultante R, es

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{179^2 + 669^2} = 693 \text{ N}$$

Para la dirección de R, obtenemos

$$\begin{aligned} \tan \phi &= R_y/R_x = 669/179 = 3.74 \\ \phi &= 75.0^\circ \end{aligned}$$

Por tanto, la fuerza resultante que la rampa debe de ejercer sobre el agua es de 693 N, y actúa a 75° con respecto a la horizontal, como se ilustra en la figura 16.4.

■

16.7 FUERZAS SOBRE LAS VUELTAS DE LAS TUBERÍAS

En la figura 16.5 se muestra un codo común a 90° en una tubería que conduce un flujo volumétrico estable Q. Si queremos garantizar la instalación apropiada, es importante saber cuánta fuerza se requiere para mantenerlo en equilibrio. El problema siguiente demuestra un enfoque para esta situación.

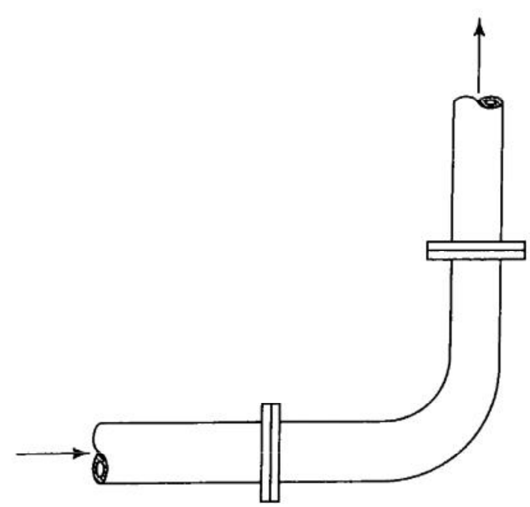


FIGURA 16.5 Codo en una tubería.

PROBLEMA MODELO 16.3 Calcule la fuerza que debe aplicarse sobre la tubería de la figura 16.5 con el fin de mantenerla en equilibrio. El codo se encuentra en un plano horizontal, y está conectado a dos tuberías de 4 pulgadas cédula 40 que conducen 3000 L/min de agua a 15 °C. La presión de entrada es de 550 kPa.

Solución El problema se visualiza al considerar el fluido dentro del codo como un cuerpo libre, como se ilustra en la figura 16.6. Se indican las fuerzas como vectores de color negro, y la dirección de la velocidad de flujo como vectores de color gris (v_1 y v_2). Debe establecerse una convención para las direcciones de todos los vectores. En este caso se supone que la dirección positiva de x es hacia la izquierda, y la positiva de y es hacia arriba. Las fuerzas R_x y R_y son

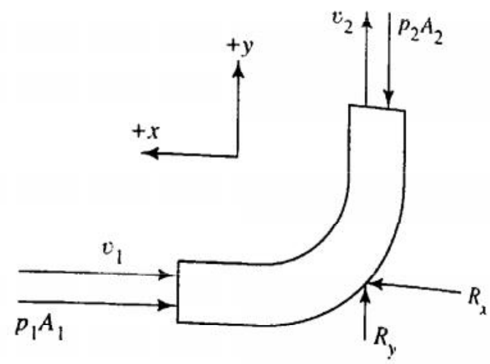


FIGURA 16.6 Diagrama de fuerzas sobre el fluido en el codo.

las reacciones externas para mantener el equilibrio. Las fuerzas p_1A_1 y p_2A_2 se deben a la presión del fluido. Se analizarán por separado las dos direcciones.

La fuerza externa neta en la dirección x se encuentra por medio de la ecuación

$$F_x = \rho Q(v_{2_x} - v_{1_x})$$

Sabemos que

$$F_x = R_x - p_1A_1$$
$$v_{2_x} = 0$$
$$v_{1_x} = -v_1$$

Entonces, tenemos

$$R_x - p_1A_1 = \rho Q[0 - (-v_1)]$$
$$R_x = \rho Qv_1 + p_1A_1 \tag{16–8}$$

De los datos presentados, $p_1 = 550$ kPa, $\rho = 1000$ kg/m^3 y $A_1 = 8.213 \times 10^{-3}$ m^2. Entonces,

$$Q = 3000\text{ L/min} \times \frac{1\text{ m}^3/\text{s}}{60\,000\text{ L/min}} = 0.05\text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0.05\text{ m}^3/\text{s}}{8.213 \times 10^{-3}\text{ m}^2} = 6.09\text{ m/s}$$

$$\rho Qv_1 = \frac{1000\text{ kg}}{\text{m}^3} \times \frac{0.05\text{ m}^3}{\text{s}} \times \frac{6.09\text{ m}}{\text{s}} = 305\text{ kg·m/s}^2 = 305\text{ N}$$

$$p_1A_1 = \frac{550 \times 10^3\text{ N}}{\text{m}^2} \times (8.213 \times 10^{-3}\text{ m}^2) = 4517\text{ N}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (16-8), queda

$$R_x = (305 + 4517)\text{ N} = 4822\text{ N}$$

En la dirección y, la ecuación para la fuerza externa neta es

$$F_y = \rho Q(v_{2_y} - v_{1_y})$$

Sabemos que

$$F_y = R_y - p_2A_2$$
$$v_{2_y} = +v_2$$
$$v_{1_y} = 0$$

Entonces, tenemos

$$R_y - p_2A_2 = \rho Q v_2$$
$$R_y = \rho Q v_2 + p_2A_2$$

Si se ignoran las pérdidas de energía en el codo, $v_2 = v_1$ y $p_2 = p_1$, porque los tamaños de la entrada y la salida son iguales, entonces,

$$\rho Q v_2 = 305 \text{ N}$$
$$p_2A_2 = 4517 \text{ N}$$
$$R_y = (305 + 4517) \text{ N} = 4822 \text{ N}$$

Las fuerzas R_x y R_y son las reacciones causadas en el codo, cuando el fluido da una vuelta de 90°. Estas fuerzas las proveerían anclajes para el codo, o se tomarían de bridas en las tuberías principales.

PROBLEMA MODELO 16.4 Por la vuelta reductora de la figura 16.7 circula aceite de linaza con gravedad específica de 0.93, con una velocidad de 3 m/s y presión de 275 kPa. La vuelta se localiza en un plano horizontal. Calcule las fuerzas x y y requeridas para mantener la vuelta en su lugar. Ignore las pérdidas de energía que ocurren en ella.

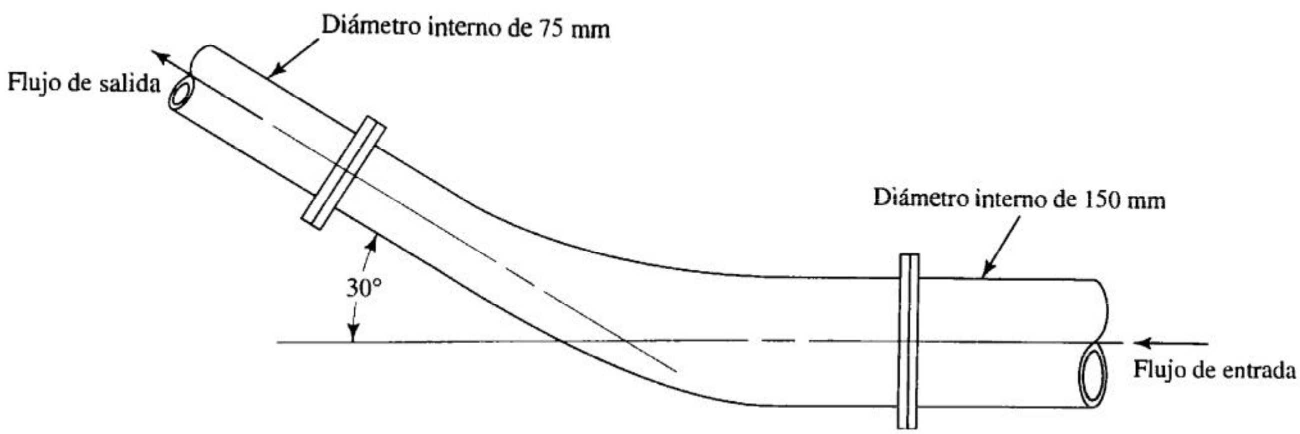


FIGURA 16.7 Vuelta reductora.

Solución El fluido en la vuelta se presenta como cuerpo libre en la figura 16.8. En primer lugar, debemos desarrollar las ecuaciones de fuerza para las direcciones x y y mostradas.

La ecuación de fuerza para la dirección x es

$$F_x = \rho Q(v_{2_x} - v_{1_x})$$
$$R_x - p_1A_1 + p_2A_2\cos 30° = \rho Q[-v_2\cos 30° - (-v_1)] \qquad \textbf{(16–9)}$$
$$R_x = p_1A_1 - p_2A_2\cos 30° - \rho Q v_2\cos 30° + \rho Q v_1$$

Deben escribirse con cuidado los signos algebraicos, de acuerdo con la convención de signos establecida en la figura 16.8. Observe que todos los términos de fuerza y velocidad son las componentes *en la dirección x*.

En la dirección y, la ecuación de fuerza es

$$F_y = \rho Q(v_{2_y} - v_{1_y})$$
$$R_y - p_2A_2\text{sen } 30° = \rho Q(v_2\text{sen } 30° - 0)$$
$$R_y = p_2A_2\text{sen } 30° + \rho Q v_2\text{sen } 30° \qquad \textbf{(16–10)}$$

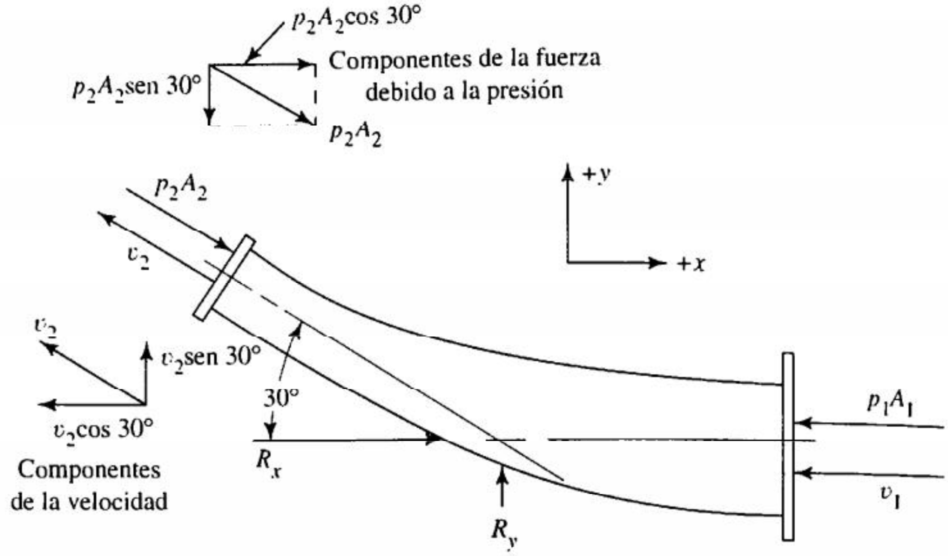


FIGURA 16.8 Diagrama de fuerzas para el fluido en la vuelta reductora.

Ahora, deben calcularse varios valores numéricos. Para los tubos de entrada y salida, $A_1 = 1.767 \times 10^{-2}\ \text{m}^2$ y $A_2 = 4.418 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$. Tenemos

$$\rho = (\text{sg})(\rho_w) = (0.93)(1000\ \text{kg/m}^3) = 930\ \text{kg/m}^3$$
$$\gamma = (\text{sg})(\gamma_w) = (0.93)(9.81\ \text{kN/m}^3) = 9.12\ \text{kN/m}^3$$
$$Q = A_1v_1 = (1.767 \times 10^{-2}\ \text{m}^2)(3\ \text{m/s}) = 0.053\ \text{m}^3\text{/s}$$

Por continuidad. $A_1v_1 = A_2v_2$. Entonces, tenemos

$$v_2 = v_1(A_1/A_2) = (3\ \text{m/s})(1.767 \times 10^{-2}/4.418 \times 10^{-3}) = 12\ \text{m/s}$$

Para encontrar p_2 se puede utilizar la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Pero $z_1 = z_2$. Entonces, tenemos

$$p_2 = p_1 + \gamma(v_1^2 - v_2^2)/2g$$
$$= 275\ \text{kPa} + \left[\frac{(9.12)(3^2 - 12^2)}{(2)(9.81)} \times \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \times \frac{\text{s}^2}{\text{m}}\right]$$
$$= 275\ \text{kPa} - 62.8\ \text{kPa}$$
$$p_2 = 212.2\ \text{kPa}$$

Las cantidades que se necesitan para las ecuaciones (16-9) y (16-10) son

$$p_1A_1 = (275\ \text{kN/m}^2)(1.767 \times 10^{-2}\ \text{m}^2) = 4859\ \text{N}$$
$$p_2A_2 = (212.2\ \text{kN/m}^2)(4.418 \times 10^{-3}\ \text{m}^2) = 938\ \text{N}$$
$$\rho Qv_1 = (930\ \text{kg/m}^3)(0.053\ \text{m}^3\text{/s})(3\ \text{m/s}) = 148\ \text{N}$$
$$\rho Qv_2 = (930\ \text{kg/m}^3)(0.053\ \text{m}^3\text{/s})(12\ \text{m/s}) = 591\ \text{N}$$

De la ecuación (16-9) obtenemos

$$R_x = (4859 - 938\cos 30° - 591\cos 30° + 148)\ \text{N} = 3683\ \text{N}$$

De la ecuación (16-10) resulta

$$R_y = (938\ \text{sen}\ 30° + 591\ \text{sen}\ 30°)\ \text{N} = 765\ \text{N}$$

■

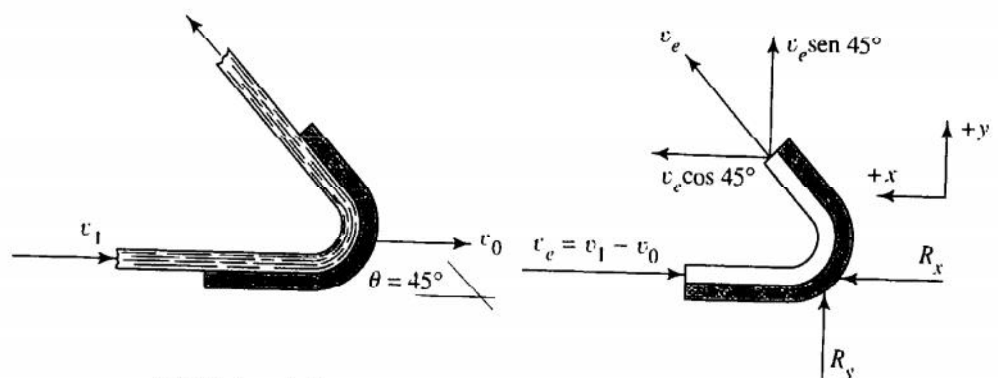
16.8 FUERZAS SOBRE OBJETOS EN MOVIMIENTO

Las paletas de turbinas y otras máquinas rotatorias son ejemplos familiares de objetos sobre los que actúan fluidos a gran velocidad. Un chorro de fluido con velocidad mayor que la de las paletas de la turbina ejerce una fuerza sobre éstas, y hará que aceleren para generar energía mecánica aprovechable. Cuando se estudian las fuerzas sobre cuerpos en movimiento, debe considerarse el *movimiento relativo* del fluido respecto del cuerpo.

PROBLEMA MODELO 16.5

En la figura 16.9(a) se muestra un chorro de agua con velocidad v_1 que golpea una paleta que se mueve a una velocidad v_0. Determine las fuerzas que la paleta ejerce sobre el agua, si $v_1 = 20$ m/s y $v_0 = 8$ m/s. El chorro tiene 50 mm de diámetro.

FIGURA 16.9 Flujo desviado por una paleta móvil.



(a) Paleta móvil

(b) Paleta estacionaria equivalente

Solución El sistema con una paleta móvil se convierte en un sistema equivalente estacionario, como se muestra en la figura 16.9(b), con la definición de una velocidad efectiva v_e y un flujo volumétrico efectivo Q_e. Entonces, tenemos

VELOCIDAD EFECTIVA Y FLUJO VOLUMÉTRICO

$$v_e = v_1 - v_0 \tag{16–11}$$

$$Q_e = A_1 v_e \tag{16–12}$$

donde A_1 es el área del chorro conforme pasa por la paleta. Sólo la diferencia entre la velocidad del chorro y la del aspa, velocidad efectiva, genera una fuerza sobre ésta. Las ecuaciones de fuerza se vuelven a escribir en términos de v_e y Q_e. En la dirección x,

$$\begin{aligned} R_x &= \rho Q_e v_e \cos\theta - (-\rho Q_e v_e) \\ &= \rho Q_e v_e (1 + \cos\theta) \end{aligned} \tag{16–13}$$

En la dirección y,

$$R_y = \rho Q_e v_e \operatorname{sen}\theta - 0 \tag{16–14}$$

Sabemos que

$$v_e = v_1 - v_0 = (20 - 8)\ \text{m/s} = 12\ \text{m/s}$$

$$Q_e = A_1 v_e = (1.964 \times 10^{-3}\ \text{m}^2)(12\ \text{m/s}) = 0.0236\ \text{m}^3/\text{s}$$

Entonces, se calculan las reacciones con las ecuaciones (16-13) y (16-14):

$$R_x = (1000)(0.0236)(12)(1 + \cos 45°) = 483\ \text{N}$$

$$R_y = (1000)(0.0236)(12)(\operatorname{sen} 45°) = 200\ \text{N}$$

■

PROBLEMAS

16.1M *Calcule la fuerza que se requiere para mantener una placa plana en equilibrio, perpendicular al flujo de agua de 25 m/s que lanza una boquilla de 75 mm de diámetro.*

16.2E ¿Cuál debe ser la velocidad del flujo de agua de una boquilla de 2 pulgadas de diámetro, para ejercer una fuerza de 300 lb sobre una pared plana?

16.3E Calcule la fuerza que se aplica sobre una paleta estacionaria curva que desvía 1 pulgada en cierta corriente de agua, con un ángulo de 90°. El flujo volumétrico es de 150 gal/min.

16.4M *Los señalamientos para una autopista se diseñan para que soporten vientos de 125 km/h. Calcule la fuerza total sobre un señalamiento que mide 4 por 3 m, si el viento lo golpea en forma perpendicular a su cara. Calcule la presión equivalente sobre el señalamiento, en Pa. El aire está a −10 °C. (Para un análisis más profundo de este problema, consulte el capítulo 17 y el problema 17.9.)*

16.5E Calcule las fuerzas en las direcciones vertical y horizontal sobre el bloque de la figura 16.10. La corriente de fluido es un chorro de agua de 1.75 pulgada de diámetro, a 60 °F y velocidad de 25 pies/s. La velocidad del agua al abandonar el bloque también es de 25 pies/s.

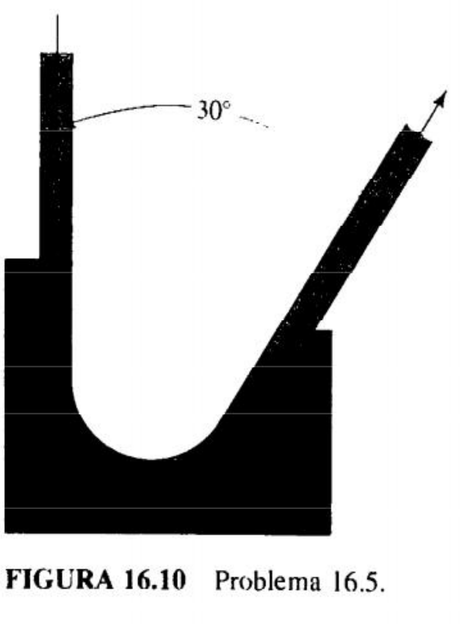


FIGURA 16.10 Problema 16.5.

16.6E La figura 16.11 muestra una corriente libre de agua a 180 °F, que desvía una paleta estacionaria con un ángulo de 130°. La corriente de entrada tiene una velocidad de 22.0 pies/s. El área de la sección transversal de la corriente es de 2.95 pulgadas^2 y se mantiene constante en todo el sistema. Calcule las fuerzas que el agua aplica sobre el aspa en las direcciones horizontal y vertical.

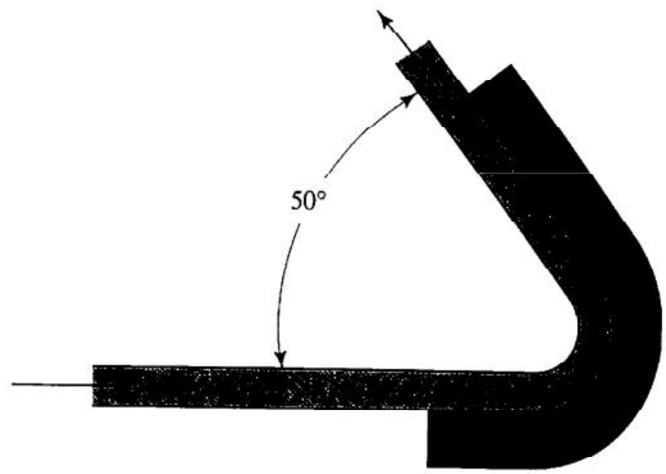


FIGURA 16.11 Problema 16.6.

16.7M *Calcule las fuerzas horizontal y vertical que se aplican sobre la paleta de la figura 16.12, debido a un flujo de agua a 50 °C. La velocidad es de 15 m/s y se mantiene constante.*

16.8E En una planta donde se fabrican partes hemisféricas en forma de tasa, una lavadora automática está diseñada para limpiarlas antes de su envío. Se evalúa un esquema que utiliza una corriente de agua a 180 °F que sale vertical hacia arriba, donde está la tasa. La corriente tiene una velocidad de 30 pie/s y diámetro de 1.00 pulgada. Como se aprecia en la figura 16.13, el agua sale de la tasa en dirección vertical hacia abajo en forma de anillo, cuyo diámetro externo es de 4.00 pulgadas y el interno de 3.80 pulgadas. Calcule la fuerza externa que se requiere para mantener la tasa hacia abajo.

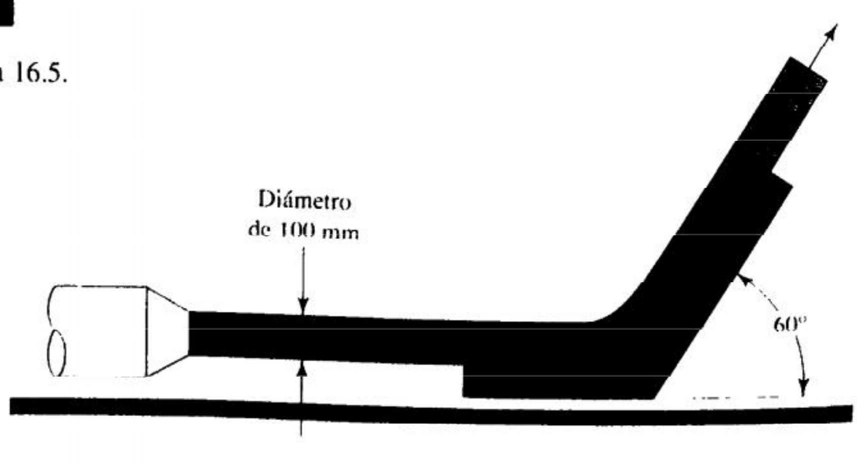


FIGURA 16.12 Problema 16.7.

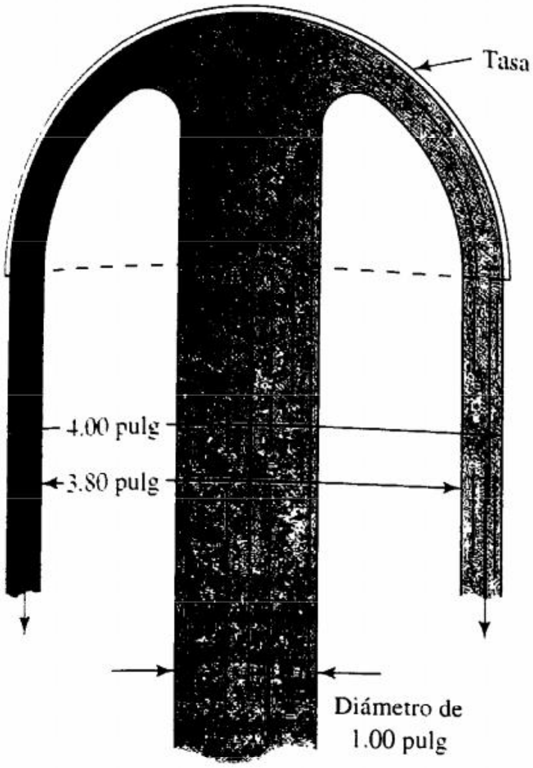


FIGURA 16.13 Problema 16.8.

16.9M *Se dirige una corriente de aceite (sg = 0.90) hacia el centro de la base de una placa metálica plana, con objeto de mantenerla fría durante una operación de soldadura. La placa pesa 550 N. Si la corriente tiene 35 mm de diámetro, calcule su velocidad para que pueda levantar la placa. La corriente choca con la placa en forma perpendicular.*

16.10E Una corriente de agua con velocidad de 40 pies/s y diámetro de 2 pulgadas golpea el borde de una placa plana, de modo que la mitad del chorro se desvía hacia abajo, como se aprecia en la figura 16.14. Calcule la fuerza que soporta la placa y la cantidad de movimiento en el punto A, debido a la aplicación de la fuerza.

16.11E La figura 16.15 muestra un tipo de medidor de flujo donde la paleta plana gira sobre un pivote que desvía la corriente de fluido. La fuerza de éste se contrarresta por medio de un resorte. Calcule la fuerza que requiere el resorte para mantener la paleta en posición vertical, cuando 100 gal/min de agua fluyen por la tubería, de 1 pulgada cédula 40, donde se encuentra colocado el medidor.

16.12E Se bombea agua en forma vertical desde el fondo de una embarcación, y se descarga de modo horizontal en forma de chorro de 4 pulgadas de diámetro y velocidad de 60 pies/s. Calcule la fuerza sobre el bote.

16.13E Se coloca una boquilla de 2 pulgadas en una manguera cuyo diámetro interno es de 4 pulgadas. El coeficiente de resistencia K de la boquilla es de 0.12, con base en la carga de la velocidad de salida. Si el chorro que la boquilla lanza tiene una velocidad de 80 pies/s, calcule la fuerza que el agua aplica sobre la boquilla.

16.14M *A un intercambiador de calor ingresa agua de mar (sg = 1.03) a través de una vuelta reductora que conecta un tubo de cobre tipo K de 4 pulgadas con otro tipo K de 2 pulgadas. La presión de la corriente que sale de la vuelta es de 825 kPa. Calcule la fuerza que se requiere para mantener la vuelta en equilibrio. Tome en cuenta la pérdida de energía en la vuelta y suponga un coeficiente de resistencia de 3.5, con base en la velocidad de entrada. El flujo volumétrico es de 0.025 m^3/s.*

16.15E Una reducción conecta una tubería estándar de 6 pulgadas cédula 40 con otra de 3 pulgadas cédula 40 también. Las paredes de la reducción cónica están inclinadas con un ángulo de 40°. El flujo volumétrico del agua es de 500 gal/min, y la carga de presión de la reducción es de 125 psig. Calcule la fuerza que el agua ejerce sobre la reducción, sin olvidar la pérdida de energía en ésta.

16.16E Calcule la fuerza sobre un codo a 45°, conectado a una tubería de acero de 8 pulgadas cédula 80, que conduce 6.5 pie^3/s de agua a 80 °F. La salida del codo descarga hacia la atmósfera. Considere la pérdida de energía en el codo.

16.17M *Calcule la fuerza que se requiere para mantener en su lugar un codo a 90°, si conecta tuberías de 6 pulgadas cédula 40 que conducen 125 m^3/s de agua a 1050 kPa. Ignore la energía que se pierde en el codo.*

16.18M *Calcule la fuerza que se necesita para que una vuelta de retorno a 180° permanezca en equilibrio. La vuelta se encuentra en un plano horizontal y conecta una tu-*

FIGURA 16.14 Problema 16.10.

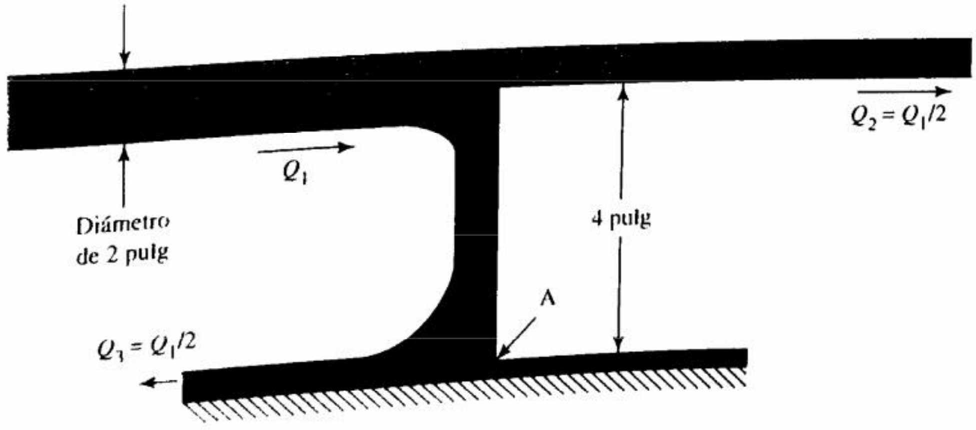
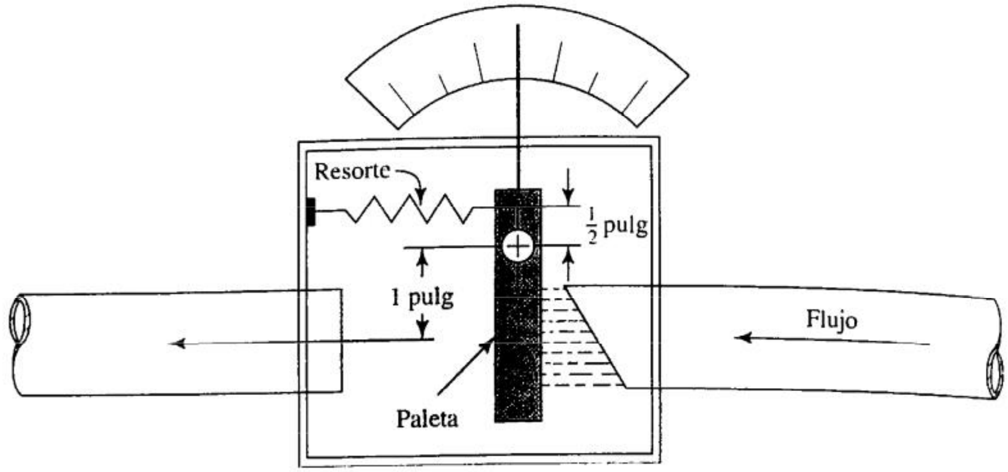


FIGURA 16.15 Problema 16.11.



bería de acero de 4 pulgadas cédula 80, por el que circulan 2000 L/min de fluido hidráulico a 2.0 MPa. El fluido tiene una gravedad específica de 0.89. Ignore las pérdidas de energía..

16.19M *Una vuelta en un tubo hace que el flujo se desvíe con un ángulo de 135°. La presión delante de la vuelta es de 275 kPa. Si el tubo de cobre de 6 pulgadas tipo K conduce 0.12 m^3/s de tetracloruro de carbono a 25 °C, determine la fuerza sobre la vuelta. Ignore las pérdidas de energía.*

16.20M *Un vehículo será impulsado por medio de un chorro de agua que golpeará una paleta, como se muestra en la figura 16.16. El chorro tiene una velocidad de 30 m/s, y sale de una boquilla cuyo diámetro es de 200 mm. Calcule la fuerza sobre el vehículo si, (a) es estacionario y (b) se mueve a 12 m/s.*

16.21M *Parte de un sistema de inspección en una operación de empaque utiliza un chorro de aire para quitar las cajas defectuosas de una banda transportadora, como se observa en la figura 16.17. El chorro lo inicia un sensor que mide el tiempo, de modo que el producto que será rechazado se encuentre frente al chorro en el momento preciso. El producto va a inclinarse sobre el borde al lado de la banda, como se aprecia en la figura. Calcule la velocidad de aire requerida para inclinar la caja fuera de la banda. La densidad del aire es de 1.20 kg/m^3. La caja tiene una masa de 0.10 kg. El chorro tiene un diámetro de 10.0 mm.*

16.22M *En la figura 16.18 se ilustra una rueda pequeña de ornato ajustada a paletas planas, de modo que gire sobre su eje cuando sople una corriente de aire. Suponga que todo el aire de la corriente de 15 mm de diámetro que se mueve a 0.35 m/s golpea una paleta y se desvía con ángulos rectos, y calcule la fuerza que se aplica sobre la rueda al principio, cuando se encuentra inmóvil. El aire tiene una densidad de 1.20 kg/m^3.*

16.23M *Para la rueda descrita en el problema 16.22, calcule la fuerza que se aplica sobre la paleta cuando la rueda gira a 40 rpm.*

16.24E Un conjunto de persianas desvía una corriente de aire caliente sobre partes pintadas, como se ilustra en la figura 16.19. Las persianas están giradas un poco para que distribuyan el aire de manera uniforme sobre las partes. Calcule el par que se requiere para girar las persianas hacia la corriente, cuando ésta fluye a una velocidad de 10 pies/s. Suponga que todo el aire que llega a una persiana se desvía con el ángulo en que la persiana se encuentra. El aire tiene una densidad de 2.06×10^{-3} slug/pie^3. Utilice $\theta = 45°$.

16.25E Para las persianas de la figura 16.19 y descritas en el problema 16.24, calcule el par que se necesita para girarlos cuando el ángulo es $\theta = 20°$.

16.26E Para las persianas de la figura 16.19 y descritas en el problema 16.24, calcule el par que se necesita para girarlos en varias posiciones del ángulo θ, desde 10° a 90°. Elabore una gráfica del par *versus* el ángulo.

FIGURA 16.16 Problema 16.20.

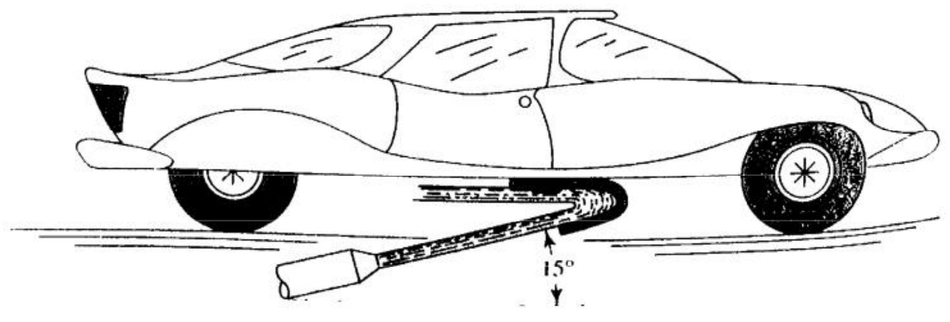


FIGURA 16.17 Problema 16.21.

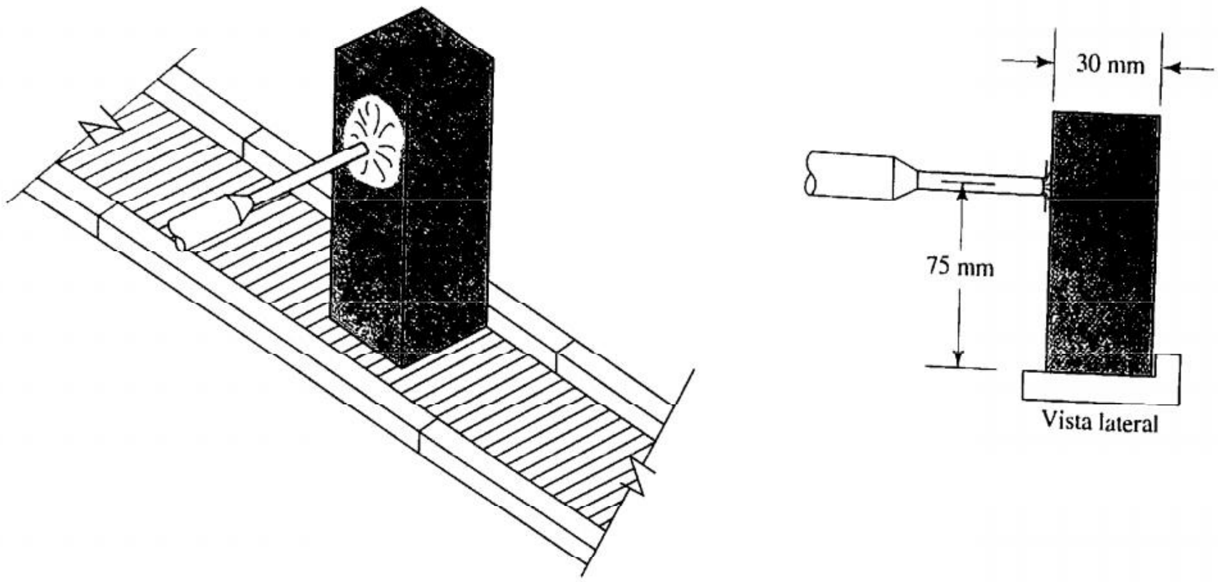


FIGURA 16.18 Problemas 16.22 y 16.23.

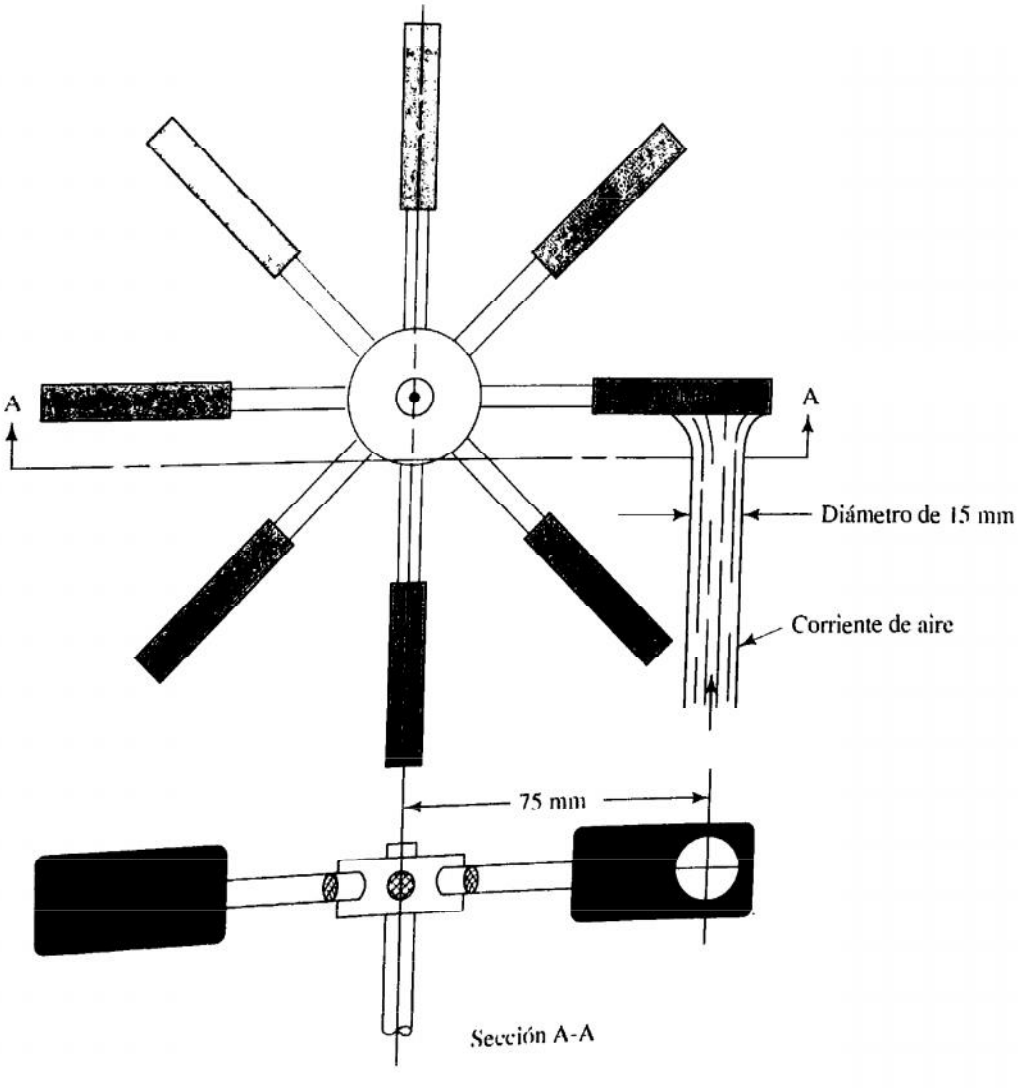


FIGURA 16.19 Problemas 16.24 a 16.26.

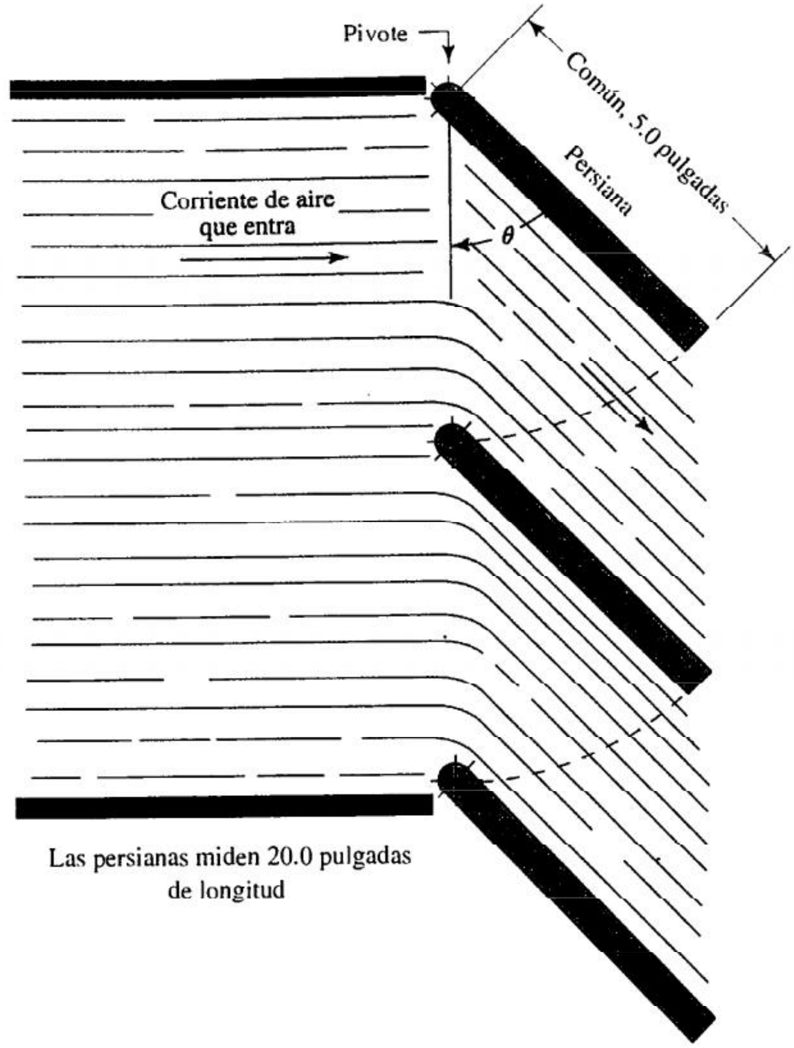
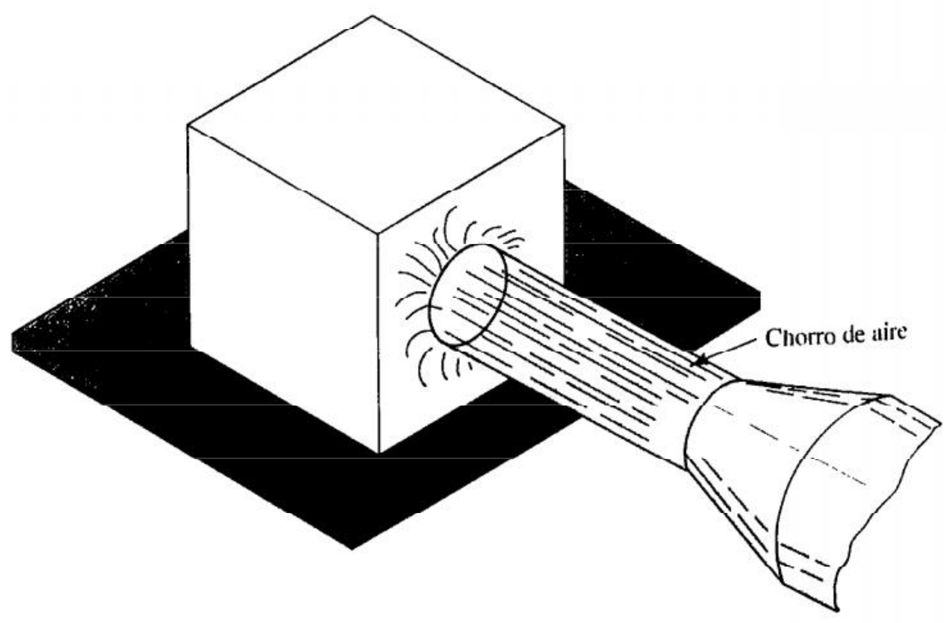


FIGURA 16.20 Problemas 16.27 y 16.28.



16.27E La figura 16.20 muestra un dispositivo para limpiar polvo con un chorro de aire de $1\frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro, que sale de una boquilla lanzadora. Como se ve, el chorro golpea contra un objeto en forma de caja rectangular colocada sobre el piso. Si la velocidad del aire es de 25 pies/s y la caja desvía todo el chorro ¿cuál es el objeto más pesado que podría ser movido? Suponga que la caja se desliza en vez de volcarse y que el coeficiente de fricción es de 0.60. El aire tiene una densidad de 2.40×10^{-3} slugs/pie^3.

16.28E Repita el problema 16.27; sólo cambie el chorro de aire por otro de agua a 50 °F y con diámetro de 0.75 pulgadas.

16.29M *La figura 16.21 es un esquema de turbina a la que ingresa una corriente de agua a 15 °C con diámetro de 7.50 mm, y se mueve a velocidad de 25 m/s. Calcule la fuerza sobre una de las aspas de la turbina, si la corriente se desvía con el ángulo que se indica y la hoja permanece inmóvil.*

16.30M *Repita el problema 16.29, con la aspa girando como parte de la rueda con radio de 200 mm y velocidad lineal tangencial de 10 m/s. También, calcule la velocidad rotacional de la rueda, en rpm.*

16.31M *Repita el problema 16.29, con la aspa girando como parte de la rueda con radio de 200 mm, pero ahora con velocidad tangencial lineal que va de 0 a 25 m/s, en intervalos de 5 m/s.*

FIGURA 16.21 Problemas 16.29 a 16.31.