

$$\text{o} \quad \frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}V_2^2 + gz_2 = \text{cte} \quad (3.77)$$

Esta es la ecuación de Bernoulli para un flujo estacionario incompresible y sin fricción a lo largo de una línea de corriente.

Relación entre la ecuación de Bernoulli y la ecuación de la energía en flujo estacionario

La Ecuación (3.77) es una forma muy extendida de la ecuación de Bernoulli para el flujo estacionario incompresible y sin fricción a lo largo de una línea de corriente. Claramente, esta ecuación está relacionada con la ecuación de la energía en régimen estacionario, Ecuación (3.66), que también corresponde al flujo en un tubo de corriente (con una entrada y una salida). Dicha ecuación se puede escribir en la forma:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2} + gz_2 + (\hat{u}_2 - \hat{u}_1 - q) + w_s + w_v \quad (3.78)$$

Esta relación es mucho más general que la ecuación de Bernoulli, ya que permite tener en cuenta (1) la fricción, (2) la transferencia de calor, (3) el trabajo mecánico y (4) el trabajo viscoso (otro efecto de la fricción).

La ecuación de Bernoulli (3.77) es una relación entre fuerzas obtenida a partir de conservación de cantidad de movimiento. Las consideraciones que hay que tener en cuenta en la Ecuación (3.77) son:

1. *Flujo estacionario*: una suposición muy común, aplicable a muchos flujos.
2. *Flujo incompresible*: aceptable si el número de Mach del flujo es inferior a 0.3.
3. *Flujo sin fricción*: muy restrictivo, las paredes sólidas introducen efectos de fricción.
4. *Flujo a lo largo de una línea de corriente*: líneas de corriente distintas pueden tener diferentes “constantes de Bernoulli” $w_0 = p/\rho + V^2/2 + gz$, dependiendo de las condiciones del flujo.

En la obtención de la ecuación de Bernoulli no se consideran tampoco transferencia de calor o trabajo. La razón básica de estas restricciones es que en fluidos reales los intercambios de calor y trabajo están ligados a efectos de fricción, lo que invalida la hipótesis de flujo sin fricción. Esos efectos termodinámicos son tenidos en cuenta en la ecuación de la energía de un flujo estacionario [Ecuación (3.66)]. De ahí nuestra advertencia: hay que ser precavido con el uso incorrecto de la ecuación de Bernoulli.

La Figura 3.15 ilustra algunas limitaciones prácticas del uso de la ecuación de Bernoulli en la forma (3.77). En el ensayo en túnel de la Figura 3.15a la ecuación de Bernoulli sólo es válida en el núcleo del flujo del túnel, pero no en las capas límite de sus paredes ni en las capas límite o la estela del modelo, que son regiones donde el efecto de la fricción es muy importante.

En la Figura 3.15b, la ecuación de Bernoulli es válida aguas arriba y aguas abajo de la hélice, pero con una constante $w_0 = p/\rho + V^2/2 + gz$ distinta debido al trabajo aportado al fluido por la hélice. La ecuación de Bernoulli no es válida cerca de las palas de la hélice ni en los torbellinos helicoidales, no mostrados en la figura (véase Figura 1.14), que se desprenden del borde de las palas. Además, las constantes de Bernoulli son mayores en el flujo que “atraviesa” el disco de la hélice que en el ambiente debido a la energía cinética del flujo en la estela.

En la Figura 3.15c, la Ecuación (3.77) es válida antes y después del fuego de la chimenea, pero con constantes diferentes debido a la adición de calor. La ecuación de Bernoulli no es válida en el propio fuego ni en las capas límite de la chimenea.

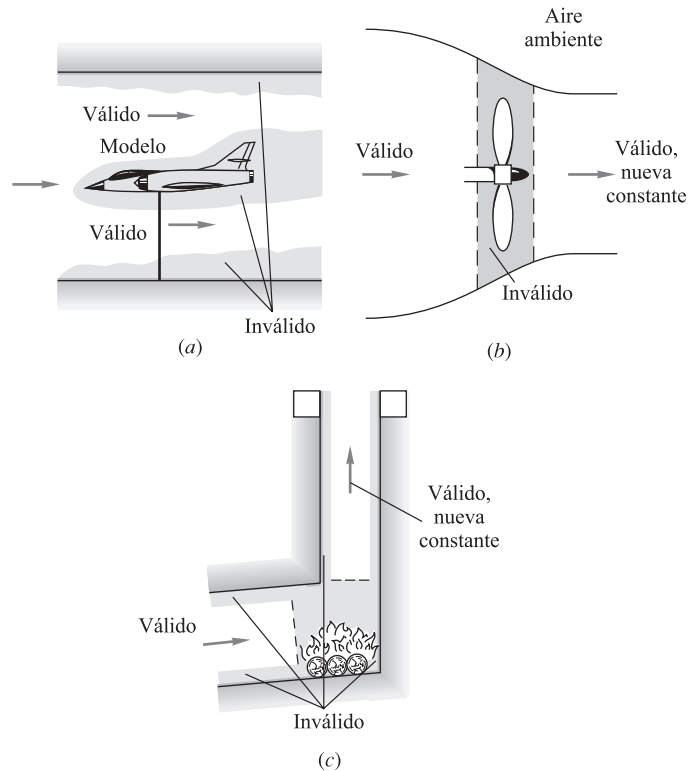


Figura 3.15. Ilustración de las zonas de validez o no validez de la ecuación de Bernoulli: (a) modelo en un túnel aerodinámico; (b) hélice; (c) chimenea.

Líneas de nivel de energía y de altura motriz

Una interpretación visual muy útil de la ecuación de Bernoulli se obtiene representando dos líneas del flujo. La *línea de nivel de energía* (LNE), también conocida como *línea de cargas o alturas totales*, muestra la altura de la constante de Bernoulli $h_0 = z + p/\gamma + V^2/(2g)$. En un flujo sin fricción y sin aplicación de calor o trabajo, la LNE es una línea de nivel constante, Ecuación (3.77). La *línea de altura motriz* (LAM), también conocida como *línea de cargas o alturas piezométricas*, indica el nivel correspondiente a la altura geométrica más la de presión $z + p/\gamma$, esto es, la LNE menos la altura de velocidad $V^2/(2g)$. La LAM es la altura a la que subiría el líquido en un tubo piezométrico (véase Problema P2.11) incorporado al flujo. En el flujo en un canal abierto, la LAM es la superficie libre del agua.

La Figura 3.16 muestra las líneas LNE y LAM para un flujo sin fricción en un conducto. Los tubos piezométricos de las secciones 1 y 2 miden la carga de la presión estática $z + p/\gamma$ y por tanto la LAM. Los tubos de pitot de presión de remanso miden la altura total $z + p/\gamma + V^2/(2g)$, que corresponde a la LNE. En este caso particular, la LNE es constante y la LAM asciende debido a una disminución de la velocidad. En condiciones más generales de flujo, la LNE disminuiría lentamente como consecuencia de las pérdidas por fricción y descendería bruscamente por pérdidas localizadas (una válvula u obstrucción) o debido a la extracción de trabajo (en una turbina). La LNE sólo puede ascender si se comunica trabajo (como en una bomba o hélice). La LAM sigue el comportamiento de la LNE respecto a pérdidas y trabajo motor y asciende o descende al disminuir o aumentar la velocidad, respectivamente.

Como se ha mencionado anteriormente, para los cálculos con la ecuación de Bernoulli no se necesitan factores de conversión si se utilizan unidades del SI o del sistema británico consistentes, como se mostrará en los siguientes ejemplos.

En todos los problemas de tipo Bernoulli de este libro tomaremos el punto 1 aguas arriba y el 2 aguas abajo.

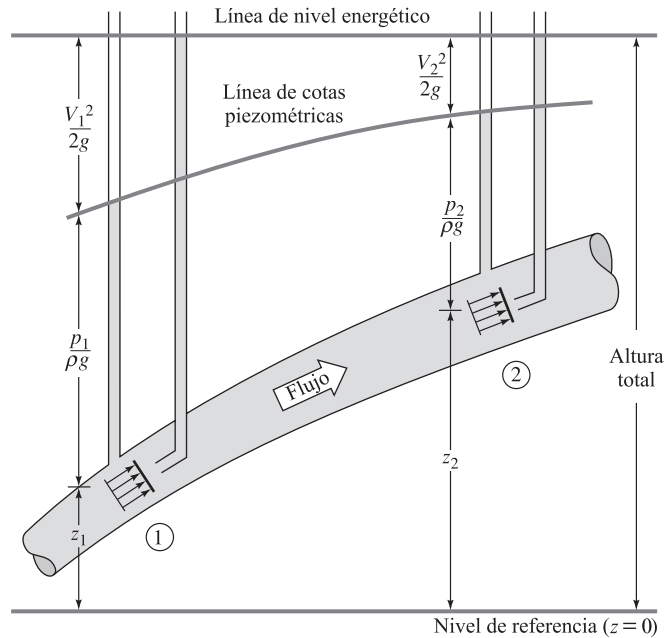
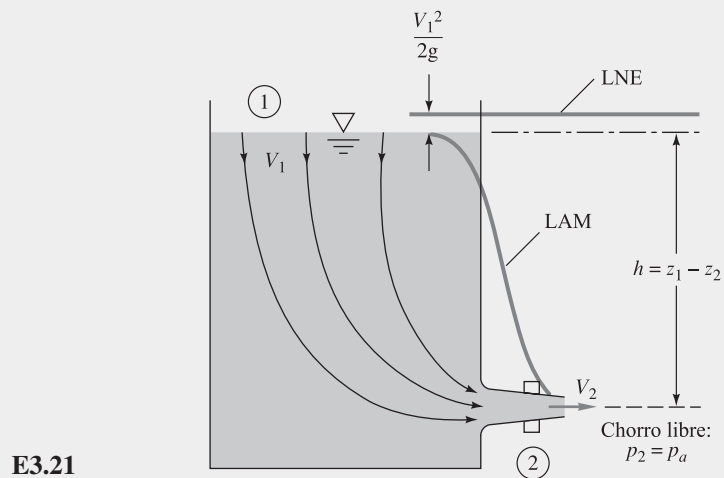


Figura 3.16. Línea de nivel de energía y línea de altura motriz para flujo sin fricción en un conducto.

EJEMPLO 3.21

Obtenga una relación entre la velocidad de descarga V_2 y la altura de la superficie libre h de la Figura E3.21. Suponga flujo estacionario sin fricción.



E3.21

Solución

Como se mencionó, tomaremos el punto 1 aguas arriba y el punto 2 aguas abajo. En general, tomaremos 1 y 2 donde tengamos o deseemos más información. Aquí tomaremos 1 en la

superficie libre del depósito, donde la altura y la presión son conocidas, y el punto 2 en la salida de la tobera, donde también son conocidas la presión y la altura. Las dos incógnitas son V_1 y V_2 .

La conservación de la masa es vital en este tipo de análisis. Si A_1 es la sección transversal del depósito y A_2 la de la tobera de salida, y tenemos un flujo aproximadamente unidimensional con densidad constante, la Ecuación (3.30) nos dice que

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (1)$$

La ecuación de Bernoulli (3.77) da

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 + g z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2 + g z_2$$

Pero como en ambas secciones 1 y 2 la presión es la atmosférica $p_1 = p_2 = p_a$, los términos de presión se cancelan, quedando

$$V_2^2 - V_1^2 = 2g(z_1 - z_2) = 2gh \quad (2)$$

Eliminando V_1 entre las Ecuaciones (1) y (2), obtenemos el resultado deseado:

$$V_2^2 = \frac{2gh}{1 - A_2^2/A_1^2} \quad (3)$$

Generalmente, el área de la tobera A_2 es mucho menor que el área del depósito A_1 , de modo que el cociente A_2^2/A_1^2 es doblemente despreciable, y podemos utilizar esta aproximación fiable para la velocidad de salida:

$$V_2 \approx (2gh)^{1/2} \quad \text{Resp. (4)}$$

Esta fórmula, descubierta por Evangelista Torricelli en 1644, indica que la velocidad de descarga es igual a la velocidad que alcanzaría una partícula cayendo libremente, sin fricción, de 1 a 2. En otras palabras, la energía potencial de la superficie libre se convierte íntegramente en energía cinética del chorro, lo cual es consistente con haber despreciado la fricción y con el hecho de que las fuerzas de presión no realizan trabajo. Nótese que la Ecuación (4) es independiente de la densidad del fluido, característica de los flujos producidos por la gravedad.

Fuera de las capas límite de las paredes, todas las líneas que van de 1 a 2 se comportan de la misma forma, y podemos suponer que la constante de Bernoulli h_0 es la misma para todo el flujo central. Sin embargo, es probable que el flujo en la salida sea no uniforme, no unidimensional, de modo que la velocidad media es sólo aproximadamente igual al resultado de Torricelli. El ingeniero debe ajustar la fórmula incluyendo un *coeficiente de descarga* c_d adimensional:

$$(V_2)_{\text{med}} = \frac{Q}{A_2} = c_d (2gh)^{1/2} \quad (5)$$

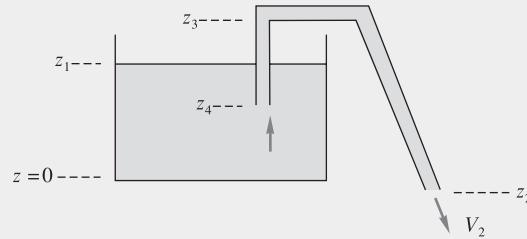
Como se verá en la Sección 6.12, el coeficiente de descarga de una tobera varía de 0.6 a 1.0, en función de las condiciones (adimensionales) del flujo y de la geometría de la misma.

Antes de seguir con más ejemplos, hagamos notar que la ecuación de Bernoulli (3.77) *no* necesita un análisis de volúmenes de control, sino simplemente seleccionar los puntos 1 y 2 a lo largo de una línea de corriente. El volumen de control fue utilizado para obtener una ecuación diferencial (3.75), cuya forma integrada (3.77) es válida a lo largo de líneas de corriente para flujo sin fricción ni adición de calor o trabajo, y por ello no se necesita ningún volumen de control.

Una aplicación clásica de la ecuación de Bernoulli es el trasiego de fluido de un recipiente a otro mediante un sifón. La fuerza motriz es producida por la diferencia de presión hidrostática, sin utilizar ninguna bomba. Lo analizamos en el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 3.22

Considere el sifón mostrado en la Figura E3.22. Suponiendo que se cumplen las hipótesis que garantizan la validez de la ecuación de Bernoulli, (a) encuentre una expresión para la velocidad V_2 a la salida del tubo del sifón. (b) Si el tubo tiene 1 cm de diámetro y $z_1 = 60$ cm, $z_2 = -25$ cm, $z_3 = 90$ cm, y $z_4 = 35$ cm, estime el caudal en cm^3/s .



E3.22

Solución

- *Consideraciones:* Flujo sin fricción, estacionario, incompresible. Escribamos la ecuación de Bernoulli empezando por el punto donde la información se conoce (superficie z_1) hasta el punto donde se desea la información (salida del tubo, z_2).

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

Observe que la velocidad es aproximadamente cero en z_1 , y la línea de corriente va de z_1 a z_2 . Fíjese además que p_1 y p_2 son ambas la presión atmosférica, $p = p_{\text{atm}}$ y se cancelan. (a) Entonces, la velocidad de salida del tubo queda:

$$V_2 = \sqrt{2g(z_1 - z_2)} \quad \text{Resp. (a)}$$

Se puede ver que cuanto más abajo se sitúe la salida del tubo con respecto al nivel de la superficie del depósito, mayor será la velocidad de salida. El *efecto sifón* no se produce si la salida está a un nivel igual o superior a la superficie del tanque. Aunque las cotas z_3 y z_4 no entran en el análisis, z_3 no debe ser demasiado grande, ya que la presión podría decrecer hasta alcanzar la presión de vapor del líquido. (b) Para los valores numéricos dados (sólo necesitamos z_1 y z_2), empleando unidades SI, se tiene:

$$V_2 = \sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)[0.6 \text{ m} - (-0.25) \text{ m}]} = 4.08 \text{ m/s}$$

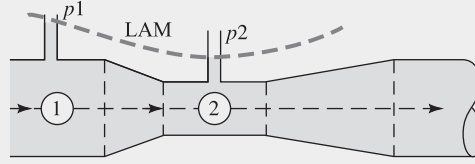
$$Q = V_2 A_2 = (4.08 \text{ m/s})(\pi/4)(0.01 \text{ m})^2 = 321 \text{ E} - 6 \text{ m}^3/\text{s} = 321 \text{ cm}^3/\text{s} \quad \text{Resp. (b)}$$

- *Comentarios:* Observe que el resultado es independiente de la densidad del fluido. Como ejercicio, compruebe que para agua (998 kg/m^3), p_3 es 11,300 Pa *por debajo* de la presión atmosférica.

En el Capítulo 6 se modificará este ejemplo para incluir efectos de fricción.

EJEMPLO 3.23

Un estrechamiento en un conducto produce un aumento de la velocidad y una disminución de presión en la garganta. La disminución de presión da una medida del caudal o flujo volumétrico en el conducto. El sistema de la Figura E3.23, que presenta variaciones suaves, se denomina *tubo venturi*. Halle una expresión que relacione el flujo másico con la disminución de presión.

E3.23**Solución**

Supongamos aplicable la ecuación de Bernoulli en el centro del conducto:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2 + gz_2$$

Si el tubo es horizontal, $z_1 = z_2$ y podemos despejar V_2 :

$$V_2^2 - V_1^2 = \frac{2 \Delta p}{\rho} \quad \Delta p = p_1 - p_2 \quad (1)$$

La ecuación de continuidad nos permite relacionar las velocidades:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$\text{o} \quad V_1 = \beta^2 V_2 \quad \beta = \frac{D_2}{D_1} \quad (2)$$

Combinando (1) y (2) obtenemos la fórmula para la velocidad en la garganta:

$$V_2 = \left[\frac{2 \Delta p}{\rho(1 - \beta^4)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

El flujo másico viene dado por

$$\dot{m} = \rho A_2 V_2 = A_2 \left(\frac{2 \rho \Delta p}{1 - \beta^4} \right)^{1/2} \quad (4)$$

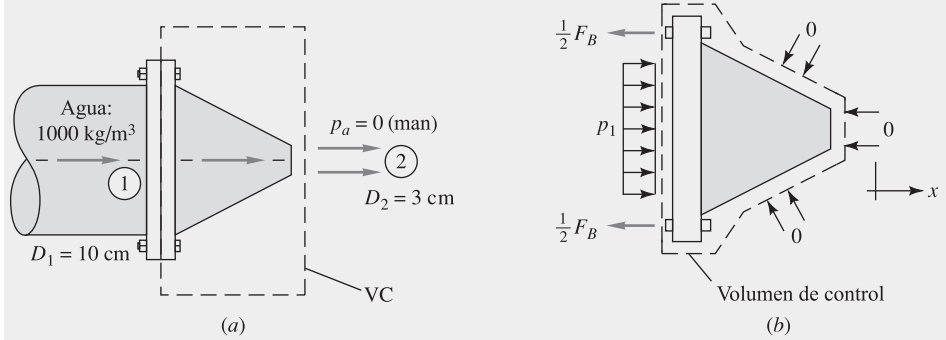
Este es el flujo másico ideal sin fricción. En la práctica, $\dot{m}_{\text{real}} = c_d \dot{m}_{\text{ideal}}$, y se correla el coeficiente de descarga c_d .

EJEMPLO 3.24

Una manguera de 10 cm de diámetro tiene una tobera de 3 cm por donde se descargan $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$. Suponiendo flujo sin fricción, halle la fuerza F_B que se ejerce sobre los tornillos que sujetan la tobera a la manguera.

Solución

Utilizamos las ecuaciones de Bernoulli y continuidad para hallar el valor de p_1 aguas arriba de la tobera, y entonces, mediante la ecuación de la cantidad de movimiento aplicada a un volumen de control, calculamos la fuerza según se muestra en la Figura E3.24.

**E3.24**

El flujo entre 1 y 2 es un estrechamiento semejante al efecto venturi del Ejemplo 3.23, cuya expresión era

$$p_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho(V_2^2 - V_1^2) \quad (1)$$

Las velocidades se determinan a partir del caudal $Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{min}$ o $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$:

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{0.025 \text{ m}^3/\text{s}}{(\pi/4)(0.03 \text{ m})^2} = 35.4 \text{ m/s}$$

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0.025 \text{ m}^3/\text{s}}{(\pi/4)(0.1 \text{ m})^2} = 3.2 \text{ m/s}$$

Pondremos $p_2 = p_a = 0$ de presión manométrica. La expresión (1) queda:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{1}{2}(1000 \text{ kg/m}^3)[(35.4^2 - 3.2^2)\text{m}^2/\text{s}^2] \\ &= 620,000 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2) = 620,000 \text{ Pa manométrica} \end{aligned}$$

El equilibrio de fuerzas en el volumen de control se muestra en la Figura E3.24b:

$$\sum F_x = -F_B + p_1A_1$$

donde la presión manométrica nula sobre todas las caras no da resultante. El flujo de cantidad de movimiento en dirección x es $\dot{m}V_2$ en la salida y $-\dot{m}V_1$ en la entrada. La relación (3.40) para un flujo estacionario nos proporciona:

$$-F_B + p_1A_1 = \dot{m}(V_2 - V_1)$$

o

$$F_B = p_1A_1 - \dot{m}(V_2 - V_1) \quad (2)$$

Sustituyendo con los valores numéricos dados, tenemos:

$$\dot{m} = \rho Q = (1000 \text{ kg/m}^3)(0.025 \text{ m}^3/\text{s}) = 25 \text{ kg/s}$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4}D_1^2 = \frac{\pi}{4}(0.1 \text{ m})^2 = 0.00785 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} F_B &= (620,000 \text{ N/m}^2)(0.00785 \text{ m}^2) - (25 \text{ kg/s})[(35.4 - 3.2)\text{m/s}] \\ &= 4872 \text{ N} - 805 (\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}^2 = 4067 \text{ N} (915 \text{ lbf}) \end{aligned}$$

Resp.

Nótese de los ejemplos anteriores que la solución de cualquier problema con la ecuación de Bernoulli casi siempre requiere considerar la ecuación de continuidad para poder completar el análisis. La única excepción es cuando se conoce completamente la distribución de velocidades por medio de un análisis previo, lo cual significa que la ecuación de continuidad ya se ha utilizado para obtener esa información. Puntualizando, la ecuación de continuidad es siempre esencial en el análisis de los flujos.

Resumen

En este capítulo se han analizado las cuatro ecuaciones básicas de la Mecánica de Fluidos: conservación de (1) masa, (2) cantidad de movimiento, (3) momento cinético y (4) energía. Las ecuaciones se formularon “a gran escala”, es decir, aplicándolas a regiones completas del flujo. De este modo, un análisis típico incluye una aproximación del campo fluido en el interior de la región y proporciona resultados cuantitativos algo burdos pero siempre instructivos. Sin embargo, las ecuaciones básicas aplicadas a volúmenes de control son rigurosas y correctas y darán resultados exactos si se conoce bien el campo fluido.

Hay dos aspectos principales en el análisis de volúmenes de control. El primero es la selección de un volumen de control adecuado, ingenioso y manejable. La experiencia es insustituible, aunque se pueden inferir las siguientes directrices: el volumen de control debería cortar por donde se pide la información. También debería cortar por donde se dispone de la máxima información. Si se utiliza la ecuación de cantidad de movimiento, *no* debe estar limitado por paredes fijas a menos que sea absolutamente necesario, ya que esto haría aparecer esfuerzos, fuerzas y momentos desconocidos que dificultarían o imposibilitarían la obtención de la solución. Finalmente, se debe intentar trabajar en un sistema de referencia en el cual el flujo sea estacionario o casi estacionario, ya que la formulación correspondiente es mucho más sencilla.

El segundo aspecto a destacar es cómo puede reducirse el problema real a otro que se pueda abordar con el análisis de volúmenes de control. Los 24 ejemplos de este capítulo sólo dan una introducción para buscar las aproximaciones apropiadas. Es necesario resolver muchos más ejemplos para llegar a tener la experiencia suficiente para saber simplificar un problema sin pasarse. Mientras tanto, es bueno que el principiante trabaje con la forma general de las ecuaciones y haga las simplificaciones que le permitan llegar al resultado. Al comenzar con la forma general, uno puede plantearse las siguientes cuestiones:

1. ¿Es el volumen de control indeformable o no acelerado?
2. ¿Es el flujo estacionario? ¿Podemos emplear un sistema de referencia estacionario?
3. ¿Se puede despreciar la fricción?
4. ¿Es incompresible el fluido? En caso contrario, ¿se puede aplicar la ecuación de los gases perfectos?
5. ¿Son despreciables las fuerzas gravitatorias y otras fuerzas volumétricas?
6. ¿Hay transferencia de calor, trabajo de partes móviles o trabajo de esfuerzos viscosos?
7. Las entradas y salidas, ¿son aproximadamente unidimensionales?
8. ¿Es importante en el análisis la presión atmosférica? En algún punto de la superficie de control, ¿la distribución de presiones es hidrostática?
9. Las condiciones en el depósito, ¿cambian lo suficientemente despacio como para suponer que la velocidad en él y su derivada temporal son despreciables?

De esta forma, aceptando o rechazando simplificaciones básicas como éstas, se puede, por ejemplo, distinguir cuándo es aplicable la ecuación de Bernoulli y cuándo no.

Problemas

La mayoría de los problemas propuestos aquí son bastante sencillos. Los más difíciles, o de final abierto, se indican con un asterisco. Para resolver los problemas señalados con un icono EES (por ejemplo, el Problema P3.5) se recomienda el uso del Resolvedor de Ecuaciones de Ingeniería (EES, *Engineering Equation Solver*), mientras que los problemas señalados con un disquete pueden requerir el uso de un ordenador. Los problemas estándar de final de capítulo P3.1 al P3.185 (ordenados por temas en la lista de abajo) están seguidos por los problemas conceptuales C3.1 a C3.7; los problemas del examen de fundamentos de ingeniería (FE, *Fundamentals of Engineering*) FE3.1 a FE3.10; los problemas extensos PE3.1 a PE3.5, y el proyecto de diseño D3.1.

Distribución de los problemas

Sección	Tema	Problema
3.1	Leyes básicas de la física; flujo volumétrico	P3.1-P3.6
3.2	El teorema de transporte de Reynolds	P3.7-P3.11
3.3	Conservación de la masa	P3.12-P3.38
3.4	La ecuación de la cantidad de movimiento	P3.39-P3.109
3.5	La ecuación del momento cinético	P3.110-P3.125
3.6	La ecuación de la energía	P3.126-P3.146
3.7	La ecuación de Bernoulli	P3.147-P3.185

P3.1 Discuta la segunda ley de Newton (conservación de la cantidad de movimiento) en estas tres formas:

$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad \sum \mathbf{F} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{V})$$

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d}{dt} \left(\int_{\text{sistema}} \mathbf{V} \rho d^3V \right)$$

¿Son las tres igualmente válidas? ¿Son equivalentes? ¿Es alguna de ellas mejor para la mecánica de fluidos que para la mecánica de sólidos?

P3.2 Considere la conservación del momento cinético en la forma

$$\sum \mathbf{M}_O = \frac{d}{dt} \left[\int_{\text{sistema}} (\mathbf{r} \times \mathbf{V}) \rho d^3V \right]$$

¿Qué representa \mathbf{r} en esta relación? ¿Es válida esta relación tanto para la mecánica de sólidos como para la mecánica de fluidos? ¿Está relacionada con la ecuación de *cantidad de movimiento* (Problema P3.1)? ¿De qué forma?

P3.3 Para el flujo estacionario en un conducto largo a bajo número de Reynolds (laminar) (véase Problema P1.12), la velocidad longitudinal está dada por $u = C(R^2 - r^2)$, donde R es el radio del conducto y $r \leq R$. Integre $u(r)$ y obtenga el caudal Q que fluye a través del conducto.

P3.4 Por una manguera de incendios de 5 cm de diámetro fluye un caudal de agua de 600 gal/min. El flujo sale por una tobera de diámetro D_f . Si la velocidad de salida es 25 m/s, calcule D_f , en pulgadas.

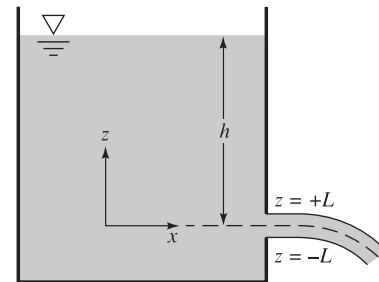
***P3.5** Una teoría propuesta por S. I. Pai en 1953 da los siguientes valores de la velocidad $u(r)$ para el flujo de aire tur-

bulento (a gran número de Reynolds) en un conducto de 4 cm de diámetro:

r , cm	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
u , m/s	6.00	5.97	5.88	5.72	5.51	5.23	4.89	4.43	0.00

Comente estos datos comparándolos con los del flujo laminar del Problema P3.3. Estime, con la mayor precisión posible, el caudal Q a través del tubo en metros cúbicos por segundo.

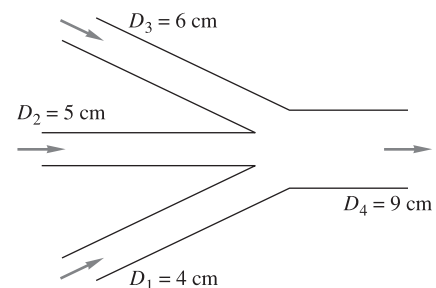
P3.6 Cuando un chorro de líquido escapa por el orificio de un depósito impulsado sólo por la fuerza de la gravedad, como el de la Figura P3.6, la distribución de velocidad en la salida se puede aproximar por $u \approx \sqrt{2g(h-z)}$, donde h es la profundidad a la que se encuentra el centro del chorro. Cerca del orificio, el chorro es horizontal, bidimensional y de espesor $2L$, como se muestra en la figura. Obtenga una expresión general para el caudal total Q que sale por el orificio y simplifique el resultado en el límite $L \ll h$.



P3.6

P3.7 Un tanque esférico, de 35 cm de diámetro, pierde aire a través de un orificio de 5 mm de diámetro. El aire sale del agujero a 360 m/s con una densidad de 2.5 kg/m³. Suponiendo que la mezcla es uniforme, (a) encuentre una fórmula para la variación de la densidad media en el tanque y (b) calcule el valor numérico de (dp/dt) para los datos dados.

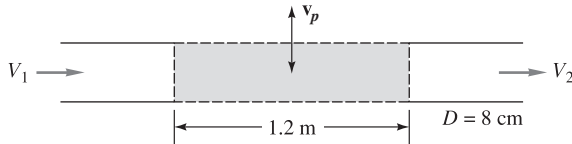
P3.8 En la Figura P3.8, tres conductos descargan agua a 20 °C de forma estacionaria a un gran conducto de salida. La velocidad $V_2 = 5$ m/s y el caudal de salida $Q_4 = 120$ m³/h. Calcule (a) V_1 , (b) V_3 y (c) V_4 , si se sabe que al aumentar Q_3 en un 20%, Q_4 se incrementa en un 10%.



P3.8

P3.9 En un laboratorio se dispone de un depósito que contiene agua salada de salinidad S y densidad ρ . El agua entra en el depósito a las condiciones (S_1, ρ_1, A_1, V_1) y se mezcla inmediatamente con el agua que ya está en él. El agua sale del depósito con una velocidad V_2 a través de un orificio de sección A_2 . Si la sal es una propiedad “que se conserva” (ni se crea ni se destruye), use el teorema del transporte de Reynolds para encontrar una expresión para la velocidad de variación de la masa de sal M_{sal} del depósito.

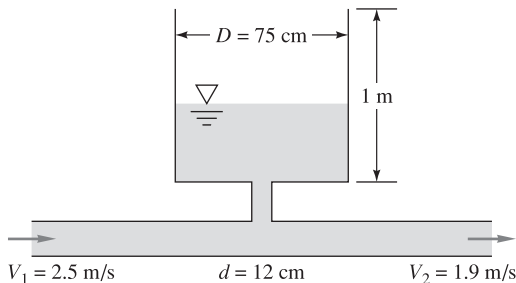
P3.10 En la Figura P3.10 se presenta agua fluyendo a través de un conducto de 8 cm de diámetro que entra en una sección porosa. Esta sección permite una velocidad radial uniforme v_p a través de las superficies de la pared durante una longitud de 1.2 m. Si la velocidad media en la entrada V_1 es 12 m/s, determine la velocidad en la salida V_2 si (a) $v_p = 15$ cm/s hacia fuera del conducto o (b) $v_p = 10$ cm/s hacia dentro del conducto. (c) ¿Cuál es el valor de v_p que hace que $V_2 = 9$ m/s?



P3.10

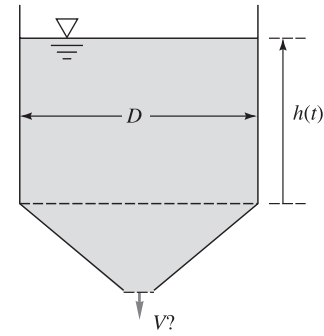
P3.11 Una habitación contiene polvo con una concentración uniforme $C = \rho_{\text{polvo}}/\rho$. La habitación se quiere limpiar introduciendo aire fresco con velocidad V_i a través de un conducto de área A_i sobre una pared y extrayendo el aire de la habitación a una velocidad V_o a través de conducto de área A_o sobre la pared opuesta. Obtenga una expresión para la velocidad instantánea de cambio de la masa de polvo de la habitación.

P3.12 El flujo de la Figura P3.12 llena el depósito cilíndrico que se muestra. En el instante $t = 0$, la profundidad del agua del depósito es de 30 cm. Estime el tiempo requerido para llenar el resto del depósito.



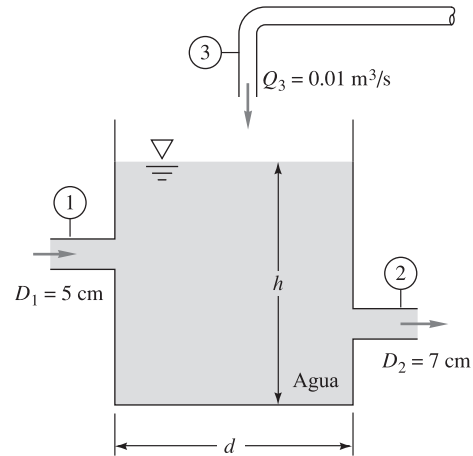
P3.12

P3.13 El recipiente cilíndrico de la Figura P3.13, de 20 cm de diámetro, tiene en su parte inferior una contracción cónica que finaliza en un orificio de 3 cm de diámetro. Contiene agua fresca en condiciones estándar a nivel del mar. Estime la velocidad media de salida por el orificio, sabiendo que el nivel del agua disminuye a razón de $dh/dt \approx -0.072$ m/s.



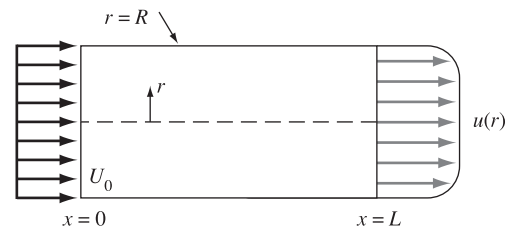
P3.13

P3.14 El depósito abierto de la Figura P3.14 contiene agua a 20 °C y se está rellendo a través de la sección 1. Suponiendo flujo incompresible, obtenga una expresión analítica para el cambio de nivel del agua dh/dt en función de los flujos volumétricos (Q_1, Q_2, Q_3) y el diámetro del depósito d . Hecho esto, si el nivel del agua h es constante, determine la velocidad de salida V_2 , dados los datos $V_1 = 3$ m/s y $Q_3 = 0.01$ m³/s.



P3.14

P3.15 En la Figura P3.15 se presenta agua, considerada incompresible, fluyendo de forma estacionaria en un conducto de sección circular. La velocidad en la entrada es constante, $u = U_0$, y la velocidad en la salida se aproxima por la de un flujo turbulento, $u = u_{\text{máx}}(1 - r/R)^{1/7}$. Determine la relación $U_0/u_{\text{máx}}$ de este flujo.

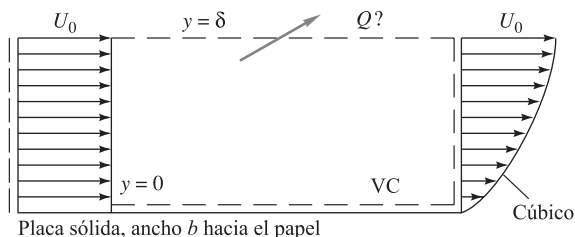


P3.15

- P3.16** Un fluido incompresible pasa sobre una placa plana impermeable como se muestra en la Figura P3.16, entrando con un perfil de velocidades uniforme $u = U_0$ y saliendo con un perfil polinómico:

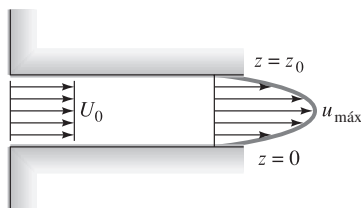
$$u \approx U_0 \left(\frac{3\eta - \eta^3}{2} \right) \text{ donde } \eta = \frac{y}{\delta}$$

Calcule el caudal que atraviesa la superficie superior del volumen de control.



P3.16

- P3.17** El flujo compresible y estacionario entre dos placas paralelas de la Figura P3.17 es uniforme, $u = U_0 = 8 \text{ cm/s}$, mientras que aguas abajo el flujo pasa a tener el perfil laminar parabólico $u = az(z_0 - z)$, donde a es constante. Si $z_0 = 4 \text{ cm}$ y el fluido es aceite SAE 30 a 20°C , ¿cuál es el valor de $u_{\text{máx}}$ en cm/s ?



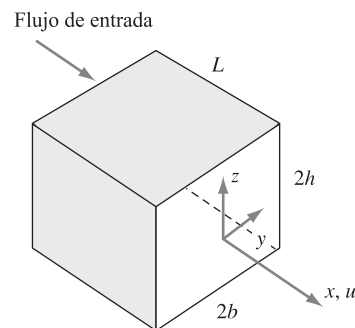
P3.17

- P3.18** Un fluido incompresible se mueve de forma estacionaria a través del conducto de sección rectangular de la Figura P3.18. El perfil de velocidades está dado aproximadamente por

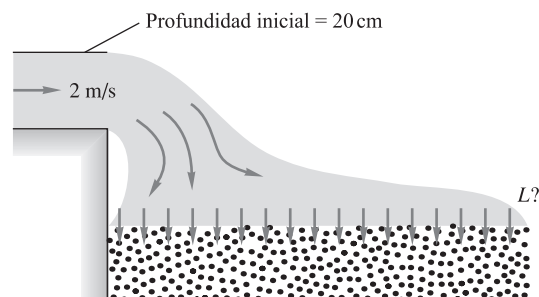
$$u = u_{\text{máx}} \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right) \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right)$$

(a) ¿Satisface este perfil las condiciones de contorno correspondientes a un fluido viscoso? (b) Encuentre una expresión analítica para el caudal en la salida. (c) Si el gasto en la entrada es de $300 \text{ ft}^3/\text{min}$, estime $u_{\text{máx}}$ en metros por segundo para $b = h = 10 \text{ cm}$.

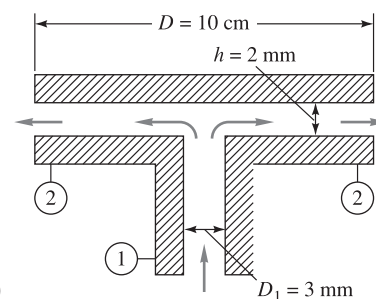
- P3.19** El agua de una tormenta fluye hasta caer sobre un lecho poroso que absorbe el agua a una velocidad vertical uniforme de 8 mm/s , como se muestra en la Figura P3.19. El sistema tiene una anchura de 5 m . Determine la longitud L del lecho que se requiere para absorber completamente el agua de la tormenta.



P3.18



P3.19

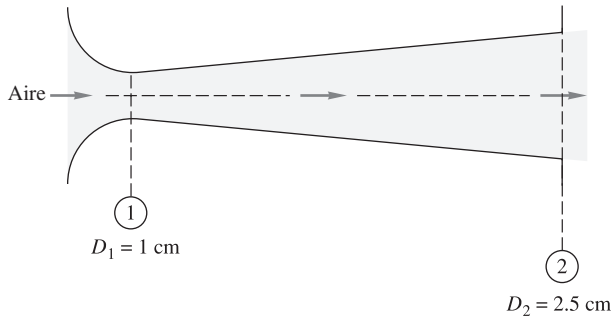


P3.20

- P3.20** En la Figura P3.20 se presenta un flujo de aceite ($\rho_r = 0.89$) que entra a través de la sección 1 con un flujo de 250 N/h para lubricar un cojinete de empuje. El aceite fluye radialmente de forma estacionaria hacia el estrecho hueco que hay entre las dos placas. Calcule (a) el caudal de salida en mililitros por segundo y (b) la velocidad media de salida en centímetros por segundo.

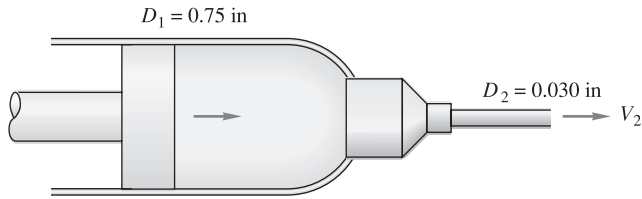
- P3.21** Modifique el Problema P3.16 de la manera siguiente: Considere una placa de longitud $L = 125\delta$ desde la entrada hasta la salida. La placa es porosa y aspira fluido desde la capa límite con velocidad uniforme de succión v_p . (a) Calcule Q a través de la superficie superior si $v_p = 0.002U_0$. (b) Encuentre la relación v_p/U_0 para la cual Q es cero.

- P3.22** La tobera convergente-divergente de la Figura P3.22 expande y acelera aire seco hasta hacerle alcanzar velocidades supersónicas en la salida, donde $p_2 = 8 \text{ kPa}$ y $T_2 = 240 \text{ K}$. En la garganta, $p_1 = 284 \text{ kPa}$, $T_1 = 665 \text{ K}$ y $V_1 = 517 \text{ m/s}$. Suponiendo flujo estacionario y compresible de un gas ideal, estime (a) el gasto másico en kilogramos por hora, (b) la velocidad V_2 y (c) el número de Mach.



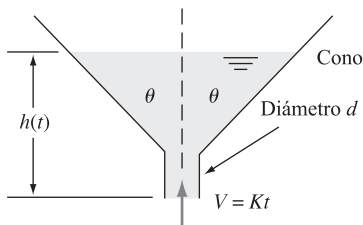
P3.22

P3.23 La aguja hipodérmica de la Figura P3.23 contiene suero ($\rho_r = 1.05$). Si se tiene que inyectar este suero de forma estacionaria a $6 \text{ cm}^3/\text{s}$, ¿a qué velocidad en pulgadas por segundo debe avanzarse el émbolo (a) si se desprecian las pérdidas en la aguja y (b) si hay una pérdida del 10% en el flujo en la aguja?



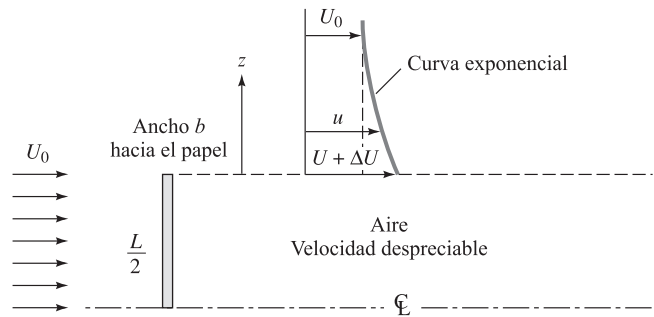
P3.23

***P3.24** En el cono de la Figura P3.24 está entrando agua con una velocidad media que aumenta linealmente con el tiempo $V = Kt$. Si d es muy pequeño, obtenga una fórmula analítica para la altura de agua $h(t)$ con las condiciones iniciales $h = 0$ en $t = 0$. Suponga flujo incompresible.



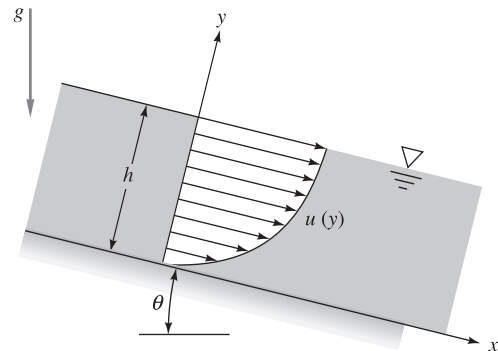
P3.24

P3.25 Según se tratará en los Capítulos 7 y 8, el flujo de una corriente uniforme U_0 perpendicular a una placa plana crea tras ella una estela de baja velocidad. En la Figura P3.25 se presenta un modelo simple en el que, por simetría, sólo aparece la mitad del flujo. El perfil de velocidades tras la placa se idealiza como una zona “muerta” (con velocidad casi nula) más una zona con velocidad superior a la incidente que decae verticalmente según la ley $u \approx U_0 + \Delta U e^{-z/L}$, donde L es la altura de la placa y $z = 0$ es la parte superior de la estela. Determine ΔU en función de la velocidad de la corriente U_0 .



P3.25

P3.26 En la Figura P3.26, una fina capa de líquido se desliza sobre un plano inclinado con un perfil de velocidades laminar $u \approx U_0(2y/h - y^2/h^2)$, donde U_0 es la velocidad de la superficie. Si el plano tiene una anchura b perpendicular al papel, determine el caudal de la capa de líquido. Suponga que $h = 0.5 \text{ in}$ y que el caudal por cada pie de anchura del canal es 1.25 gal/min . Estime U_0 en pies por segundo.



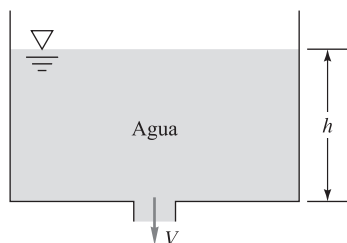
P3.26

P3.27 Considere un depósito de aire a alta presión en condiciones (p_0, ρ_0, T_0) y volumen V_0 . En el Capítulo 9 se verá que si el tanque descarga a la atmósfera a través de una tobera convergente bien diseñada de área de salida A , el flujo másico que sale será

$$\dot{m} = \frac{\alpha p_0 A}{\sqrt{RT_0}} \quad \text{donde } \alpha \approx 0.685 \text{ para aire}$$

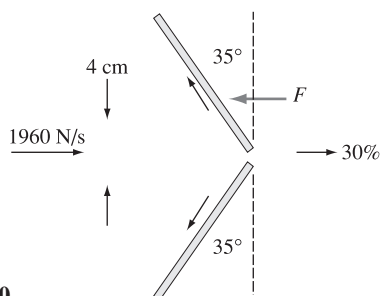
Esta expresión es válida para valores de p_0 superiores a dos veces la presión atmosférica. Suponiendo T_0 constante y gas ideal, (a) obtenga una expresión para la variación de densidad $\rho_0(t)$ en el interior del depósito. (b) Calcule el tiempo Δt para el que la densidad cae un 25%.

P3.28 De acuerdo con el teorema de Torricelli, la velocidad de un fluido que descarga por el orificio de un depósito es $V \approx (2gh)^{1/2}$, donde h es la altura de agua sobre el orificio, como se muestra en la Figura P3.28. Si el orificio tiene una sección A_o y el depósito es cilíndrico con una sección transversal de área $A_b \gg A_o$, obtenga una fórmula para el tiempo que el depósito tardará en vaciarse completamente si la altura inicial de agua es h_o .

**P3.28**

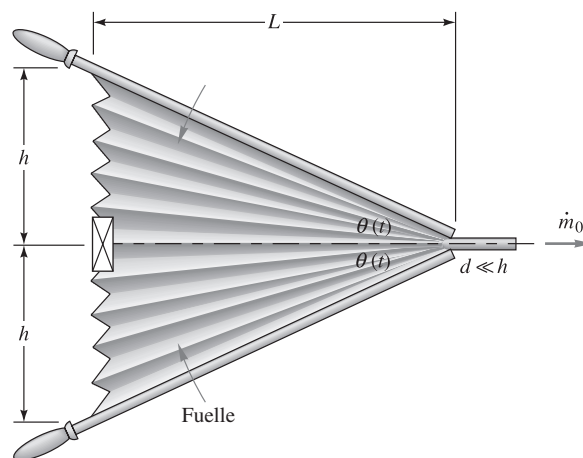
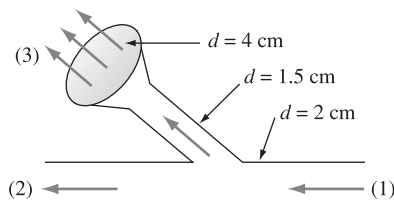
P3.29 En la teoría elemental de flujos compresibles (Capítulo 9), el aire comprimido de un depósito saldrá por un orificio con un gasto másico $\dot{m} \approx C\rho$, donde ρ es la densidad del aire en el depósito y C es una constante. Si ρ_0 es la densidad inicial en un depósito de volumen V , obtenga una fórmula para el cambio de densidad $\rho(t)$ cuando se abre el orificio. Aplique esta fórmula al siguiente caso: un depósito esférico de 50 cm de diámetro, con una presión inicial de 300 kPa y una temperatura de 100 °C, y un orificio cuyo gasto másico inicial de salida es de 0.01 kg/s. Determine el tiempo requerido para que la densidad del depósito se reduzca al 50%.

P3.30 Un chorro de agua estacionario y bidimensional de 4 cm de espesor y flujo en peso de 1960 N/s incide sobre una barrera formada por dos placas en ángulo, como se muestra en la Figura P3.30. La velocidad del agua y la presión son constantes en todas partes. El 30% del caudal pasa a través de la ranura. El resto se reparte simétricamente a lo largo de la barrera. Calcule la fuerza horizontal F necesaria para sostener la barrera por unidad de profundidad perpendicular al papel.

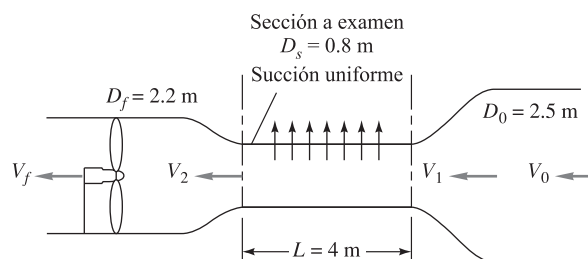
**P3.30**

P3.31 Un fuelle se puede modelar como un volumen deformable con forma de cuña como el de la Figura P3.31. La válvula de la izquierda está cerrada mientras se cierra el fuelle. Si la anchura del sistema es b , obtenga una expresión para el flujo másico \dot{m}_0 como función del ángulo $\theta(t)$.

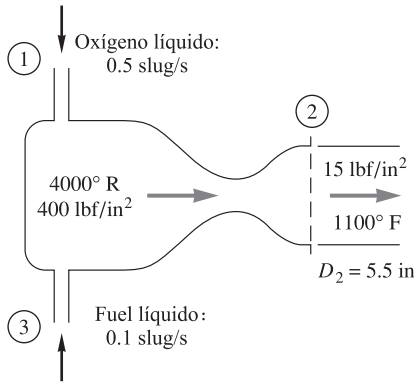
P3.32 En el conjunto de tuberías de la Figura P3.32 fluye agua a 20 °C de forma estacionaria, entrando por la sección 1 a 20 gal/min. La velocidad media en la sección 2 es 2.5 m/s. Parte del flujo se desvía a una ducha que contiene 100 orificios de 1 mm de diámetro cada uno. Suponiendo que el flujo en la ducha es uniforme, estime la velocidad de salida en los chorros de la ducha.

**P3.31****P3.32**

P3.33 En algunos túneles de viento, la sección de ensayos está perforada para succionar el fluido y reducir el espesor de la capa límite viscosa. La pared de la sección de ensayos de la Figura P3.33 contiene 1200 orificios de 5 mm de diámetro por metro cuadrado de pared. La velocidad de succión por cada orificio es $V_s = 8$ m/s y la velocidad de entrada a la sección de ensayos es $V_1 = 35$ m/s. Suponiendo un flujo de aire estacionario e incompresible a 20 °C, calcule (a) V_0 , (b) V_2 y (c) V_f , en metros por segundo.

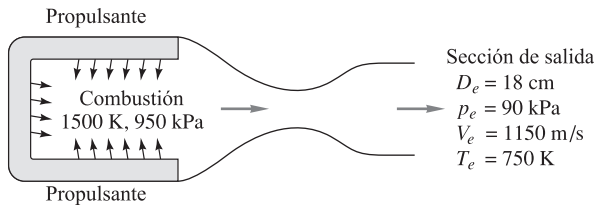
**P3.33**

P3.34 El motor cohete de la Figura P3.34 opera en régimen estacionario. Los productos de la combustión salen por la tobera comportándose aproximadamente como un gas perfecto con un peso molecular de 28. Para las condiciones antes dadas, calcule V_2 en pies por segundo.



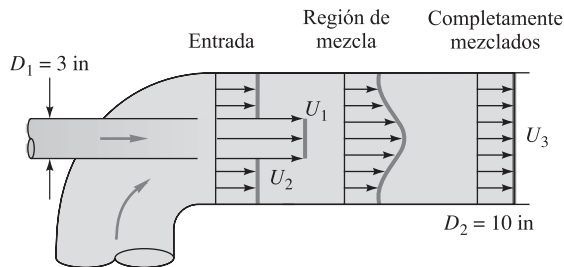
P3.34

P3.35 En contraste con el motor cohete de combustible líquido de la Figura P3.34, el motor cohete de combustible sólido de la Figura P3.35 es autónomo y no tiene conductos de entrada. Usando un análisis de volúmenes de control, calcule, para las condiciones de la Figura P3.35, el ritmo al que disminuye la masa de propulsante suponiendo que el gas de la salida tiene un peso molecular de 28.



P3.35

P3.36 La bomba de chorro de la Figura P3.36 inyecta agua a $U_1 = 40$ m/s a través de un conducto de 3 in y arrastra a un flujo de agua que tiene una velocidad $U_2 = 3$ m/s en la región anular alrededor del chorro. Los dos flujos se mezclan completamente aguas abajo, donde la velocidad U_3 es aproximadamente constante. Calcule U_3 en metros por segundo en un flujo estacionario e incompresible.

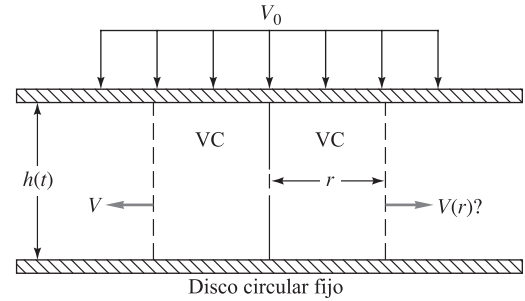


P3.36

P3.37 Un cilindro sólido de acero de 4.5 cm de diámetro y 12 cm de longitud, con una masa de 1500 g, cae de forma concéntrica por un conducto vertical de 5 cm de diámetro que

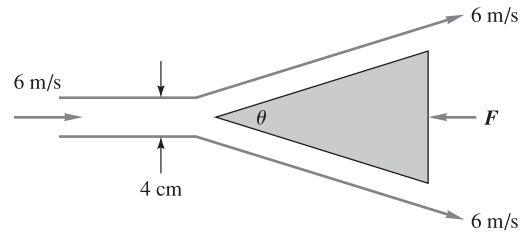
contiene aceite ($\rho_r = 0.89$). Suponiendo que el aceite es incompresible, estime la velocidad media del aceite en el hueco anular entre el cilindro y el conducto (a) relativa al conducto y (b) relativa al cilindro.

P3.38 El fluido incompresible de la Figura P3.38 está siendo aplastado entre dos grandes discos circulares por el movimiento uniforme con velocidad V_0 del disco superior. Suponiendo que el flujo de escape es radial y unidimensional, use el volumen de control mostrado para obtener una expresión para $V(r)$.



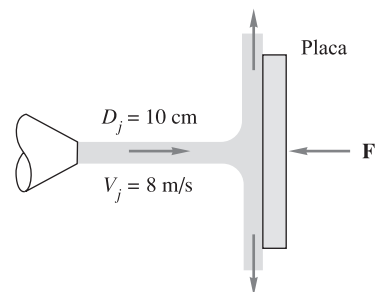
P3.38

P3.39 Una cuña divide una capa de agua a 20 °C, según se muestra en la Figura P3.39. Tanto la cuña como la capa de agua son muy anchas. Si la fuerza requerida para mantener la cuña quieta es $F = 124$ N por metro de anchura, ¿cuál es el ángulo θ de la cuña?



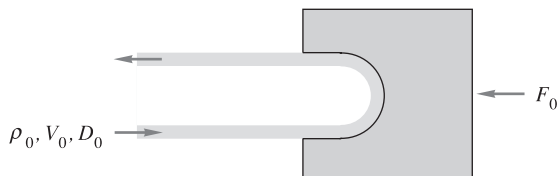
P3.39

P3.40 El chorro de agua de la Figura P3.40 incide perpendicularmente sobre una placa plana. Despreciando los efectos de la gravedad y la fricción, calcule la fuerza F en newtons que se requiere para mantener quieta la placa.



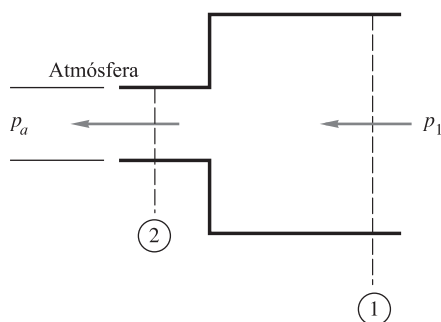
P3.40

- P3.41** El álabe de la Figura P3.41 hace que el chorro de agua dé la vuelta completamente. Obtenga una expresión para la velocidad máxima en el chorro si la máxima fuerza admisible es F_0 .



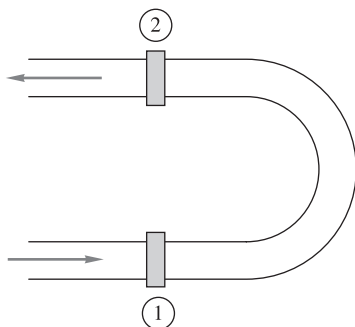
P3.41

- P3.42** Un líquido de densidad ρ fluye a través de la contracción de la Figura P3.42 y sale después a la atmósfera. Suponiendo condiciones uniformes (p_1, V_1, D_1) en la sección 1 y (p_2, V_2, D_2) en la sección 2, encuentre una expresión para la fuerza F que el fluido ejerce en la contracción.



P3.42

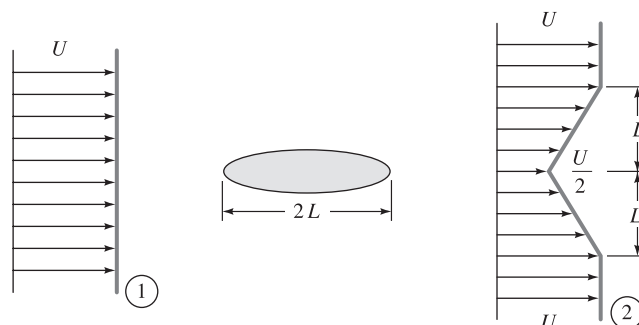
- P3.43** En la Figura P3.43 se presenta el flujo de agua a 20 °C a través de un conducto de 5 cm de diámetro que tiene una curva de 180°. La longitud total del conducto entre las bridas 1 y 2 es de 75 cm. El flujo de peso es de 230 N/s con $p_1 = 165$ kPa y $p_2 = 134$ kPa. Despreciando el peso del conducto, determine la fuerza total que deben soportar las bridas en este flujo.



P3.43

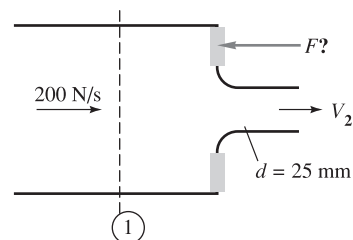
- *P3.44** Cuando una corriente uniforme se mueve alrededor de un cilindro grueso, se crea una amplia estela de baja velocidad que se puede idealizar con un perfil en V como el

de la Figura P3.44. Las presiones p_1 y p_2 son aproximadamente iguales. Si el flujo es bidimensional e incompresible, con una anchura b , obtenga una expresión para la fuerza de resistencia F del cilindro. Reescriba el resultado en la forma de un *coeficiente de resistencia* adimensional basado en la longitud del cuerpo $C_D = F/(\rho U^2 b L)$.



P3.44

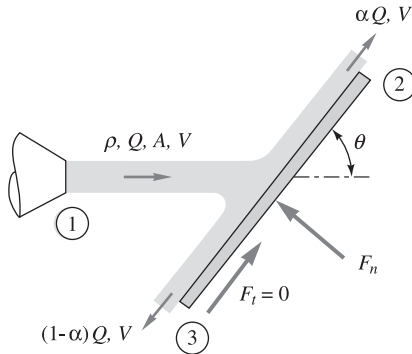
- P3.45** En una tubería de 12 cm de diámetro por la que fluye agua a razón de 200 N/s se coloca una placa de orificio, como se ilustra en la Figura P3.45. El chorro de salida tiene 25 mm de diámetro. La presión en la tubería en la sección 1 es 800 kPa manométrica. Calcule la fuerza F para sostener la placa de orificio.



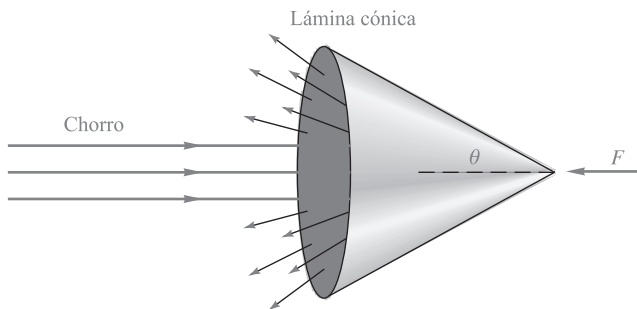
P3.45

- P3.46** Cuando un chorro incide sobre una placa inclinada, como la de la Figura P3.46, se parte en dos chorros 2 y 3 de igual velocidad $V = V_{ch}$ pero con caudales diferentes: αQ en 2 y $(1 - \alpha)Q$ en la sección 3, siendo α la fracción correspondiente. El motivo es que en un flujo sin fricción, el fluido no puede ejercer fuerza tangencial F_t sobre la placa. La condición $F_t = 0$ nos permite obtener α . Realice este análisis y obtenga α como función del ángulo de la placa θ . ¿Por qué la respuesta no depende de las propiedades del flujo?

- P3.47** El chorro líquido de diámetro D_i y velocidad V_i incide sobre el cono hueco en reposo de la Figura P3.47, que lo deflcta hacia atrás como una capa cónica con igual velocidad. Determine el ángulo θ para el que la fuerza sobre el cono sea $F = \frac{3}{2} \rho A_i V_i^2$.

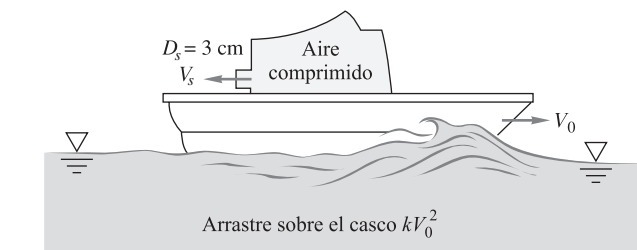


P3.46



P3.47

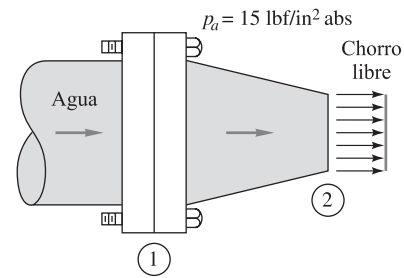
P3.48 El pequeño barco de la Figura P3.48 es impulsado a velocidad V_0 por un chorro de aire comprimido que sale de un orificio de 3 cm de diámetro a una velocidad de $V_s = 343$ m/s. Las condiciones de salida del chorro son $p_s = 1$ atm y $T_s = 30$ °C. La resistencia del aire se considera despreciable y la resistencia del casco es kV_0^2 , donde $k \approx 19$ N · s²/m². Estime la velocidad del barco V_0 en metros por segundo.



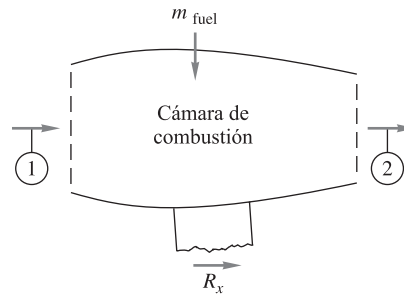
P3.48

P3.49 La tobera horizontal de la Figura P3.49 tiene $D_1 = 12$ in y $D_2 = 6$ in, con una presión en la entrada $p_1 = 38$ lb fin² absoluta y $V_2 = 56$ ft/s. Con agua a 20 °C, calcule la fuerza horizontal que proporcionan los tornillos de la brida de sujeción para mantener fija la tobera.

P3.50 El motor a reacción de un banco de ensayos representado en la Figura P3.50 toma aire a 20 °C y 1 atm por la sección 1, donde $A_1 = 0.5$ m² y $V_1 = 250$ m/s. La relación



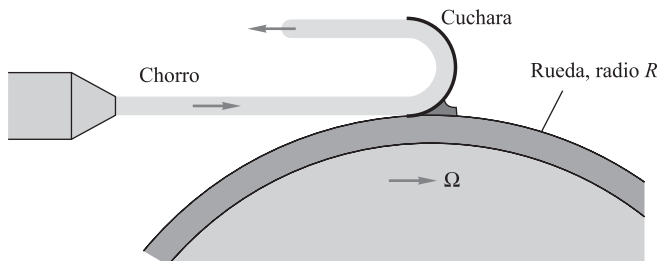
P3.49



P3.50

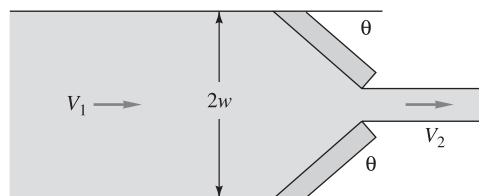
aire combustible es 1:30. El aire abandona la sección 2 a la presión atmosférica y una temperatura superior, donde $V_2 = 900$ m/s y $A_2 = 0.4$ m². Calcule la reacción horizontal R_x en el banco que se requiere para mantener fijo el motor.

P3.51 Un chorro líquido de velocidad V_c y área A_c incide sobre la paleta de 180° del rotor de una turbina que gira a velocidad Ω , como se muestra en la Figura P3.51. Obtenga una expresión para la potencia P producida por la turbina en ese instante como función de los parámetros del sistema. ¿A qué velocidad angular se produce la máxima potencia? ¿Cómo cambiaría el análisis en el caso de disponer de muchas paletas en la turbina, de forma que el chorro siempre incidiera sobre una de ellas?

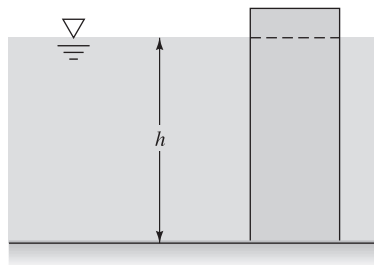


P3.51

P3.52 La puerta vertical de un canal de agua está parcialmente abierta, como se muestra en la Figura P3.52. Suponiendo que no hay cambio en el nivel de agua y una distribución de presión hidrostática, obtenga una expresión para la fuerza horizontal F_x sobre una de las mitades de la compuerta como función de $(\rho, h, w, \theta, V_1)$. Aplique este resultado al caso de agua a 20 °C, $V_1 = 0.8$ m/s, $h = 2$ m, $w = 1.5$ m y $\theta = 50$ °.



Vista superior



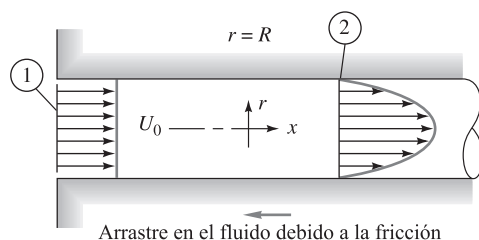
Vista lateral

P3.52

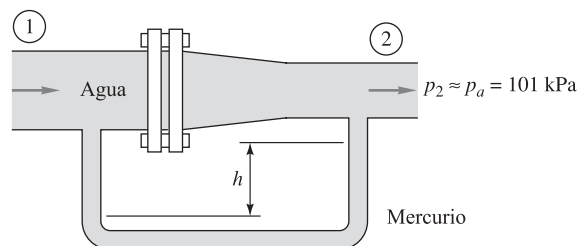
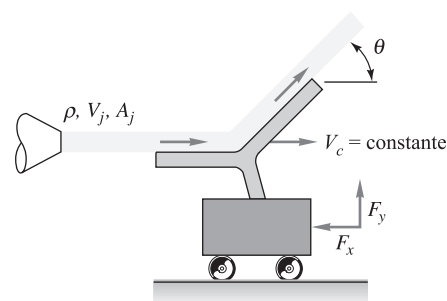
- P3.53** Se considera el flujo incompresible a la entrada del conducto circular de la Figura P3.53. El flujo en la entrada es uniforme $u_1 = U_0$. El flujo en la sección 2 es el flujo completamente desarrollado en un conducto. Determine la fuerza de resistencia F sobre la pared en función de (p_1, p_2, ρ, U_0, R) si el flujo en la sección 2 es

(a) Laminar: $u_2 = u_{\text{máx}} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$

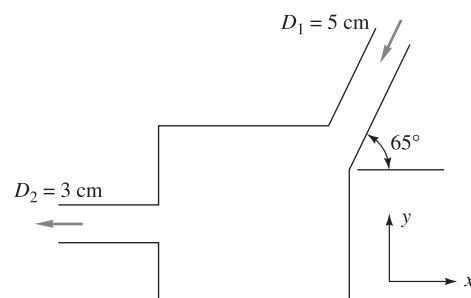
(b) Turbulento: $u_2 \approx u_{\text{máx}} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}$

**P3.53**

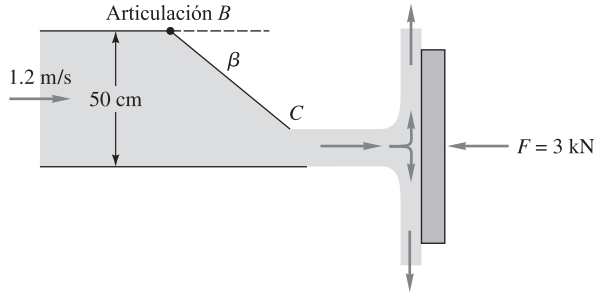
- P3.54** El flujo en el conducto de sección variable de la Figura P3.54 tiene $D_1 = 8$ cm, $D_2 = 5$ cm y $p_2 = 1$ atm. Todos los fluidos se encuentran a 20°C . Si $V_1 = 5$ m/s y la lectura del manómetro es $h = 58$ cm, estime la fuerza total que resisten las bridas.
- P3.55** El chorro de la Figura P3.55 incide sobre un álabe que se mueve hacia la derecha con velocidad constante V_c sobre un carro sin fricción. Calcule (a) la fuerza F_x que se requiere para sujetar el álabe al carro y (b) la potencia P que se le proporciona al carro. Determine también la velocidad del carro para la que (c) la fuerza F_x sea máxima y (d) la potencia P sea máxima.

**P3.54****P3.55**

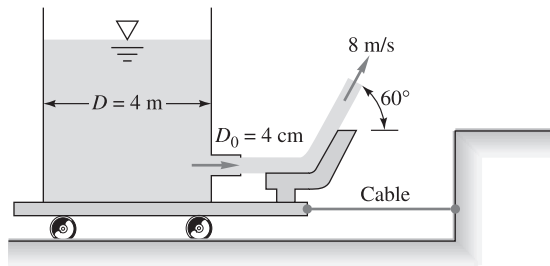
- P3.56** El agua de la Figura P3.56 fluye de forma estacionaria a 20°C a través de la caja representada, entrando por la sección (1) a 2 m/s. Calcule (a) la fuerza horizontal y (b) la fuerza vertical que se requiere para mantener quieta la caja.

**P3.56**

- P3.57** En la Figura P3.57 se representa agua moviéndose a través de un conducto de 50 cm de alto y 1 m de ancho. La compuerta BC cierra completamente el conducto cuando $\beta = 90^\circ$. Suponiendo flujo unidimensional, ¿cuál es el ángulo β que hará que la fuerza del chorro de salida sobre la placa sea de 3 kN?
- P3.58** El depósito de agua de la P3.58 está colocado sobre un carro sin fricción y alimenta un chorro de 4 cm de diámetro con una velocidad de 8 m/s que se deflecta 60° por medio de un álabe. Calcule la tensión en el cable.



P3.57

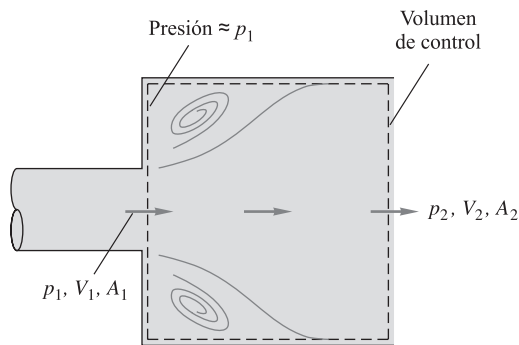


P3.58

P3.59 Cuando el flujo en un conducto se expande súbitamente de A_1 a A_2 , como se indica en la Figura P3.59, aparecen torbellinos de baja velocidad y baja fricción en las esquinas y el flujo se expande de forma gradual hasta A_2 aguas abajo. Empleando el volumen de control sugerido para flujo estacionario y suponiendo que $p \approx p_1$ en la esquina anular, como se muestra, demuestre que la presión aguas abajo está dada por

$$p_2 = p_1 + \rho V_1^2 \frac{A_1}{A_2} \left(1 - \frac{A_1}{A_2} \right)$$

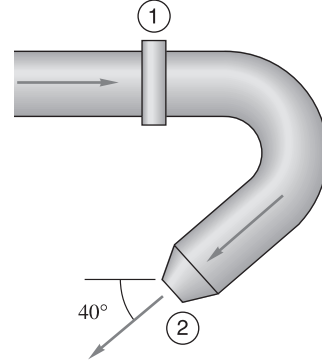
Desprecie la fricción en la pared.



P3.59

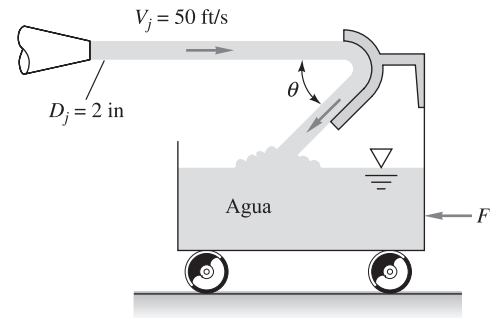
P3.60 Por el codo de la Figura P3.60 fluye agua a 20 °C que se descarga a la atmósfera. El diámetro del conducto es $D_1 = 10$ cm, mientras que $D_2 = 3$ cm. Cuando el flujo es de 150 N/s, la presión $p_1 = 2.3$ atm (manométrica), y

despreciando el peso del agua y del codo, estime la fuerza sobre los tornillos de la abrazadera de la sección 1.



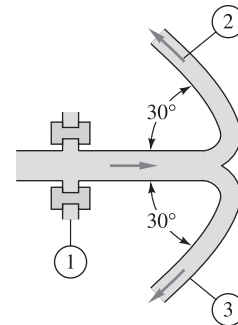
P3.60

P3.61 Un chorro de agua a 20 °C incide sobre un álabe subido a un depósito dotado con ruedas sin fricción, como se muestra en la Figura P3.61. El chorro gira y cae en el depósito sin derramarse. Si $\theta = 30^\circ$, calcule la fuerza horizontal F necesaria para que el depósito permanezca en reposo.



P3.61

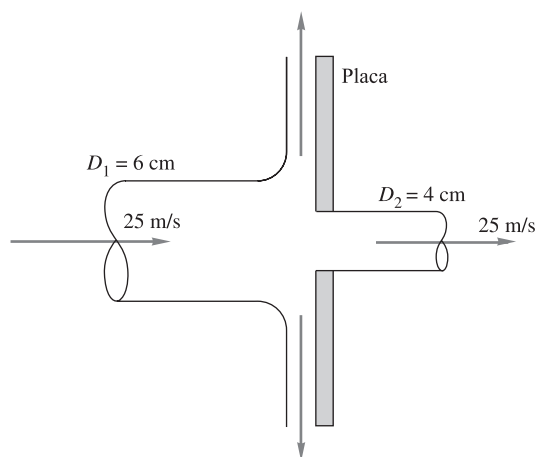
P3.62 En la Figura P3.62 se muestra cómo el agua a 20 °C sale a la atmósfera al nivel del mar a través de dos conductos. Las áreas de los conductos son $A_1 = 0.02$ m² y $A_2 = A_3 = 0.008$ m². Si $p_1 = 135$ kPa (absoluta) y el caudal es $Q_2 = Q_3 = 275$ m³/h, calcule la fuerza sobre los tornillos de la abrazadera de la sección 1.



P3.62

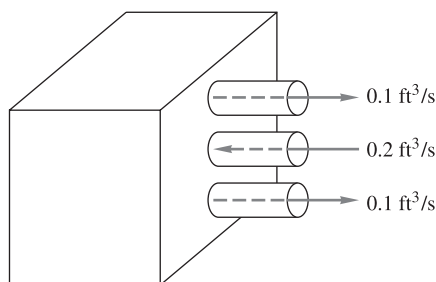
P3.63 En el Ejemplo 3.10, la fuerza sobre la compuerta F es función de la profundidad del agua y de la velocidad. (a) Adimensionalice la fuerza dividiendo por $(\rho g b h_1^2)$ y gráfiquela frente a $h_2/h_1 \leq 0$. (b) En el gráfico aparece un segundo parámetro sin dimensiones que contiene a V_1 . ¿Sabe su nombre? (c) ¿Para qué condición h_2/h_1 es la fuerza máxima? (d) Para pequeños valores de V_1 , la fuerza llega a ser negativa (hacia la derecha), lo cual es totalmente irreal. ¿Puede explicar esto?

P3.64 El chorro de agua a 20 °C de 6 cm de diámetro de la Figura P3.64 incide sobre una placa que contiene un orificio de 4 cm de diámetro. Parte del chorro pasa a través del orificio y parte se deflecta. Determine la fuerza horizontal requerida para mantener la placa.



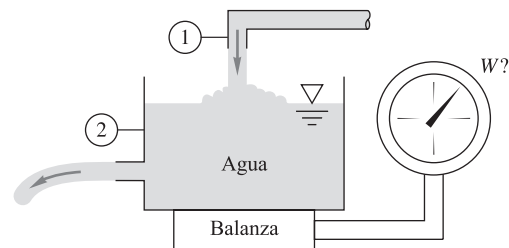
P3.64

P3.65 La caja de la Figura P3.65 tiene tres orificios de 0.5 in en su lado derecho. Los caudales de agua a 20 °C que se muestran son estacionarios, pero los detalles del interior son desconocidos. Calcule la fuerza, de existir, que el flujo de agua causa sobre la caja.



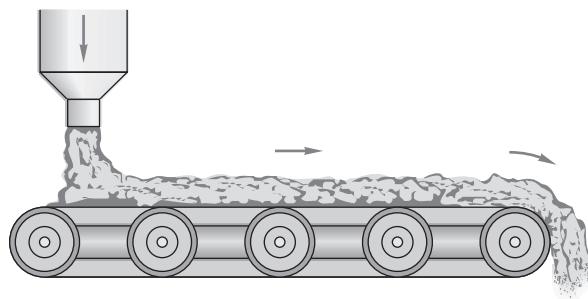
P3.65

P3.66 El depósito de la Figura P3.66 pesa 500 N vacío y contiene 600 l de agua a 20 °C. Los conductos 1 y 2 tienen un diámetro de 6 cm y un caudal de 300 m³/h cada uno. ¿Cuál sería la lectura de W en newtons?



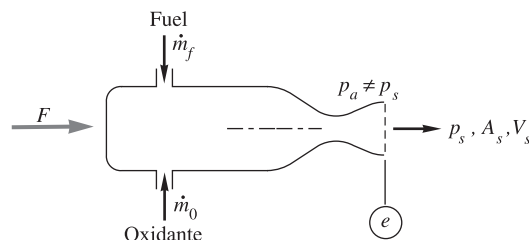
P3.66

P3.67 Una tolva está descargando grava, a un ritmo de 650 N/s, sobre una cinta transportadora en movimiento, como se muestra en la Figura P3.67. La grava se descarga al final de la cinta. Las ruedas de propulsión de la cinta tienen un diámetro de 80 cm y giran en sentido horario a 150 rpm. Estime la potencia requerida por esta cinta, despreciando la fricción del sistema y la resistencia del aire.



P3.67

P3.68 El motor cohete de la Figura P3.68 tiene una salida supersónica, por lo que la presión en la salida p_s no tiene por qué ser p_a . Demostrar que la fuerza requerida para mantener el cohete en su banco de ensayos es $F = \rho_s A_s V_s^2 + A_s(p_s - p_a)$. ¿Es esta fuerza F lo que denominamos empuje del cohete?

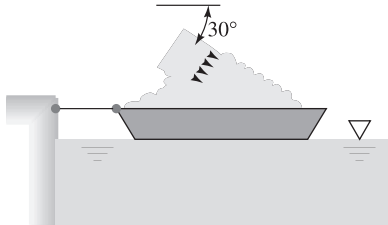


P3.68

P3.69 Una placa rectangular uniforme de 40 cm de longitud y 30 cm de anchura está sujeta en el aire mediante una bisagra que la soporta en su parte superior (los 30 cm de anchura). La placa es golpeada en su centro por un chorro de agua horizontal de 3 cm de diámetro con una

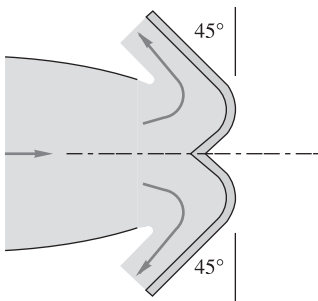
velocidad de 8 m/s. Si la placa tiene una masa de 16 kg, estime el ángulo al que la placa queda en equilibrio con respecto a la vertical.

- P3.70** La draga de la Figura P3.70 está cargando arena ($\rho_r = 2.6$) sobre una barcaza. La arena sale del conducto de la draga a 4 ft/s con un flujo de 850 lbf/s. Estime la tensión que este proceso de carga produce en la amarra.



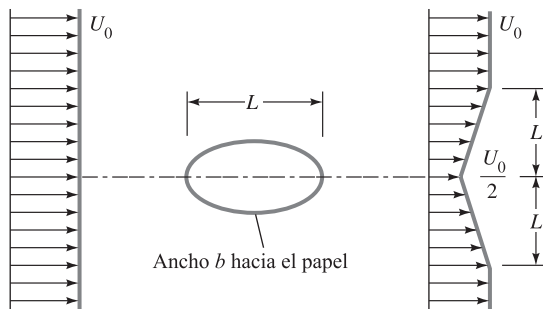
P3.70

- P3.71** Suponga que en el motor a reacción del Problema P3.50 se coloca un deflector como el de la Figura P3.71. ¿Cuál será ahora la reacción R_x sobre el banco? ¿Es esta reacción suficiente para servir de fuerza de frenada durante el aterrizaje de un avión?



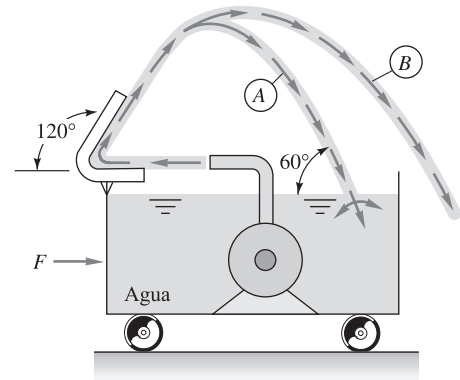
P3.71

- *P3.72** El cilindro elíptico de la Figura P3.72 crea una estela ideal aguas abajo de la corriente uniforme. La presión en las secciones de aguas arriba y abajo es aproximadamente igual y se trata de agua a 20 °C. Si $U_0 = 4$ m/s y $L = 80$ cm, estime la fuerza de resistencia por unidad de anchura que se ejerce sobre el cilindro. Calcule también el coeficiente de resistencia adimensional $C_D = 2F/(\rho U_0^2 bL)$.



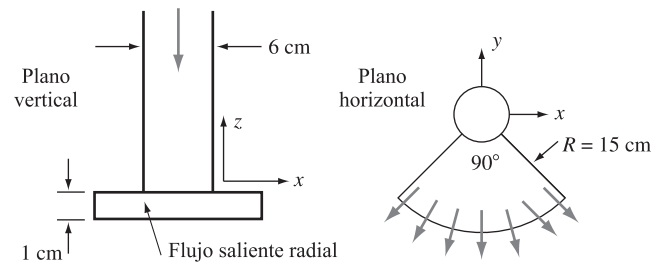
P3.72

- P3.73** Una bomba en un depósito de agua a 20 °C dirige el chorro a 45 ft/s y 200 gal/min contra un álabe, como en la Figura P3.73. Calcule la fuerza F necesaria para mantener el carro estacionario si el chorro sigue (a) la senda A o (b) la senda B. El depósito contiene 550 gal de agua en ese instante.



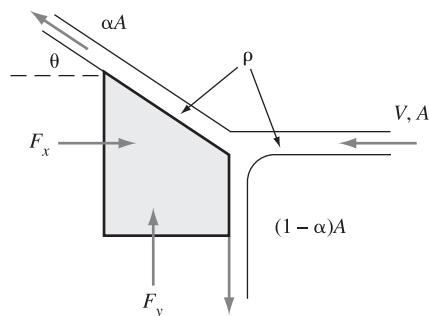
P3.73

- P3.74** En la Figura P3.74 se representa un conducto de 6 cm de diámetro por el que fluye agua a 20 °C con un caudal de 300 gal/min. El flujo gira en la horizontal y sale radialmente por un conducto en forma de segmento circular de 90° y 1 cm de espesor. Estime las fuerzas (F_x , F_y , F_z) requeridas para soportar los cambios de cantidad de movimiento del fluido, si se considera que el flujo radial es estacionario y uniforme.



P3.74

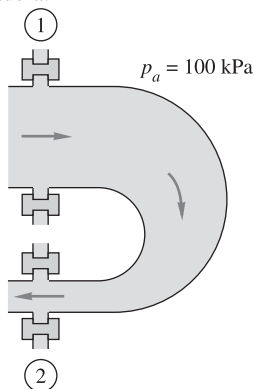
- *P3.75** Un chorro de líquido de densidad ρ y área A incide sobre un bloque y se parte en dos chorros, como se muestra en la Figura P3.75. Suponga que los tres chorros tienen la misma velocidad V . El chorro superior sale con un ángulo θ y un área αA . El chorro inferior gira 90° hacia abajo. Despreciando el peso del fluido, (a) obtenga una expresión para las fuerzas (F_x , F_y) necesarias para retener el bloque. (b) Demuestre que $F_y = 0$ sólo si $\alpha \geq 0.5$. (c) Encuentre los valores de α y θ para los cuales F_x y F_y son nulos.



P3.75

- P3.76** Una capa de agua bidimensional de 10 cm de espesor que se mueve a 7 m/s incide sobre una pared fija, inclinada 20° con respecto a la dirección del chorro. Suponiendo que se trata de un flujo sin fricción, encuentre (a) la fuerza normal sobre la pared por metro de anchura, y encuentre el espesor de las capas de agua desviadas (b) aguas arriba y (c) aguas abajo de la pared.

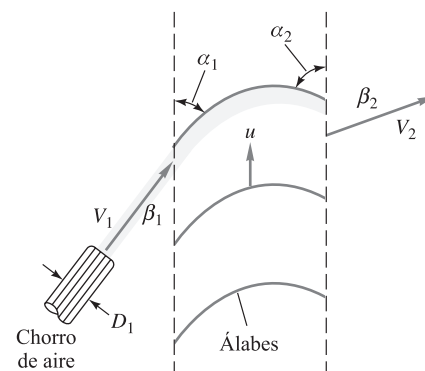
- P3.77** En la Figura P3.77 se presenta un conducto curvo de sección variable por el que circula de forma estacionaria agua a 20°C . Sabiendo que las condiciones son $p_1 = 350\text{ kPa}$, $D_1 = 25\text{ cm}$, $V_1 = 2.2\text{ m/s}$, $p_2 = 120\text{ kPa}$ y $D_2 = 8\text{ cm}$, y despreciando el peso del conducto y del agua, estime la fuerza total que deben resistir los tornillos de la abrazadera.



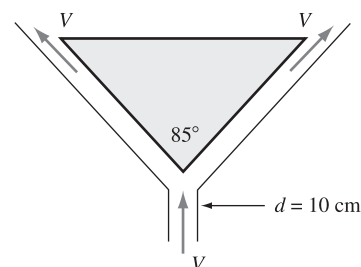
P3.77

- P3.78** Un chorro de diámetro D_1 entra en la cascada de álabes móviles con una velocidad absoluta V_1 y un ángulo β_1 , abandonándola a una velocidad absoluta V_2 y un ángulo β_2 , tal y como se muestra en la Figura P3.78. Los álabes se mueven con velocidad u . Obtenga una fórmula para la potencia P producida por los álabes en función de los parámetros anteriores.

- P3.79** En la Figura P3.79 se muestra el flujo de aire a 20°C y 1 atm incidiendo sobre un rotámetro cónico de 85° con un gasto másico de 0.3 kg/s . Este chorro es capaz de soportar un cuerpo cónico mediante un flujo estacionario anular alrededor del cono, como se muestra en la figura. La velocidad del aire en la parte superior del cono es igual a la velocidad de entrada. Estime el peso del cuerpo en newtons.

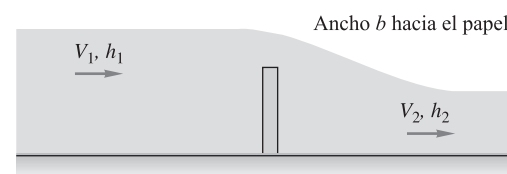


P3.78



P3.79

- P3.80** Un río de anchura b y profundidad h_1 pasa sobre el obstáculo sumergido o “presa anegada” de la Figura P3.80, emergiendo en unas nuevas condiciones de flujo (V_2 , h_2). Desprecie la presión atmosférica y suponga que la presión del agua es la correspondiente presión hidrostática en las secciones 1 y 2. Obtenga una expresión para la fuerza ejercida sobre el obstáculo en función de V_1 , h_1 , h_2 , b , ρ y g . Desprecie la fricción del agua sobre el fondo del río.

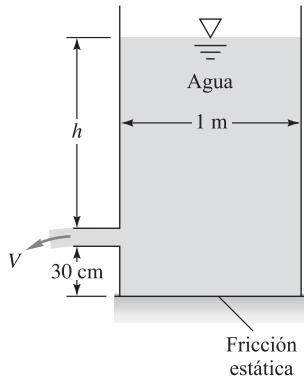


P3.80

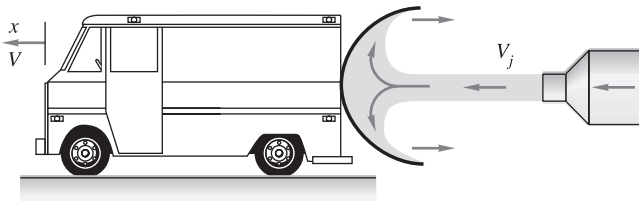
- P3.81** La idealización de Torricelli del flujo por un orificio en la cara de un depósito es $V = \sqrt{2gh}$, según se muestra en la Figura P3.81. El depósito cilíndrico pesa 150 N vacío y contiene agua a 20°C . El fondo del depósito está sobre hielo muy liso (coeficiente estático de fricción $\zeta \approx 0.01$). El diámetro del orificio es de 9 cm. ¿Para qué profundidad de agua h el depósito comienza a desplazarse a la derecha?



- *P3.82** El modelo de coche de la Figura P3.82 pesa 17 N y es acelerado desde el reposo por un chorro de agua de 1 cm de diámetro que se mueve a 75 m/s. Despreciando la resistencia del aire y el rozamiento de las ruedas, estime la velocidad del coche cuando se ha desplazado 1 m.



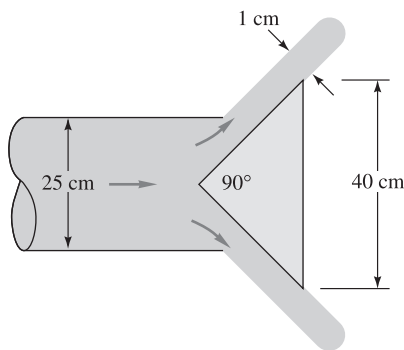
P3.81



P3.82

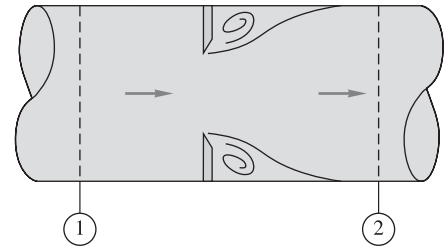
P3.83 Por un conducto de 5 cm de diámetro está circulando gasolina a 20 °C con $V_1 = 12$ m/s, cuando encuentra una sección 1 m de longitud con succión radial uniforme. Al final de esta región de succión, la velocidad media ha caído hasta $V_2 = 10$ m/s. Si $p_1 = 120$ kPa, estime p_2 si las pérdidas de fricción en la pared son despreciables.

P3.84 Por un conducto de 25 cm de diámetro está circulando aire a 20 °C y 1 atm con 15 m/s. La salida es interrumpida por un cono de 90°, como muestra la Figura P3.84. Estime la fuerza del aire sobre el cono.



P3.84

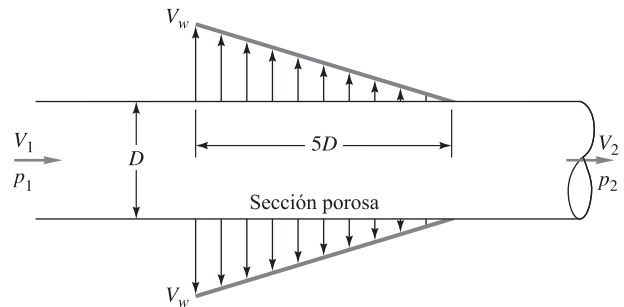
P3.85 El orificio de la placa de la Figura P3.85 produce una gran caída de presión en el flujo de agua a 20 °C con 500 gal/min, un diámetro del conducto $D = 10$ cm y del orificio $d = 6$ cm, $p_1 - p_2 \approx 145$ kPa. Si la fricción en la pared es despreciable, estime la fuerza del agua sobre la placa perforada.



P3.85

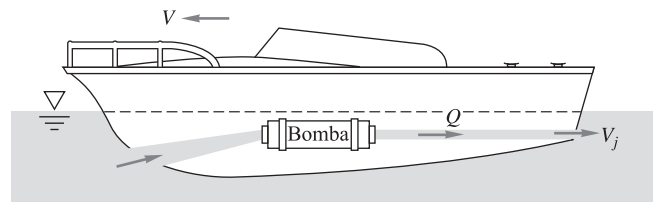
P3.86 Añada los siguientes datos en el flujo de la bomba de agua del Problema P3.36: $p_1 = p_2 = 25$ lbf/in² y la distancia entre las secciones 1 y 3 es de 80 in. Si el esfuerzo medio de cortadura sobre la pared entre las secciones 1 y 3 es de 7 lbf/ft², estime la presión p_3 . ¿Por qué es mayor que la p_1 ?

P3.87 La Figura P3.87 simula el movimiento en un colector en el que se extrae flujo a través de una sección porosa o perforada de la pared. Suponga un flujo incompresible, con fricción en la pared despreciable y con una pequeña succión $V_w \ll V_1$. Si se conocen (p_1, V_1, V_w, ρ, D) , obtenga expresiones para (a) V_2 y (b) p_2 .



P3.87

P3.88 El barco de la Figura P3.88 está propulsado mediante el chorro impulsado por una bomba que produce un caudal Q y evacua agua por la popa del barco a una velocidad V_j . Si la fuerza de resistencia del barco es $F = kV^2$, donde k es una constante, obtenga una fórmula para la velocidad estacionaria de avance del barco V .

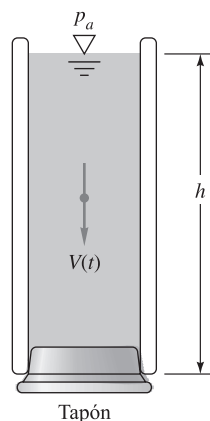


P3.88

P3.89 Considere la Figura P3.36 como un problema general para el análisis de una bomba de eyección. Si todas las condiciones (p, ρ, V) son conocidas en las secciones 1 y 2 y si

la fricción en la pared es despreciable, obtenga fórmulas para estimar (a) V_3 y (b) p_3 .

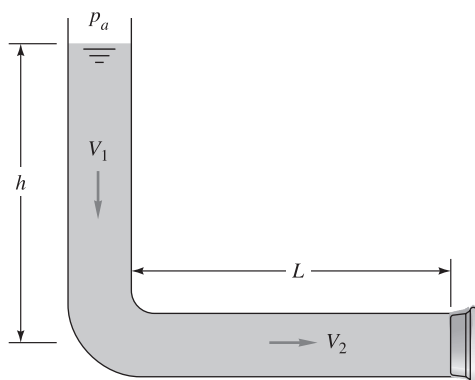
- P3.90** Como se muestra en la Figura P3.90, una columna de líquido de altura h está confinada mediante un tapón en un tubo vertical de sección transversal A . En $t = 0$ se quita bruscamente el tapón, exponiendo el fondo del tubo a la presión atmosférica. Usando el análisis de volúmenes de control de la masa y la cantidad de movimiento, obtenga la ecuación diferencial del movimiento de descarga $V(t)$ del líquido. Suponga flujo incompresible, unidimensional y sin fricción.



P3.90

- P3.91** Extienda el Problema P3.90 para incluir un esfuerzo medio de resistencia sobre la pared con la forma lineal (laminar) $\tau \approx cV$, donde c es una constante. Obtenga la ecuación diferencial para dV/dt y resuélvala para $V(t)$, suponiendo, por simplicidad, que el área de la pared permanece constante.

- *P3.92** Una versión más complicada del Problema P3.90 es el tubo acodado de la Figura P3.92, con una sección transversal de área A y diámetro $D \ll h, L$. Suponiendo flujo incompresible y despreciando la fricción, obtenga una ecuación diferencial para dV/dt cuando se abre el tapón. (Consejo: Combine dos volúmenes de control, uno para cada rama del tubo.)

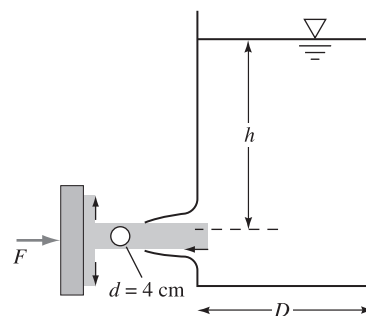


P3.92

- P3.93** Extienda el Problema P3.92 para incluir un esfuerzo de resistencia medio lineal (laminar) de la forma $\tau \approx cV$, donde c es una constante. Obtenga una ecuación diferencial para dV/dt y resuélvala para $V(t)$, suponiendo por simplicidad que el área de la pared permanece constante.

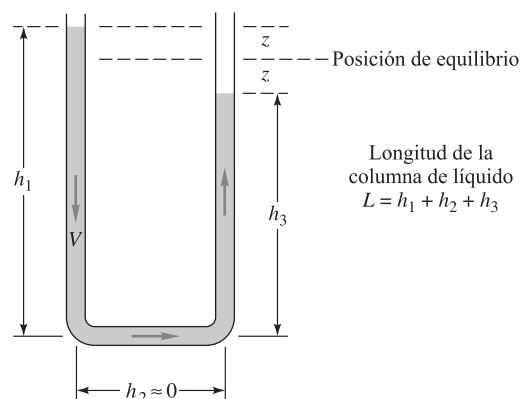
- P3.94** Obtenga una solución numérica del Problema P3.93 con aceite SAE 30 a 20 °C. Tome $h = 20$ cm, $L = 15$ cm y $D = 4$ mm. Use la aproximación de esfuerzo laminar de la Sección 6.4: $\tau \approx 8\mu V/D$, donde μ es la viscosidad del fluido. Tenga en cuenta la disminución del área mojada de la pared. Obtenga el tiempo requerido para vaciar (a) la rama vertical y (b) la rama horizontal.

- P3.95** Un depósito de agua descarga a través de un orificio bien redondeado, como se muestra en la Figura P3.95. Use la fórmula de Torricelli del Problema P3.81 para estimar la velocidad de salida. (a) Si en el instante mostrado la fuerza requerida para sostener la placa es 40 N, ¿cuál es la altura h ? (b) Si el nivel del depósito baja a una velocidad de 2.5 cm/s, ¿cuál es el diámetro D del tanque?



P3.95

- P3.96** Extienda el Problema P3.90 al caso del movimiento de líquido en un tubo en U sin fricción cuya columna líquida se desplaza una altura Z para después soltarse, como se representa en la Figura P3.96. Desprecie la rama horizontal y combine un análisis con volúmenes de control para las ramas derecha e izquierda para obtener una ecuación diferencial para la velocidad $V(t)$ de la columna de líquido.



P3.96

***P3.97** Extienda el Problema P3.96 para incluir un esfuerzo de resistencia medio lineal (laminar) de la forma $\tau \approx 8\mu V/D$, donde μ es la viscosidad del fluido. Obtenga la ecuación diferencial para dV/dt y resuélvala para obtener $V(t)$, suponiendo un desplazamiento inicial $z = z_0$, $V = 0$ en $t = 0$. El resultado debe ser una oscilación amortiguada que tienda a $z = 0$.

***P3.98** Considere una extensión del Ejemplo 3.9 en la que la placa y su carro (véase Figura 3.9a) no estén amarrados horizontalmente y la fricción en las ruedas sea nula. Obtenga (a) la ecuación del movimiento de la velocidad del carro $V_c(t)$ y (b) una expresión para el tiempo requerido por el carro para acelerar del reposo al 90% de la velocidad del chorro (suponiendo que el chorro sigue incidiendo sobre la placa de forma horizontal). (c) Calcule valores numéricos para el apartado (b) empleando las condiciones del Ejemplo 3.9 y una masa del carro de 2 kg.

P3.99 Considere que el cohete de la Figura E3.12 comienza a $z = 0$, con una velocidad de salida y flujo de masa constantes y que sube verticalmente con resistencia nula. (a) Demuestre que mientras se siga quemando combustible, la altura vertical $S(t)$ alcanzada está dada por

$$S = \frac{V_s M_o}{\dot{m}} [\zeta \ln \zeta - \zeta + 1], \text{ donde } \zeta = 1 - \frac{\dot{m} t}{M_o}$$

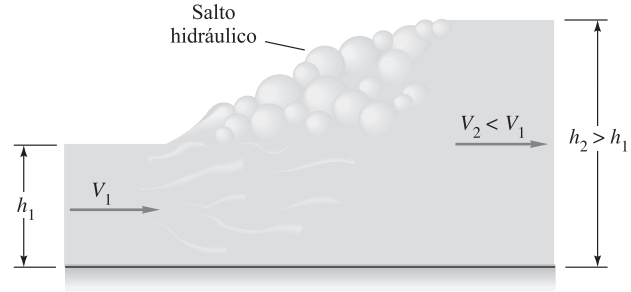
(b) Aplique esta expresión al caso en el que $V_s = 1500$ m/s y $M_o = 1000$ kg para encontrar la altura alcanzada después de 30 segundos, cuando la masa final del cohete es de 400 kg.

P3.100 Suponga que el cohete de combustible sólido del Problema P3.35 se instala en un misil de 70 cm de diámetro y 4 m de longitud. El sistema pesa 1800 N, que incluyen 700 N de propulsante. Desprecie la resistencia del aire. Si el misil se dispara verticalmente al nivel del mar desde el reposo, estime (a) su velocidad y altura cuando se ha consumido todo el combustible y (b) la máxima altura que alcanzará.

P3.101 Modifique el Problema P3.100 para tener en cuenta la resistencia del misil $F \approx C\rho D^2 V^2$, donde $C \approx 0.02$, ρ es la densidad del aire, D es el diámetro del misil y V es la velocidad del misil. Resuelva numéricamente para (a) la velocidad y la altura a la que se consume el combustible y (b) la máxima altura alcanzada.

P3.102 Al igual que se observa en el fregadero de una cocina cuando cae sobre él el agua del grifo, un canal de agua a gran velocidad (V_1 , h_1) puede “saltar” a una condición de baja velocidad y baja energía (V_2 , h_2) como se observa en la Figura P3.102. La presión en las secciones 1 y 2 es aproximadamente la hidrostática y la fricción en la pared es despreciable. Use las relaciones de continuidad y cantidad de movimiento para obtener h_2 y V_2 en función de (h_1 , V_1).

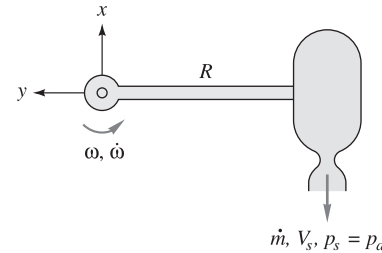
***P3.103** Suponga que el cohete de combustible sólido del Problema P3.35 se monta sobre un carro de 1000 kg para propulsarlo sobre una larga pendiente de 15° . El motor cohete pesa 900 N, lo que incluye 500 N de propel-



P3.102

sante. Si el carro está en reposo cuando el motor cohete se inicia y se desprecian la resistencia del aire y la fricción de las ruedas, estime la máxima distancia que el carro podrá viajar por la colina.

P3.104 Un cohete está sujeto a una barra horizontal articulada en el origen, como se muestra en la Figura P3.104. Su masa inicial es M_o , y las propiedades en la salida son \dot{m} y V_s relativa al cohete. Obtenga la ecuación diferencial para el movimiento del cohete y resuélvala para la velocidad angular $\omega(t)$ de la barra. Desprecie el efecto de la gravedad, la resistencia del aire y la masa de la barra.

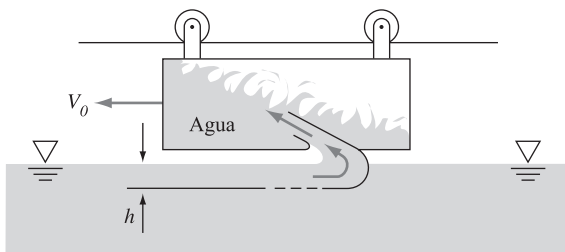


P3.104

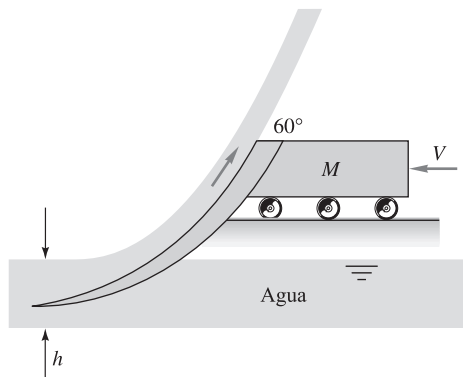
P3.105 Extienda el Problema P3.104 al caso en el que el cohete tiene una fuerza de resistencia del aire lineal $F = cV$, donde c es una constante. Suponga que el cohete no se apaga, resuelva para $\omega(t)$ y encuentre la velocidad angular *terminal*, es decir, la condición final para la que la aceleración angular es nula. Aplique el resultado al caso $M_o = 6$ kg, $R = 3$ m, $\dot{m} = 0.05$ kg/s, $V_s = 1100$ m/s y $c = 0.075$ N · s/m para encontrar la velocidad angular tras 12 segundos de combustión.

P3.106 Extienda el Problema P3.104 al caso en el que el cohete tiene una fuerza de resistencia del aire cuadrática $F = kV^2$, donde k es una constante. Suponga que el cohete no se apaga, resuelva para $\omega(t)$ y encuentre la velocidad angular *terminal*, es decir, la condición final para la que la aceleración angular es nula. Aplique el resultado al caso $M_o = 6$ kg, $R = 3$ m, $\dot{m} = 0.05$ kg/s, $V_s = 1100$ m/s y $k = 0.0011$ N · s²/m² para encontrar la velocidad angular tras 12 s de combustión.

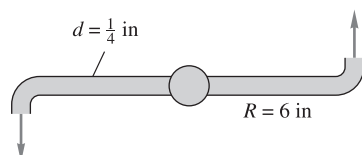
P3.107 El carro de la Figura P3.107 se desplaza con una velocidad constante $V_o = 12$ m/s y toma agua con una pala de 80 cm de ancho que entra $h = 2.5$ cm en un estanque. Desprecie la resistencia del aire y la fricción de las ruedas. Estime la fuerza requerida para mantener el carro en movimiento.

**P3.107**

- *P3.108** El trineo de la Figura P3.108 está propulsado por un cohete, tiene una masa M y se decelera mediante una pala de anchura b perpendicular al papel, que se sumerge en el agua hasta una profundidad h , creando un chorro hacia arriba con un ángulo de 60° . El empuje es T hacia la izquierda. Si la velocidad inicial es V_0 y se desprecian la resistencia del aire y la fricción de las ruedas, obtenga una expresión para la velocidad del trineo $V(t)$ cuando (a) $T = 0$ y (b) $T \neq 0$.

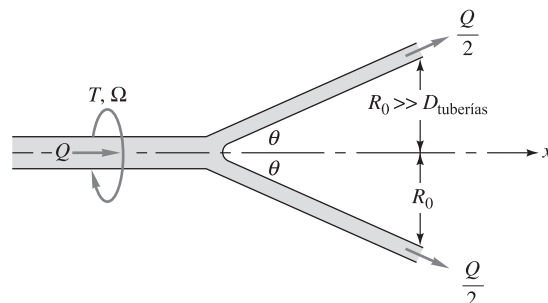
**P3.108**

- P3.109** Aplique el Problema P3.108 al siguiente caso: $M_{\text{total}} = 900$ kg, $b = 60$ cm, $h = 2$ cm y $V_0 = 120$ m/s, con el cohete del Problema P3.35 en funcionamiento. Estime V tras 3 s.
- P3.110** El aspersor de la Figura P3.110 tiene un caudal de agua de 4.0 gal/min introducida verticalmente por su centro. Estime (a) el momento resistente que se requiere para evitar que los brazos giren y (b) la velocidad de rotación en revoluciones por minuto si no hay momento de retención.

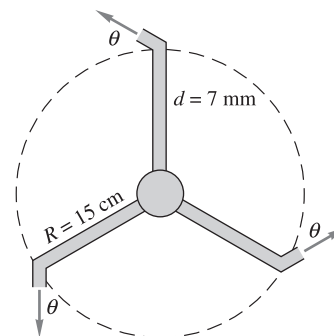
**P3.110**

- P3.111** Encuentre el momento que se produce en la abrazadera 1 del Problema P3.60 si el punto de salida 2 está 1.2 m por debajo del centro de la abrazadera.

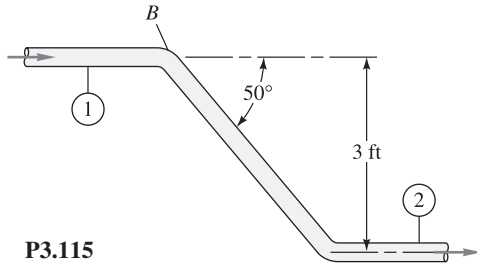
- P3.112** La unión en "Y" de la Figura P3.112 divide el flujo del conducto en dos de igual caudal $Q/2$, que salen, como se muestra, a una distancia R_0 del eje. Desprecie la gravedad y la fricción. Obtenga una expresión para el momento T respecto al eje x requerido para mantener el sistema girando con velocidad angular Ω .

**P3.112**

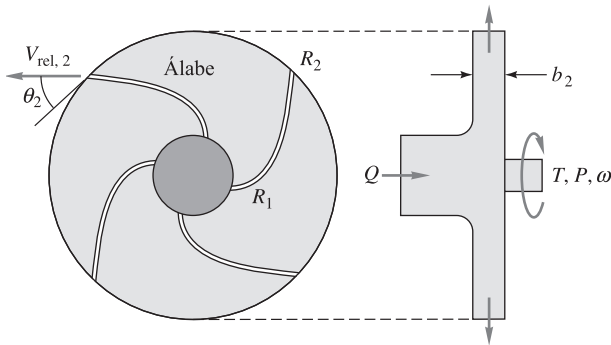
- P3.113** Modifique el Ejemplo 3.15 de forma que el brazo comienza en reposo y acelera hasta su velocidad angular final. El momento de inercia del brazo alrededor de O es I_0 . Despreciando la resistencia del aire, encuentre $d\omega/dt$ e intégrele para determinar la velocidad angular $\omega(t)$, suponiendo que $\omega = 0$ en $t = 0$.
- P3.114** El aspersor de la Figura P3.114 recibe agua a 20°C a través de su centro a 2.7 m³/h. Si la fricción del cuello es despreciable, ¿cuál es la velocidad de rotación estacionaria en revoluciones por minuto para (a) $\theta = 0^\circ$ y (b) $\theta = 40^\circ$?

**P3.114**

- P3.115** Por el conducto doblemente acodado de 0.75 in de diámetro de la Figura P3.115 circula agua a 20°C con un caudal de 30 gal/min. Las presiones son $p_1 = 30$ lbf/in² y $p_2 = 24$ lbf/in². Calcule el momento T en el punto B necesario para mantener el conducto sin rotación.
- P3.116** La bomba centrífuga de la Figura P3.116 tiene un caudal Q que abandona el rotor con un ángulo θ_2 relativo a los álabes, según se muestra. El fluido entra axialmente en la sección 1. Suponiendo un flujo incompresible y una velocidad angular Ω del rotor, obtenga una expresión para la potencia P requerida para moverlo.

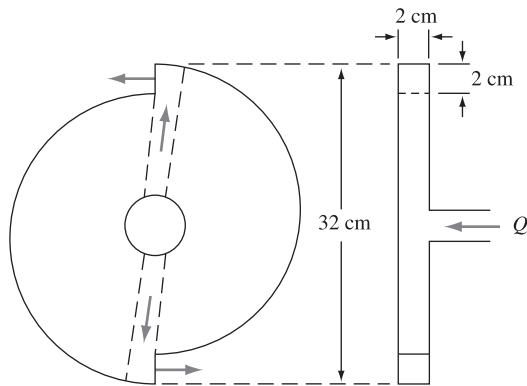


P3.115



P3.116

- P3.117** Una turbomáquina simple está construida mediante un disco con dos conductos internos que salen tangencialmente a través de dos orificios cuadrados, como se muestra en la Figura P3.117. Un flujo de agua a 20 °C entra perpendicularmente por el centro del disco, según se representa. El disco debe mover a 250 rpm un pequeño dispositivo mediante un par de 1.5 N · m. ¿Cuál es el gasto másico de agua necesario en kilos por segundo?



P3.117

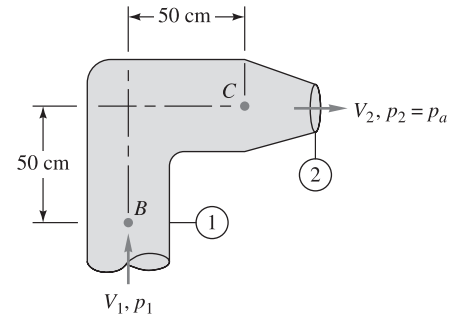
- P3.118** Invierta el flujo de la Figura P3.116 de forma que el sistema funcione como una *turbina* de flujo radial. Suponiendo que el flujo que sale por la sección 1 no

tiene velocidad tangencial, obtenga una expresión para la potencia P extraída por la turbina.

- P3.119** Revise la cascada de álabes de turbina del Problema P3.78 y obtenga una fórmula para la potencia producida P usando el teorema del *momento cinético* de la Ecuación (3.55).

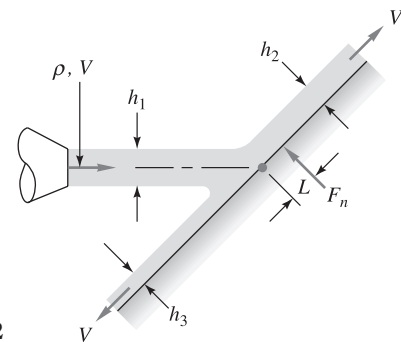
- P3.120** El rotor de una bomba centrífuga proporciona 4000 gal/min de agua a 20 °C con una velocidad de rotación del eje de 1750 rpm. Desprecie las pérdidas. Si $r_1 = 6$ in, $r_2 = 14$ in, $b_1 = b_2 = 1.75$ in, $V_{r1} = 10$ ft/s y $V_{r2} = 110$ ft/s, calcule las velocidades absolutas (a) V_1 , (b) V_2 y (c) la potencia requerida. (d) Compare con la potencia ideal requerida.

- P3.121** El tubo acodado de la Figura P3.121 tiene $D_1 = 27$ cm y $D_2 = 13$ cm. Por él circulan 4000 gal/min de agua a 20 °C con $p_1 = 194$ kPa (manométrica). Calcule el momento requerido en el punto B para mantener el tubo quieto.



P3.121

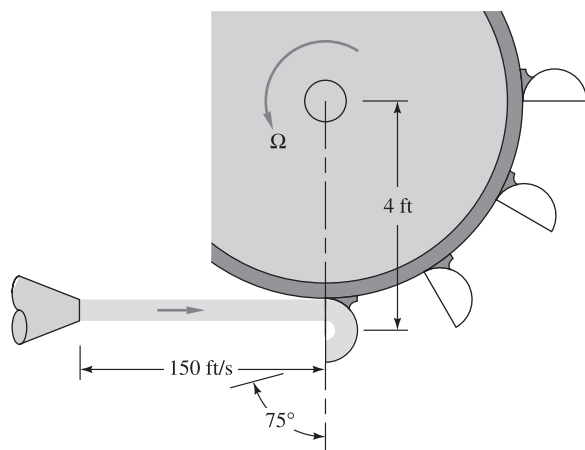
- *P3.122** Extienda el Problema P3.46 al cálculo del centro de presiones L de la fuerza normal F_n , según se representa en la Figura P3.122. (En el centro de presiones no se requiere momento para mantener la placa estacionaria.) Desprecie la fricción. Expresé los resultados en función del espesor de la capa h_1 y del ángulo θ entre la placa y el chorro incidente 1.



P3.122

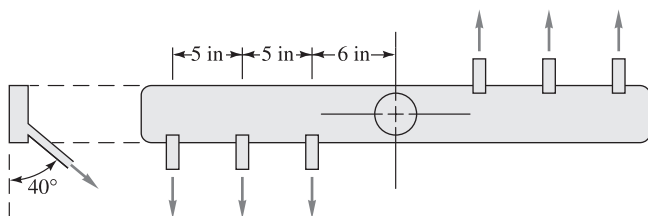
- P3.123** La turbina hidráulica de la Figura P3.123 está siendo impulsada a 200 rpm por un chorro de agua a 20 °C con 150 ft/s. El diámetro del chorro es 2.5 in. Suponiendo

que no hay pérdidas, ¿cuál es la potencia producida por la turbina? ¿A qué velocidad Ω en revoluciones por minuto se producirá potencia máxima? Suponga que hay muchas paletas en la turbina.



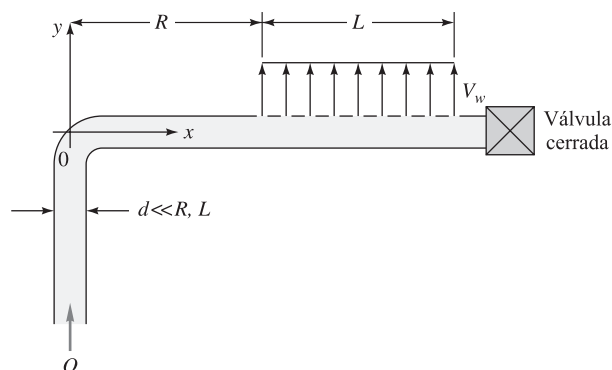
P3.123

- P3.124** El brazo rotatorio de un lavavajillas proporciona agua a 60 °C a seis boquillas, como en la Figura P3.124. El caudal total es de 3.0 gal/min. Cada boquilla tiene un diámetro de 3/16 in. Si el flujo es igual en todas las boquillas y se desprecia la fricción, estime la velocidad de rotación estacionaria en revoluciones por minuto.

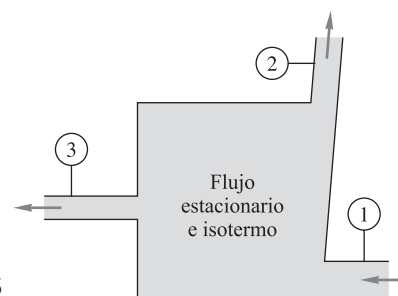


P3.124

- *P3.125** Un líquido de densidad ρ fluye por un codo de 90° como se muestra en la Figura P3.125 y sale verticalmente a través de una sección uniformemente porosa de longitud L . Despreciando el peso de líquido y conducto, obtenga una expresión del par M con respecto al punto O que se requiere para mantener el conducto estacionario.



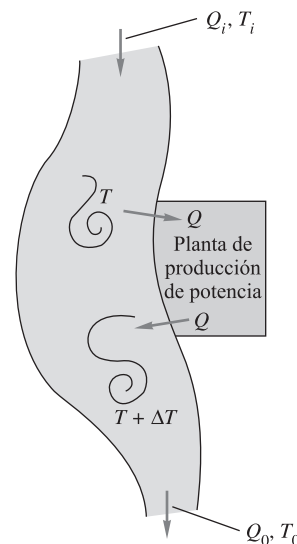
P3.125



P3.126

- P3.126** A través del dispositivo de la Figura P3.126 fluye agua a 20 °C. Los efectos de transferencia de calor, gravedad y temperatura son despreciables. Son conocidos $D_1 = 9$ cm, $Q_1 = 220$ m³/h, $p_1 = 150$ kPa, $D_2 = 7$ cm, $Q_2 = 100$ m³/h, $p_2 = 225$ kPa, $D_3 = 4$ cm y $p_3 = 265$ kPa. Calcule el trabajo mecánico realizado por este dispositivo y su dirección.

- P3.127** Una central térmica situada en un río, según se muestra en la Figura P3.127, debe ceder 55 MW de calor a la corriente. Las condiciones aguas arriba del río son



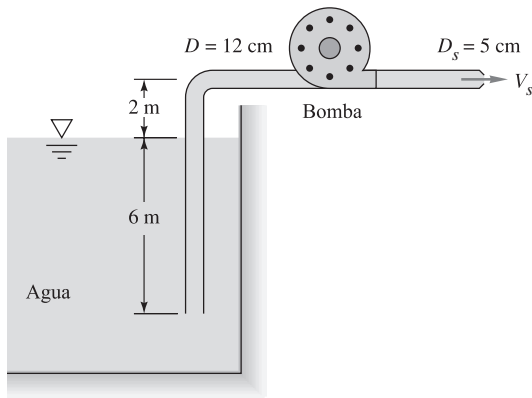
P3.127

$Q_i = 2.5$ m³/s y $T_i = 18$ °C. El río tiene 45 m de ancho y 2.7 m de profundidad. Si se desprecian las pérdidas de calor a la atmósfera y al terreno, estime las condiciones del río aguas abajo de la central (Q_o , T_o).

P3.128 Si para las condiciones del Problema P3.127, la planta de potencia no puede calentar el agua a más de 12 °C, ¿cuál será el caudal mínimo Q en metros cúbicos por segundo a través del intercambiador de calor? ¿Cómo afectará el valor de Q a las condiciones aguas abajo (Q_0 , T_0)?

P3.129 La cascada de Multnomah en el barranco del río Columbia tiene una caída de 543 ft. Estime el cambio de temperatura en el agua en °F causada por la caída, empleando la ecuación de la energía de un flujo estacionario.

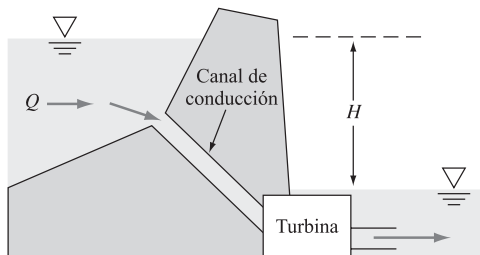
P3.130 Cuando la bomba de la Figura P3.130 proporciona 220 m³/h de agua a 20 °C desde el depósito, la pérdida total de carga por fricción es de 5 m. El flujo se descarga a la atmósfera a través de una tobera. Estime la potencia en kilovatios que la bomba proporciona al agua.



P3.130

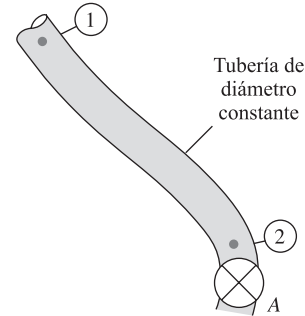
P3.131 Cuando la bomba de la Figura P3.130 proporciona una potencia de 25 kW al agua, la pérdida de carga por fricción es de 4 m. Estime (a) la velocidad de salida V_s y (b) el caudal Q .

P3.132 Considere una turbina que extrae energía del salto hidráulico de la presa de la Figura P3.132. Para un flujo turbulento en un conducto (Capítulo 6) la pérdida de carga por fricción es de aproximadamente $h_f = CQ^2$, donde la constante C depende de las dimensiones del salto y de las propiedades del agua. Demuestre que para una geometría dada y un caudal Q variable, la máxima potencia que puede producir la turbina es $P_{\max} = 2\rho g H Q / 3$ y ocurre cuando el caudal es $Q = \sqrt{H/(3C)}$.



P3.132

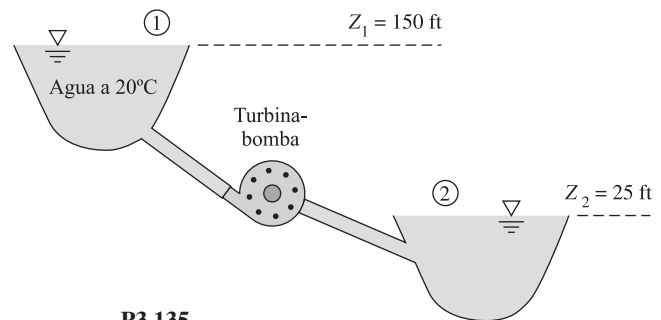
P3.133 El conducto de la Figura P3.133 está lleno de agua a 20 °C. Cuando la válvula A está cerrada, $p_1 - p_2 = 75$ kPa. Cuando la válvula está abierta y el agua fluye a 500 m³/h, $p_1 - p_2 = 160$ kPa. En ese caso, ¿cuál es la pérdida por fricción entre 1 y 2, expresada en metros?



P3.133

P3.134 Un conducto de 36 in de diámetro transporta aceite ($\rho_r = 0.89$) con un caudal de 1 millón de barriles al día (bbl/día) (1 bbl = 42 galones U.S.). La pérdida de carga por fricción es de 13 ft/1000 ft de conducto. Se planea colocar una estación de bombeo cada 10 millas. Estime la potencia que cada bomba debe proporcionar al aceite.

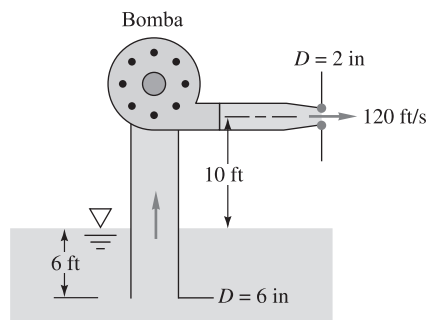
P3.135 El sistema *bomba-turbina* de la Figura P3.135 admite agua del depósito superior para proporcionar energía a la ciudad. Por la noche bombea agua del depósito inferior al superior para restablecer la situación anterior. Para un caudal de diseño de 15,000 gal/min en cada dirección, la pérdida de carga por fricción es de 17 ft. Estime la potencia en kilovatios (a) extraída por la turbina y (b) requerida por la bomba.



P3.135

P3.136 A través de un conducto de 8 cm de diámetro se transporta agua a 20 °C de un depósito a otro. La superficie del depósito inferior está a una altura $z_2 = 80$ m. Las pérdidas por fricción están representadas por la fórmula $h_{\text{perd}} \approx 17.5(V^2/2g)$, donde V es la velocidad media en la tubería. Si el caudal estacionario en el conducto es de 500 galones por minuto, estime la altura a la que se encuentra la superficie del depósito superior.

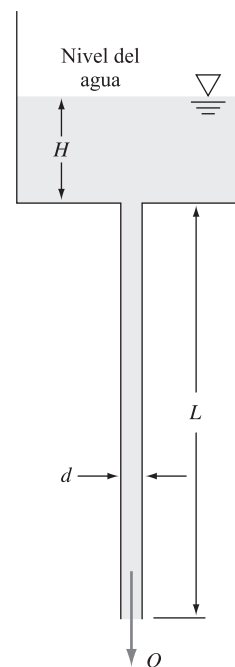
- P3.137** Una bomba de bomberos saca agua del mar ($\rho_r = 1.025$) mediante un tubo sumergido y la descarga a través de una tobera, según se representa en la Figura P3.137. La pérdida total de carga es de 6.5 ft. Si el rendimiento de la bomba es del 75%, ¿qué potencia requiere la bomba para su funcionamiento?



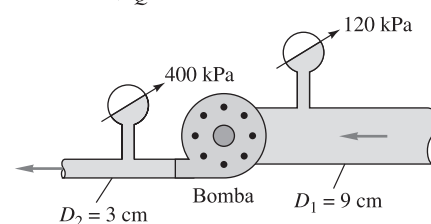
P3.137

- *P3.138** Los estudiantes del laboratorio de la Universidad de Penn utilizan un dispositivo muy simple para medir la viscosidad del agua como función de la temperatura. El viscosímetro, representado en la Figura P3.138, está formado por un depósito, un tubo capilar vertical largo, un cilindro graduado, un termómetro y un cronómetro. Debido al pequeño diámetro del tubo el flujo en su interior permanece laminar, y debido a su gran longitud las pérdidas en la entrada son despreciables. Como se demostrará en el Capítulo 6, la pérdida de carga debido al flujo laminar en un conducto está dada por $h_{f,\text{laminar}} = (32\mu LV)/(pgd^2)$, donde V es la velocidad media a través del conducto. (a) En un experimento dado se conocen el diámetro d , la longitud L y la altura del nivel de agua H , y el caudal Q se mide mediante el cronómetro y el cilindro graduado. La temperatura del agua también se está midiendo. La densidad del agua a esa temperatura se obtiene pesando el volumen de agua conocido. Escriba una expresión para la viscosidad del agua como función de esas variables. (b) Los datos tomados de un experimento real son: $T = 16.5^\circ\text{C}$, $\rho = 998.7\text{ kg/m}^3$, $d = 0.041\text{ in}$, $Q = 0.310\text{ mL/s}$, $L = 36.1\text{ in}$ y $H = 0.153\text{ m}$. Basándose en estos datos experimentales, calcule la viscosidad del agua en kilos por metro y segundo. (c) Compare el resultado experimental con los valores publicados para μ a esa temperatura y calcule el porcentaje de error. (d) Calcule el porcentaje de error en el cálculo de μ que ocurriría si un estudiante olvidara incluir el factor de corrección por el flujo de energía cinética en el apartado (b) (compare los resultados con y sin factor de corrección). Explique la importancia (o su carencia) del factor de corrección por el flujo de energía cinética en un problema como este.

- P3.139** La bomba horizontal de la Figura P3.139 descarga agua a 20°C con $57\text{ m}^3/\text{h}$. Despreciando las pérdidas, ¿qué potencia en kilovatios proporciona la bomba al agua?



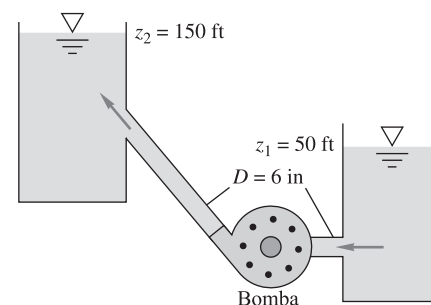
P3.138



P3.139

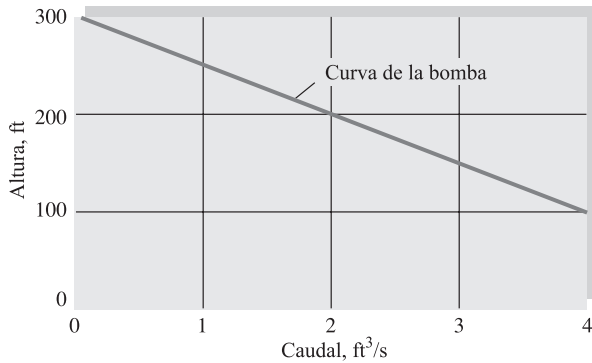
- P3.140** Una corriente de vapor entra en una turbina horizontal a una presión absoluta de 350 lbf/in^2 , 580°C y 12 ft/s y descarga a 110 ft/s y 25°C en condiciones saturadas. El gasto másico es de 2.5 lbm/s y las pérdidas de calor 7 Btu/lb . Si la pérdida de carga se considera despreciable, ¿qué potencia proporciona la turbina?

- P3.141** Desde el depósito inferior de la Figura P3.141 se bombea agua a 20°C al depósito superior, con un caudal de 1500 gal/min . Las pérdidas en el conducto por fricción son aproximadamente $h_f \approx 27V^2/(2g)$, donde V es la velocidad media en el conducto. Si el rendimiento de la bomba es del 75%, ¿qué potencia se necesita para moverla?

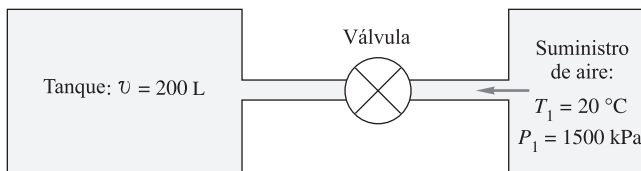


P3.141

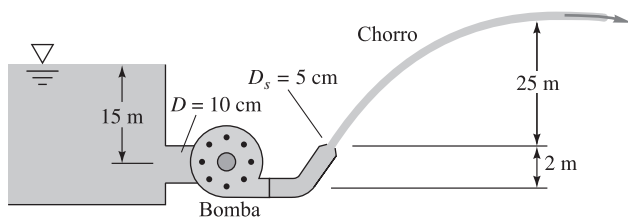
- P3.142** Una bomba típica tiene una carga que, para una velocidad de rotación dada, varía con el caudal, dando una *curva característica* como la de la Figura P3.142. Suponiendo que el rendimiento de la bomba es del 75% y que se emplea en el sistema del Problema P3.141, estime (a) el caudal en galones por minuto y (b) la potencia necesaria para mover la bomba.

**P3.142**

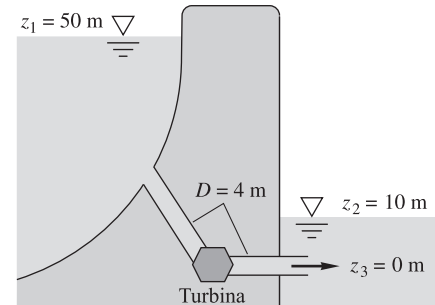
- P3.143** El depósito aislado de la Figura P3.143 tiene que llenarse mediante el suministro de aire a alta presión. Las condiciones iniciales del depósito son $T = 20^\circ\text{C}$ y $p = 200\text{ kPa}$. Cuando la válvula está abierta, el gasto másico inicial en el depósito es de 0.013 kg/s . Suponiendo un gas ideal, estime el ritmo inicial de caída de la temperatura del aire del depósito.

**P3.143**

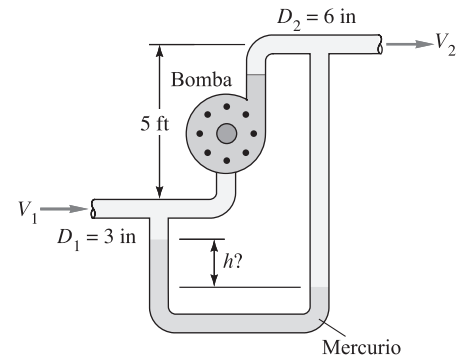
- P3.144** La bomba de la Figura P3.144 crea un chorro de agua a 20°C orientado de forma que viaje la máxima distancia horizontal posible. La pérdida de carga en el sistema por fricción es de 6.5 m . El chorro se puede aproximar por la trayectoria de las partículas sin fricción. ¿Qué potencia debe proporcionar la bomba?

**P3.144**

- P3.145** La turbina de la Figura P3.145 utiliza el flujo del río canalizado bajo la presa, según se muestra. Las pérdidas del sistema por fricción son $h_f = 3.5V^2/(2g)$, donde V es la velocidad media en el conducto de entrada. ¿Para qué caudal en metros cúbicos por segundo se extraerá una potencia de 25 MW ? ¿Cuál de las dos soluciones tiene un mejor "rendimiento de conversión"?

**P3.145**

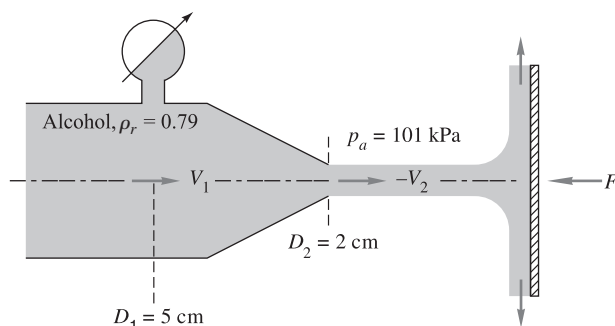
- P3.146** La bomba de la Figura P3.146 mueve queroseno a 20°C a $2.3\text{ ft}^3/\text{s}$. La pérdida de carga entre 1 y 2 es de 8 ft y la bomba proporciona al flujo 8 hp de potencia. ¿Cuál sería la lectura h del manómetro en pies?

**P3.146**

- P3.147** Repita el Problema P3.49 suponiendo que p_1 es desconocida y empleando la ecuación de Bernoulli sin pérdidas. Calcule la nueva fuerza en los tornillos con esta hipótesis. ¿Cuál es la pérdida de carga entre 1 y 2 con los datos del Problema P3.49?

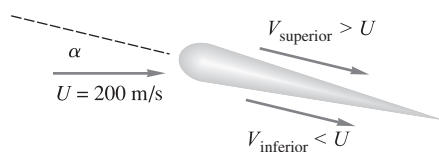
- P3.148** Extienda el análisis del sifón del Ejemplo 3.22 como sigue. Sea $p_1 = 1\text{ atm}$, y considere agua a 60°C , con las mismas cotas z_1 , z_2 y z_4 , siendo z_3 desconocida. Encuentre el valor de z_3 para el cual el agua comenzará a vaporizarse.

- P3.149** Un chorro de alcohol incide sobre la placa vertical de la Figura P3.149. Se necesita una fuerza $F \approx 425\text{ N}$ para mantener la placa estacionaria. Suponiendo que no hay pérdidas en la tobera, estime (a) el flujo másico de alcohol y (b) la presión absoluta en la sección 1.



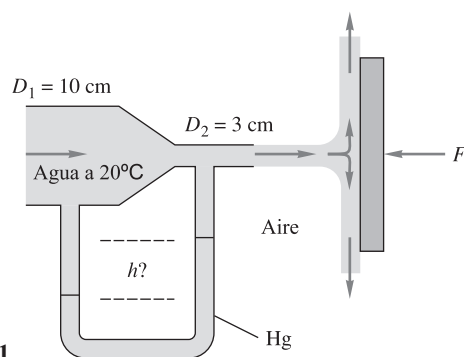
P3.149

- P3.150** Un perfil en ángulo de ataque α , como el de la Figura P3.150, produce sustentación por efecto Bernoulli, ya que la superficie inferior reduce la velocidad del flujo (alta presión) y la superior la aumenta (baja presión). Si el perfil tiene una longitud de 1.5 m y una anchura de 18 m perpendicular al papel y el aire ambiente corresponde a una atmósfera estándar a 5000 m, estime la sustentación total si las velocidades medias en las superficies superior e inferior son 215 m/s y 185 m/s, respectivamente. Desprecie el efecto de la gravedad. *Nota:* En este caso el ángulo α es aproximadamente de 3° .



P3.150

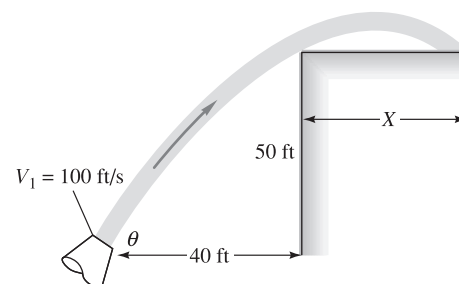
- P3.151** En la Figura P3.151 se presenta el flujo de agua a través de una tobera circular por la que sale en forma de chorro para incidir sobre una placa. La fuerza necesaria para mantener quieta la placa es de 70 N. Suponiendo un flujo estacionario, unidimensional y sin fricción, estime (a) las velocidades en las secciones (1) y (2) y (b) la lectura h del manómetro de mercurio.



P 3.151

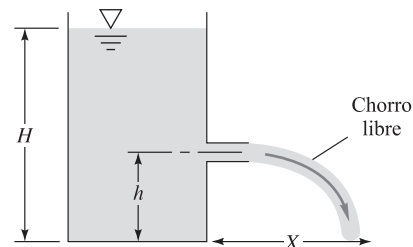
- P3.152** El chorro libre de líquido de la Figura P3.152 está a una presión ambiente constante y tiene unas pérdidas

muy pequeñas, por lo que la ecuación de Bernoulli $z + V^2/(2g)$ es constante a lo largo del chorro. Para la boquilla de la figura, calcule los valores (a) máximo y (b) mínimo de θ para los que el chorro de agua salvará la esquina del edificio. ¿En qué caso la velocidad del chorro será mayor cuando impacta sobre el tejado del edificio?



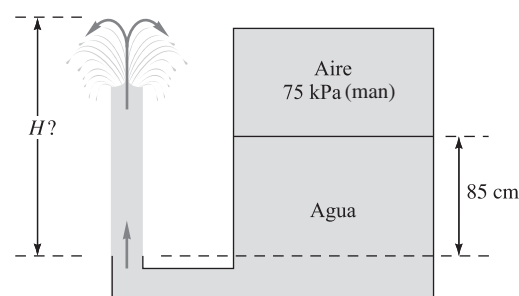
P3.152

- P3.153** Use la ecuación de Bernoulli para obtener una fórmula de la distancia X a la que el chorro del depósito de la Figura P3.153 llega al suelo, como función de h y H . ¿Para qué cociente h/H es máximo X ? Esquematice las tres trayectorias correspondientes a $h/H = 0.4, 0.5$ y 0.6 .



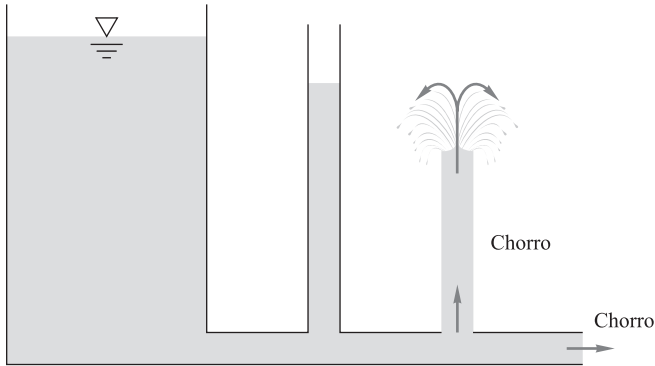
P3.153

- P3.154** Del depósito presurizado de la Figura P3.154 sale agua en forma de chorro vertical. Suponga flujo sin fricción y estacionario y determine la altura H que alcanzará el chorro.



P3.154

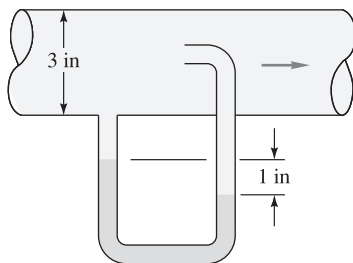
P3.155 El tratado de *hidrodinámica* de Bernoulli, de 1738, contiene muchos esquemas excelentes de flujos relacionados con su relación sin fricción. Uno de ellos, representado en la Figura P3.155, parece físicamente erróneo. ¿Podría explicar dónde puede estar el error?



P3.155

P3.156 Extienda el problema P3.13 como sigue: (a) use la ecuación de Bernoulli para estimar la elevación de la superficie del agua sobre la salida de la parte inferior del cono. (b) Después calcule el tiempo requerido para que la superficie del agua baje 20 cm en el depósito cilíndrico. Suponga que el nivel inicial sobre la salida es 52 cm. Desprecie la posible contracción y no uniformidad del chorro de salida mencionada en el Ejemplo 3.21.

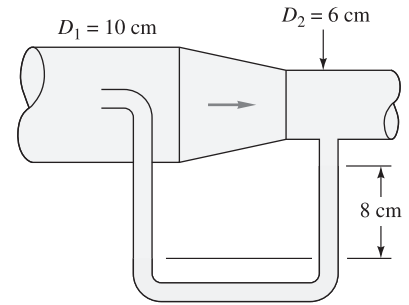
P3.157 El fluido de trabajo del manómetro de la Figura P3.157 es mercurio. Estime el gasto volumétrico en el tubo si el fluido que circula por él es (a) gasolina y (b) nitrógeno, a 20 °C y 1 atm.



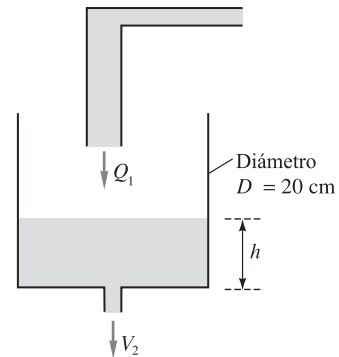
P3.157

P3.158 El fluido de la Figura P3.158 es CO_2 a 20 °C. Desprecie las pérdidas. Si $p_1 = 170$ kPa y el fluido del manómetro es aceite rojo Meriam ($\rho_r = 0.827$), estime (a) p_2 y (b) el caudal de gas en metros cúbicos por hora.

P3.159 El depósito cilíndrico de la Figura 3.159 se llena con un caudal $Q_1 = 1.0$ gal/min, a la vez que descarga por un orificio en su parte inferior de diámetro $d = 6$ mm. En $t = 0$, $h = 0$. Obtenga y dibuje $h(t)$ y la eventual profundidad máxima del agua $h_{\text{máx}}$. Suponga que la ecuación de Bernoulli para flujo estacionario es aplicable a este problema.

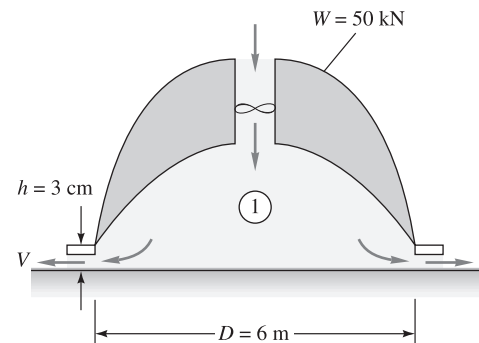


P3.158



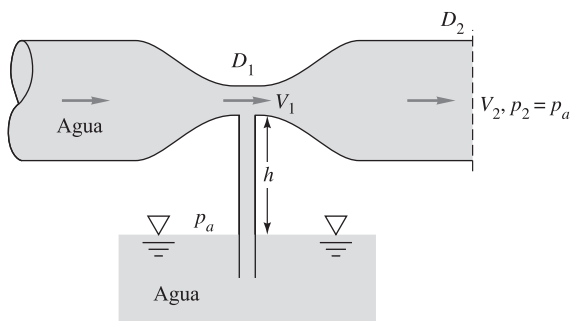
P3.159

P3.160 El overcraft de la Figura P3.160 toma aire estándar al nivel del mar a través de un ventilador y lo descarga a gran velocidad a través de unos faldones anulares que dejan un hueco de 3 cm con el suelo. Si el peso del vehículo es de 50 kN, estime (a) el caudal de aire requerido y (b) la potencia del ventilador en kilovatios.



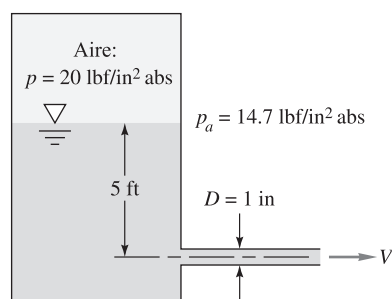
P3.160

P3.161 El estrechamiento de un conducto, denominado *venturi*, produce baja presión en la garganta, lo que le permite aspirar fluido de un depósito, como se muestra en la Figura P3.161. Mediante la ecuación de Bernoulli, obtenga una expresión para la mínima velocidad necesaria para llevar el fluido a la garganta.

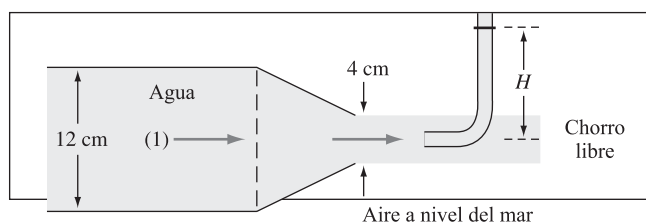
**P3.161**

P3.162 Supongamos que usted está diseñando una mesa de hockey sobre aire. La mesa tiene unas dimensiones de 3.0×6.0 ft y orificios de $1/16$ in de diámetro equiespaciados 1 in, con un número total de 2592. Se estima que la velocidad necesaria en los chorros es de 50 ft/s. Hay que dimensionar el ventilador necesario para cumplir con los requisitos antes mencionados. Estime el caudal (en ft^3/min) y el salto de presiones (en lb/in^2) que debe proporcionar el ventilador. (*Consejo:* Suponga que el aire está en reposo en un gran volumen debajo de la mesa y desprecie las pérdidas por rozamiento.)

P3.163 El líquido de la Figura P3.163 es queroseno a 20°C . Estime el caudal del depósito en el caso de que (a) no haya pérdidas y (b) la pérdidas en el conducto sean $h_f \approx 4.5V^2/(2g)$.

**P3.163**

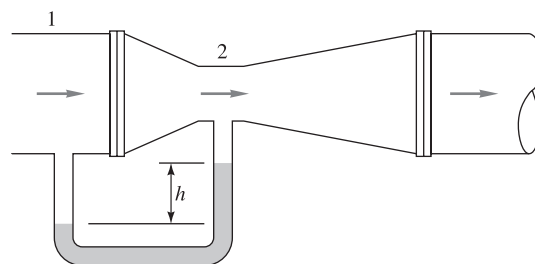
P3.164 En la Figura P3.164 se representa un chorro de agua a 20°C que descarga en aire al nivel del mar a través de una tobera, incidiendo sobre un tubo de remanso. Si la presión en el centro de la sección 1 es de 110 kPa y las pérdidas son despreciables, estime (a) el flujo másico en kg/s y (b) la altura H del fluido en el tubo de remanso.

**P3.164**

P3.165 El venturi calibrado de la Figura P3.165 es un estrechamiento diseñado cuidadosamente de forma que su diferencia de presiones es una medida del caudal en el conducto. Empleando la ecuación de Bernoulli para un flujo estacionario incompresible sin pérdidas, demuestre que el caudal Q está relacionado con la altura manométrica h a través de

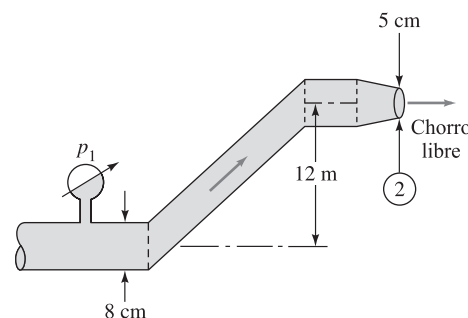
$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (D_2/D_1)^4}} \sqrt{\frac{2gh(\rho_M - \rho)}{\rho}}$$

donde ρ_M es la densidad del fluido del manómetro.

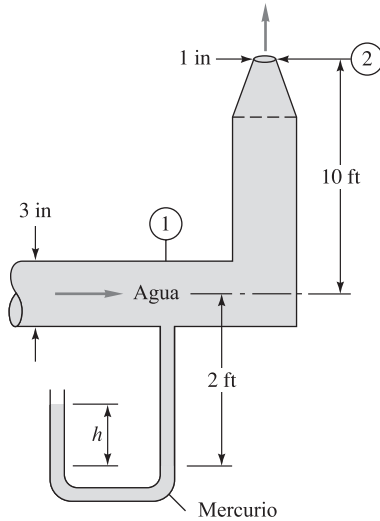
**P3.165**

P3.166 Un túnel de viento de circuito abierto toma aire estándar a nivel del mar y lo acelera a través de una contracción en una sección de ensayos de 1 m por 1 m. Un transductor diferencial instalado en la pared de la sección de ensayos mide una diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la pared de 45 mm de agua. Estime (a) la velocidad en la sección de ensayos en millas por hora y (b) la presión absoluta en el morro de un pequeño modelo montado en la sección de ensayos.

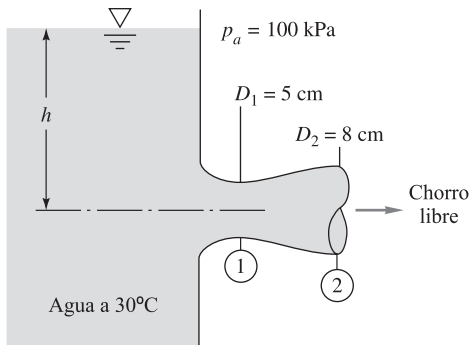
P3.167 El fluido de la Figura P3.167 es gasolina a 20°C que fluye con un caudal de peso de 120 N/s. Suponiendo que no hay pérdidas, estime la presión manométrica en la sección 1.

**P3.167**

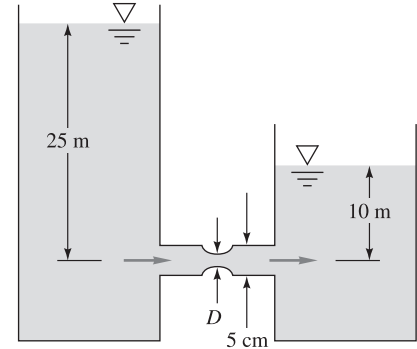
P3.168 Los dos fluidos de la Figura P3.168 están a 20°C . Si $V_1 = 1.7$ ft/s y se desprecian las pérdidas, ¿cuál debería ser la altura h en ft?


P3.168

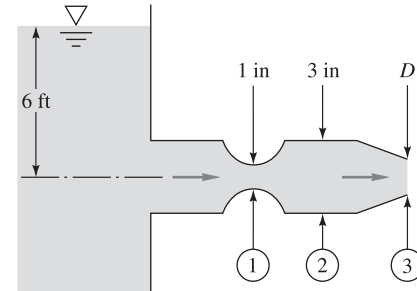
- P3.169** Extienda el análisis del sifón del Ejemplo 3.22 para tener en cuenta la fricción en el tubo, del modo siguiente. Suponga que las pérdidas por fricción se pueden cuantificar mediante la expresión $5.4(V_{\text{tubo}})^2/(2g)$, para un flujo turbulento en tubo de 2 m de longitud. Calcule la velocidad de salida en m/s y el caudal en cm^3/s y compare el resultado con el del Ejemplo 3.22.
- P3.170** Si se desprecian las pérdidas en el flujo de la Figura P3.170, ¿cuál es el nivel del agua h en el que la garganta de la tobera comenzará a cavitación?


P3.170

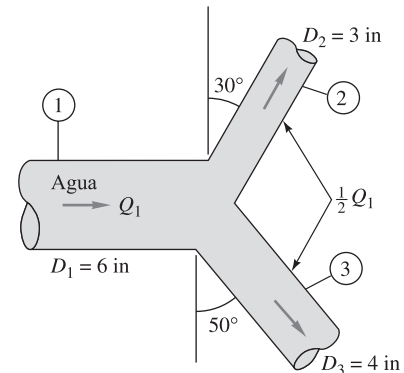
- *P3.171** Estime el caudal de agua a 40 °C que existe en el conducto de la Figura P3.171, suponiendo que no existen pérdidas. Explique entonces dónde está el error en la hipótesis anterior. Si el caudal real es $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$, calcule (a) la pérdida de carga en pies y (b) el diámetro del estrechamiento D para el que se produce cavitación, suponiendo que a cada lado de la garganta se producen pérdidas de carga iguales y que las pérdidas en el estrechamiento son despreciables.


P3.171

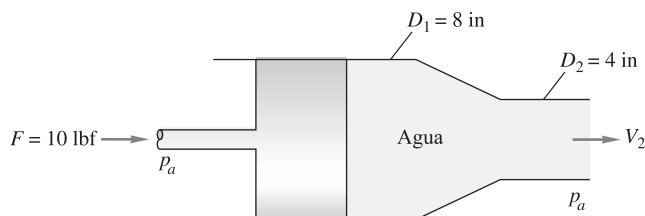
- P3.172** El flujo de agua a 35 °C de la Figura P3.172 descarga en atmósfera estándar a nivel del mar. Si se desprecian las pérdidas, ¿cuál es el diámetro D para el que comenzará a producirse la cavitación? Para evitar esta cavitación, ¿se debería incrementar o disminuir D con respecto a este valor crítico?


P3.172

- P3.173** La “Y” horizontal de la Figura P3.173 divide el flujo de agua a 20 °C en dos caudales iguales. Si $Q_1 = 5 \text{ ft}^3/\text{s}$, $p_1 = 25 \text{ lbf}/\text{in}^2$ (manométrica) y se desprecian las pérdidas, estime (a) p_2 , (b) p_3 y (c) el vector fuerza necesario para sujetar la Y.

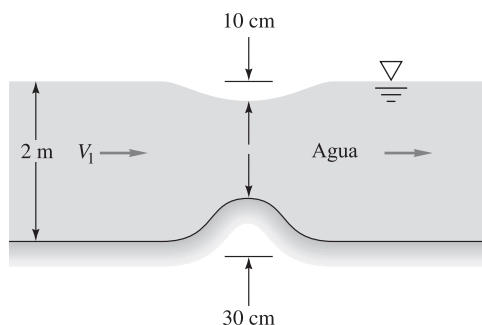

P3.173

- P3.174** El pistón de la Figura P3.174 impulsa agua a 20 °C. Si se desprecian las pérdidas, estime la velocidad en la salida V_2 en pies por segundo. Si D_2 es un estrechamiento posterior, ¿cuál es el máximo valor posible para V_2 ?



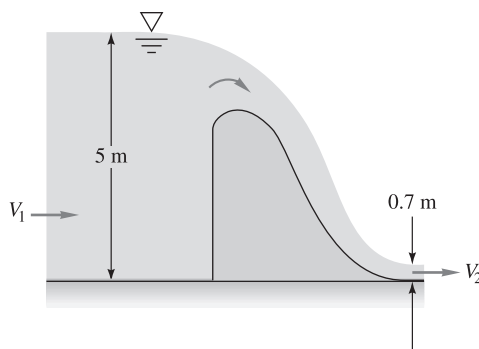
P3.174

- P3.175** Si la velocidad del flujo en un canal no es muy grande, un obstáculo en su fondo produce una disminución Δh del nivel del agua. En la Figura P3.175 se presenta un caso en el que $\Delta h = 10$ cm cuando el obstáculo tiene una altura de 30 cm. ¿Cuál es el caudal Q_1 por unidad de anchura del canal? ¿Es, en general, Δh proporcional a Q_1 ?



P3.175

- P3.176** El flujo del aliviadero de la Figura P3.176 se asume uniforme e hidrostático entre las secciones 1 y 2. Si se desprecian las pérdidas, calcule (a) V_2 y (b) la fuerza del agua sobre el rebosadero por unidad de anchura. Despreciando las pérdidas y suponiendo un flujo uniforme entre las secciones 1 y 2, calcule la profundidad h_2 aguas abajo y demuestre que son posibles *dos* soluciones realistas.

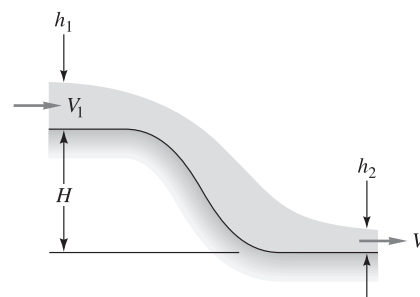


P3.176

P3.177



Las características del flujo del canal de la Figura P3.177 son: $h_1 = 1.5$ m, $H = 4$ m y $V_1 = 3$ m/s. Despreciando las pérdidas y suponiendo un flujo uniforme entre las secciones 1 y 2, calcule la profundidad h_2 aguas abajo y demuestre que son posibles *dos* soluciones realistas.

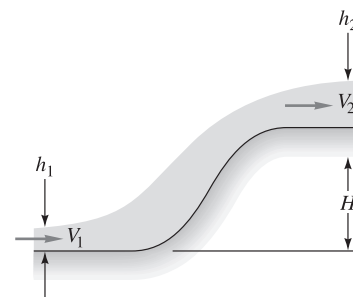


P3.177

P3.178



Las características del flujo del canal de la Figura P3.178 son: $h_1 = 0.45$ ft, $H = 2.2$ ft y $V_1 = 16$ ft/s. Despreciando las pérdidas y suponiendo un flujo uniforme entre las secciones 1 y 2, calcule la profundidad h_2 aguas abajo y demuestre que son posibles *dos* soluciones realistas.



P3.178

*P3.179

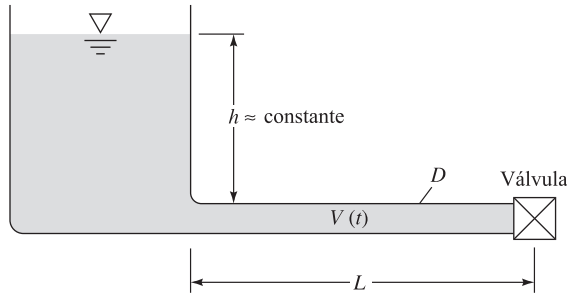
Un depósito cónico de diámetro D contiene líquido hasta una altura inicial h_0 . En el instante $t = 0$ se quita de su fondo un pequeño tapón de diámetro d . Obtenga, empleando la ecuación de Bernoulli sin pérdidas, (a) una ecuación diferencial para la altura de la superficie libre $h(t)$ durante la descarga y (b) una expresión para el tiempo t_0 necesario para vaciar el depósito.

*P3.180

El depósito de la Figura P3.180 contiene un fluido incompresible que se encuentra en reposo cuando su válvula se abre a la atmósfera. Suponiendo que $h \approx$ constante (velocidades y aceleraciones despreciables en el depósito), use la ecuación de Bernoulli sin rozamiento para obtener y resolver una ecuación diferencial para $V(t)$ en el conducto.

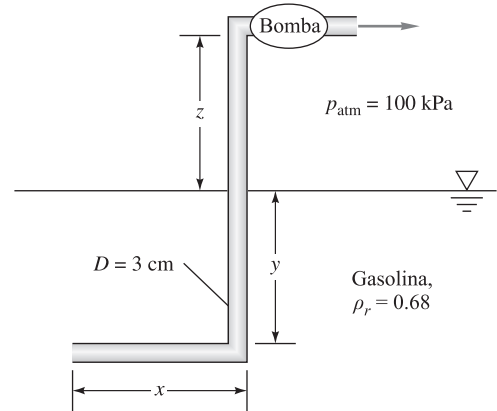
*P3.181

Modifique el Problema P3.180 suponiendo que la parte superior del depósito está cerrada y se encuentra a una presión manométrica constante p_0 . Repita el análisis para encontrar $V(t)$ en el conducto.

**P3.180**

P3.182 La forma incompresible de la ecuación de Bernoulli (3.77) sólo es precisa cuando el número de Mach es inferior a 0.3. A velocidades superiores se deben tener en cuenta las variaciones de densidad. La hipótesis más común para fluidos compresibles es considerar el *flujo isoentrópico de un gas ideal*, o $p = Cp^k$, donde $k = c_p/c_v$. Sustituya esta relación en la Ecuación (3.75), intégrelela y elimine la constante C . Compare los resultados compresibles con la Ecuación (3.77) y coméntelos.

P3.183 La bomba de la Figura P3.183 extrae gasolina a 20 °C de un depósito. Se pueden producir problemas en la bomba si el líquido llega a vaporizarse (cavita) antes de entrar en ella. (a) Despreciando las pérdidas y suponiendo un caudal de 65 gal/min, encuentre las limitaciones en (x, y, z) para evitar la cavitación. (b) ¿Qué otras limitaciones podrían ser importantes si se incluyen las pérdidas por fricción?

**P3.183**

P3.184 En el sistema del Problema P3.183, la bomba proporciona 65 gal/min a la atmósfera a través de un conducto de 3 cm de diámetro sin cavitación cuando $x = 3$ m, $y = 2.5$ m y $z = 2$ m. Si la pérdida de carga por fricción es $h_{\text{pérd}} \approx 3.7(V^2/2g)$, donde V es la velocidad media en el conducto, estime la potencia necesaria para mover la bomba.

P3.185

Un flujo de agua a 20 °C se mueve por un conducto cónico vertical a 163 m³/h. El diámetro de la entrada es de 12 cm y se reduce linealmente en 3 mm por cada 2 m de elevación. Si se considera un flujo sin rozamiento y la presión en la entrada es de 400 kPa, ¿a qué altura la presión del fluido será de 100 kPa?

Problemas conceptuales

- C3.1** Obtenga una forma de volumen de control para la *segunda* ley de la termodinámica. Sugiera algunos usos prácticos de esta relación en el análisis de flujos reales.
- C3.2** Se desea estimar el caudal Q en un conducto midiendo la velocidad axial $u(r)$ en ciertos puntos. Por motivos de coste, sólo se puede realizar medidas en *tres* puntos. ¿Cuál es la mejor distribución radial de estos puntos?
- C3.3** Se considera el flujo de agua por gravedad a través de un conducto corto que conecta dos depósitos cuyas superficies tienen una diferencia de altura Δz . ¿Por qué la ecuación de Bernoulli incompresible produce resultados absurdos al calcular el caudal en el conducto? ¿Tiene esta paradoja algo que ver con que el conducto es corto? ¿Desaparece la paradoja si se redondean la entrada y la salida del conducto?
- C3.4** Use la ecuación de la energía para flujo estacionario para analizar el flujo de agua a través de un grifo cuya presión de suministro es p_0 . ¿Qué mecanismo físico

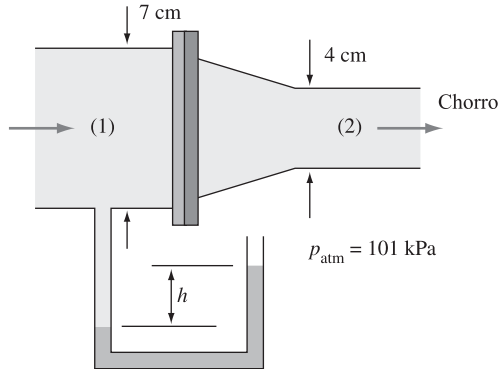
hace que el flujo varíe desde cero a un máximo al abrir la válvula del grifo?

- C3.5** Se considera un conducto de desagüe parcialmente lleno de agua, inclinado un ángulo θ . Antoine Chézy determinó en 1768 que la velocidad media del flujo en un canal de este tipo debería ser $V \approx C\sqrt{R \tan \theta}$, donde R es el radio del conducto y C es una constante. ¿Cómo se relaciona esta famosa fórmula con la ecuación de la energía para flujo estacionario aplicada a una longitud L de este canal?
- C3.6** Coloque una pelota de tenis de mesa en un embudo y conecte la parte estrecha del embudo a un ventilador. Probablemente no sea capaz de soplar la pelota fuera del embudo. Explique cuál es la razón.
- C3.7** ¿Cómo trabaja un *sifón*? ¿Hay limitaciones, tales como lo alto o bajo que se puede extraer agua de un depósito mediante un sifón? ¿Hasta cuándo es posible emplear un tubo flexible para llevar agua de un depósito hasta un punto situado a 100 ft de distancia?

Problemas del examen de fundamentos de ingeniería

FE3.1 En la Figura FE3.1 se presenta una tobera por la que sale agua a una presión atmosférica de 101 kPa. Si el caudal es de 160 gal/min, ¿cuál es la velocidad media en la sección 1?

- (a) 2.6 m/s; (b) 0.81 m/s; (c) 93 m/s; (d) 23 m/s;
(e) 1.62 m/s



FE3.1

FE3.2 En la Figura FE3.1 se presenta una tobera por la que sale agua a una presión atmosférica de 101 kPa. Si el caudal es de 160 gal/min y se desprecia la fricción, ¿cuál es la presión manométrica en la sección 1?

- (a) 1,4 kPa; (b) 32 kPa; (c) 43 kPa; (d) 29 kPa;
(e) 123 kPa

FE3.3 En la Figura FE3.1 se presenta una tobera por la que sale agua a una presión atmosférica de 101 kPa. Si la velocidad en la salida es $V_2 = 8$ m/s y se desprecia la fricción, ¿cuál es la fuerza axial que se necesita para mantener la tobera unida al conducto 1?

- (a) 11 N; (b) 56 N; (c) 83 N; (d) 123 N; (e) 110 N

FE3.4 En la Figura FE3.1 se presenta una tobera por la que sale agua a una presión atmosférica de 101 kPa. Si el fluido del manómetro tiene una densidad relativa de 1.6 y $h = 66$ cm, despreciando la fricción, ¿cuál es la velocidad media en la sección 2?

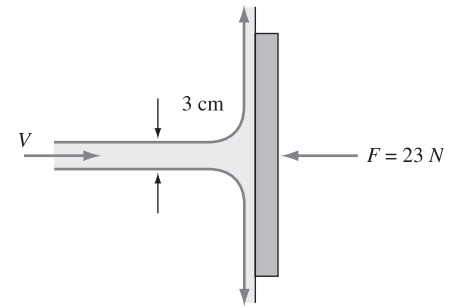
- (a) 4.55 m/s; (b) 2.4 m/s; (c) 2.95 m/s; (d) 5.55 m/s;
(e) 3.4 m/s

FE3.5 Un chorro de agua de 3 cm de diámetro incide perpendicularmente sobre una placa, como se muestra en la Figura FE3.5. Si la fuerza requerida para mantener la placa es de 23 N, ¿cuál es la velocidad del chorro?

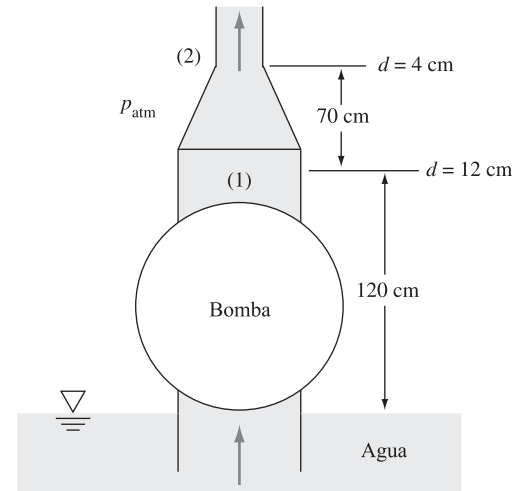
- (a) 2.85 m/s; (b) 5.7 m/s; (c) 8.1 m/s; (d) 4.0 m/s;
(e) 23 m/s

FE3.6 Una bomba de bomberos proporciona agua a una tobera vertical con una relación de diámetros de 3:1, como se muestra en la Figura FE3.6. Si se desprecia la fricción y el caudal es de 500 gal/min, ¿qué altura alcanzará el chorro de agua?

- (a) 2.0 m; (b) 9.8 m; (c) 32 m; (d) 64 m; (e) 98 m



FE3.5



FE3.6

FE3.7 Una bomba de bomberos proporciona agua a una tobera vertical con una relación de diámetros de 3:1, como se muestra en la Figura FE3.6. Si se desprecia la fricción y la bomba aumenta la presión de la sección 1 hasta 51 kPa (manométrica), ¿cuál será el caudal resultante?

- (a) 187 gal/min; (b) 199 gal/min; (c) 214 gal/min;
(d) 359 gal/min; (e) 141 gal/min

FE3.8 Una bomba de bomberos proporciona agua a una tobera vertical con una relación de diámetros de 3:1, como se muestra en la Figura FE3.6. Si se desprecia la fricción en el conducto y la tobera, y la bomba proporciona una carga de 12.3 ft al flujo, ¿cuál será el caudal en la salida?

- (a) 85 gal/min; (b) 120 gal/min; (c) 154 gal/min;
(d) 217 gal/min; (e) 285 gal/min

FE3.9 Por el interior de un conducto liso de 6 cm de diámetro circula agua que entra en un venturi con un diámetro en la garganta de 3 cm. La presión aguas arriba es de 120 kPa. Si se produce cavitación en la garganta cuando el caudal es de 155 gal/min, ¿cuál es la presión de vapor del fluido, suponiendo flujo sin fricción?

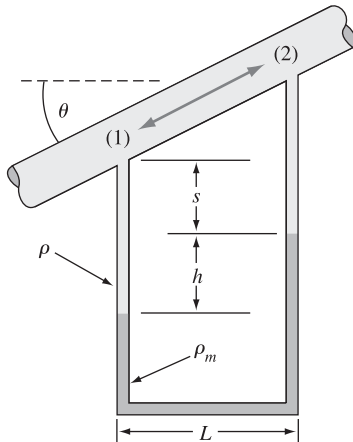
- (a) 6 kPa; (b) 12 kPa; (c) 24 kPa; (d) 31 kPa;
(e) 52 kPa

FE3.10 Por el interior de un conducto liso de 6 cm de diámetro circula agua que entra en un venturi con un diámetro en la garganta de 4 cm. La presión aguas arriba es de 120 kPa. Si la presión en la garganta es de 50 kPa, ¿cuál es el caudal, suponiendo flujo sin fricción?

(a) 7.5 gal/min; (b) 236 gal/min; (c) 263 gal/min;
(d) 745 gal/min; (e) 1053 gal/min

Problemas extensos

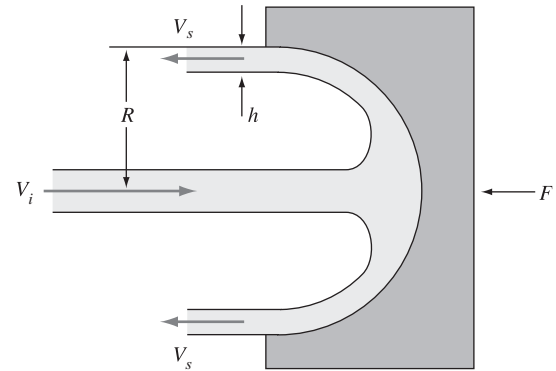
PE3.1 En un proceso industrial determinado, por el interior del conducto inclinado de la Figura PE3.1 circula aceite de densidad ρ . Un manómetro de tubo en U, con un fluido de densidad ρ_m , mide la diferencia de presiones entre los puntos 1 y 2, como se muestra en la figura. El flujo en el conducto es estacionario, de forma que los fluidos en el manómetro son estacionarios. (a) Encuentre una expresión analítica para $p_1 - p_2$ en función de los parámetros del sistema. (b) Discutir qué condiciones de h son necesarias para que no exista flujo en el conducto. (c) ¿Qué condiciones para que exista flujo hacia arriba, de 1 a 2? (d) ¿Qué condiciones para que exista flujo hacia abajo, de 2 a 1?



PE3.1

PE3.2 Un depósito rígido de volumen $\mathcal{V} = 1.0 \text{ m}^3$ está inicialmente lleno de aire a 20°C y $p_0 = 100 \text{ kPa}$. En el instante $t = 0$, una bomba de vacío se conecta para sacar el aire a un caudal constante de $Q = 80 \text{ L/min}$ (con independencia de la presión). Suponga que el gas es ideal y el proceso isotermo. (a) Obtenga una ecuación diferencial para este flujo. (b) Resuelva esta ecuación en t como función de (\mathcal{V}, Q, p, p_0) . (c) Calcule el tiempo en minutos necesario para que se reduzca la presión del depósito hasta $p = 20 \text{ kPa}$. (Consejo: La respuesta debe estar entre 15 y 25 min.)

PE3.3 Suponiendo que el mismo chorro estacionario de agua del Problema P3.40 (velocidad del chorro 8 m/s y diámetro del chorro 10 cm) incide en una cavidad como la de la Figura PE3.3. El agua gira 180° y sale, como consecuencia de la fricción, a una velocidad inferior $V_s = 4 \text{ m/s}$. (Mirando desde la izquierda, el chorro de salida tiene forma de anillo circular de radio R y espesor h , que fluye hacia la izquierda.) La cavidad tiene un radio de curvatura de 25 cm. Determine (a) el espesor h del chorro de salida y (b) la fuerza F requerida para mantener quieta la cavidad. (c) Compare el apartado (b) con el Problema P3.40, donde $F \approx 500 \text{ N}$, y dé una explicación física de por qué ha cambiado F .

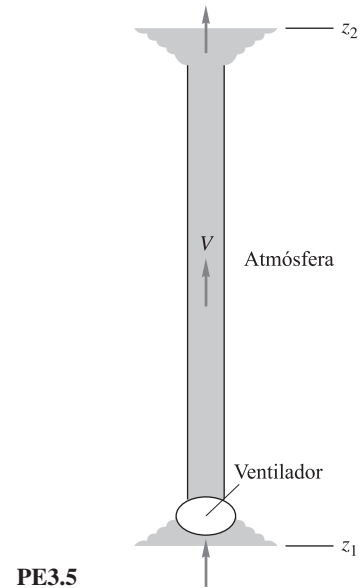


PE3.3

PE3.4 El flujo de aire que se da bajo un disco de hockey sobre aire es muy complejo, especialmente porque los chorros de aire de la mesa inciden sobre el disco en puntos no simétricos. Una aproximación razonable es que en cualquier instante la presión manométrica en la base del disco es la media entre cero (la presión atmosférica) y la presión de remanso de los chorros. (La presión de remanso se define como $p_0 = \frac{1}{2} \rho V_{\text{chorro}}^2$.) (a) Encuentre la velocidad del chorro V_{chorro} que se requiere para mantener en el aire un disco con un peso W y diámetro d . Dé la respuesta en función de W , d y la densidad del aire ρ . (b) Estime la velocidad requerida del chorro en pies por segundo cuando $W = 0.05 \text{ lbf}$ y $d = 2.5 \text{ in}$.

PE3.5 Despreciar la fricción a veces da lugar a resultados erróneos. Se pide que analice y discuta el ejemplo de la Figura PE3.5. Un ventilador sopla aire en un conducto desde la sección 1 a la sección 2, como se muestra en la

figura. Suponga que la densidad del aire ρ es constante. Despreciando las pérdidas por fricción, encuentre una relación entre la carga requerida por el ventilador h_b y el caudal y el cambio de altura. Explique el resultado.



Problemas de diseño

D3.1 Generalicemos los Problemas P3.141 y P3.142, en los que se usó la curva característica de una bomba para determinar el caudal entre dos depósitos. La bomba particular de la Figura P3.142 pertenece a una familia de bombas de geometría semejante, cuyas actuaciones adimensionales son :

Carga:

$$\phi \approx 6.04 - 161\zeta \quad \phi = \frac{gh}{n^2 D_b^2} \quad \text{y} \quad \zeta = \frac{Q}{n D_b^3}$$

Rendimiento:

$$\eta \approx 70\zeta - 91,500\zeta^3 \quad \eta = \frac{\text{potencia entregada al agua}}{\text{potencia absorbida}}$$

donde h_b es el aumento de carga de la bomba (ft), n es la velocidad de rotación del eje (rev/s) y D_b es el diámetro del rotor (ft). El rango de validez es $0 < \zeta < 0.027$. La bomba de la Figura P3.142 tenía $D_b = 2$ ft de diámetro y giraba a $n = 20$ rev/s (1200 rpm). La solución del Problema P3.142, $Q \approx 2.57$ ft³/s y $h_b \approx 172$ ft, corresponde a $\phi \approx 3.46$, $\zeta \approx 0.016$, $\eta \approx 0.75$ (o 75%) y la potencia del agua $= \rho g Q h_b \approx 27,500$ ft · lbf/s (50 hp). Compruebe estos valores antes de iniciar el proyecto.

Repita el Problema P3.142 para seleccionar una bomba de *bajo coste* que gire a una velocidad superior a 600 rpm y proporcione más de 1.0 ft³/s de agua. Suponga que el coste de la bomba es linealmente proporcional a la potencia de entrada requerida. Comente cualquier limitación de los resultados obtenidos.

Referencias

1. D. T. Greenwood and W. M. Greenfield, *Principles of Dynamics*, 2d ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1987.
2. T. von Kármán, *The Wind and Beyond*, Little, Brown, Boston, 1967.
3. J. P. Holman, *Heat Transfer*, 9th ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
4. A. G. Hansen, *Fluid Mechanics*, Wiley, New York, 1967.
5. M. C. Potter, D. C. Wiggert, and M. Hondzo, *Mechanics of Fluids*, Brooks/Cole, Chicago, 2001.
6. R. E. Sonntag, C. Borgnakke, and G. J. Van Wylen, *Fundamentals of Thermodynamics*, 6th ed., John Wiley, New York, 2002.
7. Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 2005.
8. J. D. Anderson, *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*, McGraw-Hill, New York, 1995.