

Las incertidumbres experimentales en un cierto experimento son las siguientes: $D = 0,5$ por 100, $\Delta p = 2,0$ por 100, $\rho = 1,0$ por 100, $Q = 3,5$ por 100 y $L = 0,4$ por 100. Estime la incertidumbre total del factor de fricción.

Solución

El coeficiente $1/8$ es un número puro, luego no tiene ninguna incertidumbre. El efecto de la incertidumbre de las demás variables puede deducirse usando las Ecuaciones (1.43) y (1.44):

$$U = \frac{bf}{f} = \left[\frac{\frac{1}{2} \frac{bD\gamma^2}{D}}{\frac{1}{8}} + \frac{\frac{1}{2} \frac{b6p\gamma^2}{6p}}{\frac{1}{8}} + \frac{\frac{1}{2} \frac{bl\gamma^2}{l}}{\frac{1}{8}} + \frac{\frac{1}{2} \frac{bQ\gamma^2}{Q}}{\frac{1}{8}} + \frac{\frac{1}{2} \frac{bL\gamma^2}{L}}{\frac{1}{8}} \right]^{1/2} \mu \\ = [\{5(0,5\%) \}^2 + (2,0\%)^2 + (1,0\%)^2 + \{2(3,5\%) \}^2 + (0,4\%)^2]^{1/2} \quad 5,78\% \quad \text{Resp.}$$

Claramente, el efecto dominante en este cálculo particular es el error del 3,5 por 100 en Q , que se amplifica al doble debido a la potencia de 2 que afecta al caudal. La incertidumbre en el diámetro, que se multiplica por cinco, hubiera tenido un peso mayor aún de haber sido δD superior al 0,5 por 100.

1.12. EL EXAMEN DE FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA (FE)

En Estados Unidos, el camino que conduce a la licencia de ingeniero profesional tiene una primera parada, el Examen de Fundamentos de Ingeniería (FE, *Fundamentals of Engineering*), conocido en el pasado como el Examen de Ingeniero en Prácticas (E-I-T, *Engineer-in-Training*). En un futuro próximo este examen nacional, de ocho horas de duración, será probablemente un requisito que deban pasar todos los estudiantes graduados en ingeniería, no sólo para obtener la licencia, sino como una herramienta para evaluar a los propios estudiantes. La sesión matinal, que consta de 120 problemas, cubre numerosas disciplinas de carácter general:

Química	Informática	Dinámica
Circuitos Eléctricos	Economía de la Ingeniería	Mecánica de Fluidos
Ciencia de Materiales	Matemáticas	Resistencia de Materiales
Estática	Termodinámica	Ética

En la sesión de la tarde se puede elegir entre ingeniería química, civil, eléctrica, industrial o mecánica, o bien elegir otro bloque de problemas de carácter general en otras disciplinas. Como puede verse, la *Mecánica de Fluidos* constituye una de las disciplinas centrales del examen FE. Por este motivo, en este libro se han incluido un cierto número de problemas FE en aquellos capítulos donde resultan más apropiados.

Las preguntas del examen FE son de tipo test, normalmente con cinco opciones, elegidas cuidadosamente para tentar a aquellos que hayan usado unidades incorrectas, olvidado multiplicar o dividir por dos en algún sitio, olvidado un factor de $1/8$, o cosas así. En algunos casos, la ambigüedad de las opciones no es intencionada, como ocurre en el siguiente ejemplo tomado de un examen real:

La transición de flujo laminar a turbulento ocurre a un número de Reynolds de
 (a) 900 (b) 1200 (c) 1500 (d) 2100 (e) 3000

La respuesta «correcta» era la (d), $Re = 2100$. En este caso el examinador estaba pensando, pero olvidó especificar, en el valor del Reynolds crítico Re_c para el *flujo en un conducto circular de paredes lisas*, pues (véase Capítulos 6 y 7) la transición es muy dependiente de la geometría, la rugosidad superficial y la longitud característica usada en la definición de Re . Lo ideal es no ponerse nervioso durante el examen y dejarse llevar por la corriente (valga el juego de palabras) para decidir qué respuesta encaja mejor en el contexto de un examen a nivel no graduado. En este libro se ha hecho todo lo posible por evitar la ambigüedad en las preguntas del examen FE.

1.13. TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

El análisis de los flujos genera una gran cantidad de problemas, ¡sólo en este libro hay unos 1600! Para resolver estos problemas, uno debe manejar ecuaciones, datos, tablas, hipótesis, sistemas de unidades y números. El autor recomienda seguir los siguientes pasos a la hora de resolver un problema:

1. Reúna los parámetros y los datos del problema en un mismo lugar.
2. Obtenga, usando tablas o gráficos, todas las propiedades necesarias de los fluidos: ρ , μ , c_p , k , γ y demás.
3. Utilice unidades SI (N, s, kg, m) si es posible, con lo que no harán falta factores de conversión.
4. Entienda bien lo que *preguntan*. A menudo los estudiantes responden a preguntas incorrectas; por ejemplo, dan el flujo másico en lugar del flujo volumétrico, la presión en lugar del gradiente de presión, la resistencia en lugar de la sustentación. Se supone que los ingenieros saben leer cuidadosamente.
5. Haga un esquema detallado del sistema, indicando todo con claridad.
6. Piense cuidadosamente y a continuación enumere las *hipótesis* de trabajo. En este caso, saber es poder; no se debe adivinar la respuesta. Uno debe ser capaz de decidir correctamente si el flujo se puede considerar estacionario o no estacionario, compresible o incompresible, unidimensional o multidimensional, viscoso o no viscoso; y si basta un análisis de volumen de control o es necesario recurrir a las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.
7. A partir de la información recopilada en los pasos 1 a 6, escriba las ecuaciones, correlaciones de datos y relaciones de estado que gobiernan los fluidos que intervienen en el problema en cuestión. Si la solución puede obtenerse algebraicamente, calcule lo que le *pidan*. Si las ecuaciones son más complicadas (no lineales, o demasiado numerosas, por ejemplo), utilic el Resolvedor de Ecuaciones de Ingeniería (EES).
8. Escriba la solución con claridad, indicando las unidades apropiadas y usando un número de cifras significativas (normalmente dos o tres) adecuado a la incertidumbre de los datos.

Los ejemplos de este libro seguirán siempre estos pasos.

1.14. HISTORIA Y PERSPECTIVA DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

Como la mayor parte de las ciencias, la Mecánica de Fluidos tiene una historia de antecedentes lejanos aislados, después una época de descubrimientos fundamentales en los siglos XVIII y XIX y, finalmente, una época de «práctica actual», como denominamos a nuestros conocimientos ya bien establecidos. Las civilizaciones antiguas tenían conocimientos rudimentarios, pero suficientes para resolver algunos problemas. La navegación a vela y el regadío datan de tiempos prehistóricos. Los griegos introdujeron la información cuantitativa. Arquímedes y Herón de Alejandría postularon la ley del paralelogramo para la suma de vectores en el siglo tercero antes de Cristo. Arquímedes (285-212 AC) formuló las leyes de flotabilidad y las supo aplicar a cuerpos sumergidos, utilizando cierta forma de cálculo diferencial en su análisis. Los romanos construyeron multitud de acueductos en el siglo cuarto antes de Cristo, pero no dejaron escritos sobre los principios cuantitativos de sus diseños.

Hasta el Renacimiento hubo mejoras sustanciales en el diseño de naves, canales, conducciones de agua, etcétera, pero tampoco nos queda evidencia de los análisis realizados. Leonardo da Vinci (1452-1519) obtuvo la ecuación de la continuidad para flujos unidimensionales. Fue un excelente experimentalista y en sus notas nos dejó descripciones muy reales sobre chorros, olas, resaltos hidráulicos, formación de torbellinos y diseños de cuerpos de baja y alta resistencia (cuerpos fuselados y paracaídas). Un francés, Edme Mariotte (1620-1684), construyó el primer túnel aerodinámico y realizó diversas pruebas en él.

Pero el definitivo impulso se debe a Isaac Newton (1642-1727), que propuso las leyes generales del movimiento y la ley de resistencia viscosa lineal para los fluidos que hoy denominamos newtonianos. Los matemáticos del siglo XVIII (Daniel Bernoulli, Leonhard Euler, Jean D'Alembert, Joseph-Louis Lagrange y Pierre-Simon Laplace) obtuvieron soluciones a muchos problemas de flujos no viscosos. Euler desarrolló las ecuaciones diferenciales del movimiento de flujos incompresibles no viscosos, y posteriormente dedujo su forma integrada, que hoy conocemos como ecuación de Bernoulli. Utilizando estas ecuaciones, D'Alembert propuso su famosa paradoja: un cuerpo inmerso en un flujo no viscoso tiene resistencia nula. Estos brillantes resultados son deslumbrantes, pero en la práctica tienen pocas aplicaciones, porque la viscosidad siempre

juega un papel crucial. Los ingenieros de la época rechazaron estas teorías por irreales y desarrollaron la ciencia denominada *hidráulica*, que es esencialmente empírica. Experimentalistas como Chézy, Pitot, Borda, Weber, Francis, Hagen, Poiseuille, Darcy, Manning, Bazin y Wiesbach trabajaron en gran variedad de flujos como canales abiertos, resistencia de barcos, flujos en tuberías, olas y turbinas. La mayor parte de los datos eran utilizados sin tener en cuenta los fundamentos físicos de los flujos.

Al final del siglo XIX comenzó la unificación entre *hidráulicos* e *hidrodinámicos*. William Froude (1810-1879) y su hijo Robert (1846-1924) desarrollaron leyes para el estudio con modelos a escala; Lord Rayleigh (1842-1919) propuso la técnica del análisis dimensional; y Osborne Reynolds (1842-1912) publicó en 1883 su clásico experimento, mostrando la importancia de los efectos viscosos a través de un parámetro adimensional, el número de Reynolds, como se denomina hoy a dicho parámetro. Mientras tanto, la teoría de los flujos viscosos que había sido desarrollada por Navier (1785-1836) y Stokes (1819-1903), añadiendo los términos viscosos a las ecuaciones del movimiento, permanecía en el olvido debido a su dificultad matemática. Fue entonces, en 1904, cuando un ingeniero alemán, Ludwig Prandtl (1875-1953), publicó el artículo quizás más importante de la historia de la Mecánica de Fluidos. Según Prandtl, en los flujos de fluidos poco viscosos, como el aire y el agua, el campo fluido puede dividirse en dos regiones: una capa viscosa delgada, o *capa límite*, en las proximidades de superficies sólidas y entrefases donde los efectos viscosos son importantes, y una región exterior que se puede analizar con las ecuaciones de Euler y Bernoulli. La teoría de la capa límite ha demostrado ser la herramienta más importante en el análisis de los flujos. Las aportaciones esenciales a la Mecánica de Fluidos durante el siglo XX son diversos trabajos teóricos y experimentales de Prandtl y de sus dos principales colegas competidores, Theodore von Kármán (1881-1963) y Sir Geoffrey I. Taylor (1886-1975). La mayor parte de las contribuciones citadas en este breve resumen histórico serán expuestas detalladamente a lo largo del libro. Para una perspectiva más detallada se pueden consultar las Referencias 23 a 25.

Como la tierra está cubierta en un 75 por 100 por agua y en un 100 por 100 por aire, las posibilidades de la Mecánica de Fluidos son enormes y abarcan de alguna forma la totalidad de la actividad humana. Ciencias como la meteorología, la oceanografía o la hidrología versan sobre los flujos naturales, sin olvidar las implicaciones fluidomecánicas de la circulación sanguínea o la respiración. El transporte en general está relacionado con el movimiento de los fluidos, bien sea a través de la aerodinámica de los aviones y cohetes o de la hidrodinámica de barcos y submarinos. La casi totalidad de la energía eléctrica procede de turbinas hidráulicas o de vapor. Todos los problemas de combustión incluyen movimiento de fluidos, como también lo hacen las técnicas modernas de regadío, control de inundaciones, abastecimiento de agua, tratamiento de aguas residuales, movimiento de proyectiles y transporte de petróleo o gas por conductos. La finalidad de este libro es presentar los conceptos fundamentales y las aplicaciones prácticas de la Mecánica de Fluidos, para que el futuro ingeniero pueda adentrarse en cualquiera de los campos específicos señalados anteriormente y estar en condiciones de comprender los posibles desarrollos tecnológicos posteriores.

Problemas

La mayoría de los problemas propuestos aquí son bastante sencillos. Los más difíciles, o de final abierto, se indican con un asterisco, como en el Problema P1.18. Para resolver los problemas señalados con un ícono EES (por ejemplo, el Problema P1.7) se recomienda el uso del Resolvedor de Ecuaciones de Ingeniería

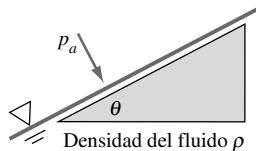
Distribución de los problemas

Sección	Tema	Problemas
1.1, 1.2, 1.3	Concepto de fluido como medio continuo	P1.1-P1.3
1.4	Dimensiones, unidades, dinámica	P1.4-P1.21
1.5	Campo de velocidades	P1.22-P1.23
1.6	Propiedades termodinámicas	P1.24-P1.37
1.7	Viscosidad; condición de no deslizamiento	P1.38-P1.61
1.7	Tensión superficial	P1.62-P1.71
1.7	Presión de vapor; cavitación	P1.72-P1.74
1.7	Velocidad del sonido; número de Mach	P1.75-P1.79
1.8, 1.9	Descripción del flujo, líneas de corriente, etc.	P1.80-P1.84
1.10	Historia de la Mecánica de Fluidos	P1.85

(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 P1.1 a P1.85 (ordenados por temas en la lista de abajo) están seguidos por los problemas del examen de fundamentos de ingeniería (FE, *Fundamentals of Engineering Exam*) FE1.1 a FE1.10 y los problemas extensos PE1.1 a PE1.8.

- P1.1** Un gas a 20 °C se puede considerar *rarificado*, desviándose de la hipótesis de medio continuo, cuando hay menos de 10^{12} moléculas por milímetro cúbico. Si el número de Avogadro es $6,023 \times 10^{23}$ moléculas por mol, ¿a qué presión absoluta (en Pa) corresponde este límite en el aire?
- P1.2** La Tabla A.6 proporciona la densidad de la atmósfera estándar en función de la altitud. Use dichos valores para estimar de forma aproximada —por ejemplo, con un error del ±50 por 100— el número de moléculas de aire que forman la atmósfera de la tierra.

- P1.3** Considere el elemento triangular de la Figura P1.3. Demuestre que la superficie libre *inclinada* de un líquido, en contacto con una atmósfera de gas a presión p_a , debe soportar esfuerzos cortantes y por tanto comenzar a fluir. *Consejo:* tenga en cuenta el peso del fluido y demuestre que una condición libre de esfuerzos cortantes conduce a un desequilibrio de fuerzas horizontales.

**P1.3**

- P1.4** Las cantidades viscosidad μ , velocidad V y tensión superficial γ pueden combinarse para formar un grupo adimensional. Encuentre la combinación que es proporcional a μ . Este grupo suele recibir un nombre que empieza por C . ¿Puede adivinar cuál es este nombre?

- P1.5** El *camino libre medio* de un gas, l , se define como la distancia media recorrida por sus moléculas entre colisiones. Una fórmula para estimar el valor de l para un gas ideal es

$$l = 1,26 \frac{\mu}{I \sqrt{RT}}$$

¿Qué dimensiones tiene la constante 1,26? Use la fórmula anterior para estimar el camino libre medio en aire a 20 °C y 7 kPa. ¿Considera que el aire en estas condiciones está rarificado?

- P1.6** Si p es la presión e y es una coordenada, establezca, en el sistema {MLT}, las dimensiones de las siguientes cantidades: (a) p/y , (b) $Qp dy$, (c) \sqrt{p}/y^2 y (d) ∇p .

- P1.7** Una pequeña aldea consume 1,5 acres · ft/día de agua de un depósito. Convierta este consumo medio de agua a (a) galones por minuto y (b) litros por segundo.

- P1.8** Supongamos que sabemos poco de resistencia de materiales pero que nos dicen que el esfuerzo flector σ en una viga es *proporcional* al semiespesor y de la viga y que también depende del momento flector M y del momento de inercia I de la sección de la viga. También nos dicen que, en el caso particular $M = 2900 \text{ in} \cdot \text{lbf}$, $y = 1,5 \text{ in}$ e $I = 0,4 \text{ in}^4$, el esfuerzo que predice la teoría es de 75 MPa. Usando esta información y el análisis dimensional únicamente, halle, con tres cifras significativas, la única fórmula dimensionalmente homogénea posible $\sigma = y f(M, I)$.

- P1.9** El *número adimensional de Galileo Ga* expresa la relación entre los efectos gravitatorios y los efectos viscosos en un flujo, combinando la densidad ρ , la aceleración de la gravedad g , la escala de longitud L y la viscosidad μ . Sin consultar ningún otro libro, halle la forma del número de Galileo sabiendo que g está en el numerador.

- P1.10** La fórmula de Stokes-Oseen [18] que determina la resistencia F que actúa sobre una esfera de diámetro D

que se desplaza lentamente en una corriente fluida con velocidad V , densidad ρ y viscosidad μ es

$$F = 3/\mu DV + \frac{9/16}{1} I V^2 D^2$$

¿Es esta fórmula dimensionalmente homogénea?

- P1.11** Los ingenieros suelen usar la siguiente fórmula para el caudal Q de un líquido que fluye a través de un agujero de diámetro D en la pared lateral de un tanque:

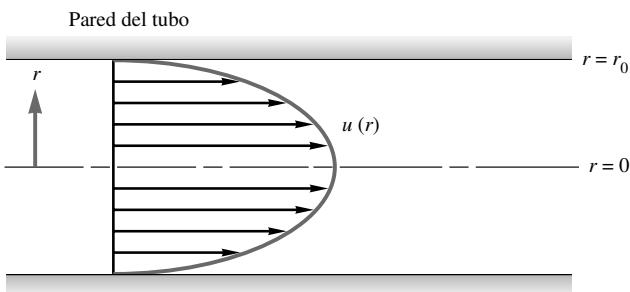
$$Q = 0,68 D^2 \sqrt{gh}$$

donde g es la aceleración de la gravedad y h es la altura de la superficie del líquido respecto al agujero. ¿Qué dimensiones tiene la constante 0,68?

- P1.12** En el flujo estacionario (laminar) a baja velocidad a través de un conducto circular, como se muestra en la Figura P1.12, la velocidad u varía con el radio según la expresión

$$u = B \frac{6p}{\mu} (r_0^2 - r^2)$$

donde μ es la viscosidad del fluido y Δp es la caída de presión entre la entrada y la salida. ¿Cuáles son las dimensiones de la constante B ?

**P1.12**

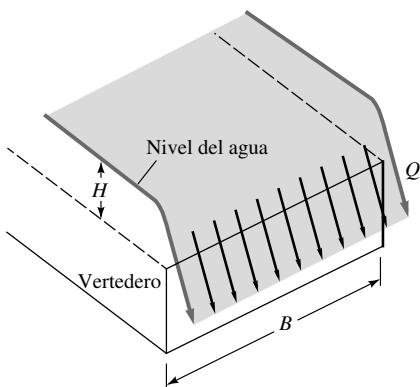
- P1.13** El rendimiento η de una bomba se define como la relación (adimensional) entre la potencia consumida por el flujo y la potencia requerida para accionar la bomba:

$$\eta = \frac{Q6p}{\text{potencia suministrada}}$$

donde Q es el caudal y Δp es la sobrepresión producida por la bomba. Suponga que una cierta bomba desarrolla una sobrepresión de 35 lbf/in² para un caudal de 40 L/s. Si la potencia consumida es de 16 hp, ¿cuál es el rendimiento?

- *P1.14** La Figura P1.14 representa el flujo sobre un vertedero. Se sabe que el caudal Q sólo depende de la anchura B del dique, la aceleración de la gravedad g , y la altura H

del agua sobre la cresta del vertedero aguas arriba. Se sabe también que Q es proporcional a B . ¿Qué forma tiene la única expresión dimensionalmente homogénea para el caudal?



P1.14

- P1.15** Como una aplicación práctica del flujo de la Figura P1.14, llamado vertedero de pared delgada, los ingenieros civiles utilizan la siguiente fórmula para el caudal: $Q \approx 3.3BH^{3/2}$, con Q en ft^3/s y B y H en pies. ¿Es esta formulación dimensionalmente homogénea? En caso contrario, explique la dificultad y cómo podría expresarse la fórmula de forma más homogénea.

- P1.16** Las ecuaciones algebraicas como la de Bernoulli, Ecuación (1) del Ejemplo 1.3, son dimensionalmente consistentes, pero ¿qué ocurre con las ecuaciones diferenciales físicas? Considere, por ejemplo, la ecuación de cantidad de movimiento de la teoría de la capa límite según el eje x , obtenida en primer lugar por Ludwig Prandtl en 1904:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial i}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial g_x}{\partial y}$$

donde τ es el esfuerzo cortante en la capa límite y g_x es la componente de la gravedad según el eje x . ¿Es esta ecuación dimensionalmente consistente? ¿Se puede generalizar este resultado?

- P1.17** Una fórmula muy común en hidráulica es la fórmula de Hazen-Williams para determinar el flujo volumétrico Q en una tubería de diámetro D y longitud L :

$$Q \approx 61,9 D^{2,63} \frac{\Delta p}{L} F^{0.54}$$

donde Δp es la caída de presión necesaria para mantener el flujo. ¿Cuáles son las dimensiones de la constante 61,9? ¿Puede aplicarse esta fórmula a diversos líquidos y gases?

- *P1.18** En el flujo de partículas pequeñas a baja velocidad, el primer término de la ley de resistencia de Stokes-Oseen, Problema P1.10, es el dominante; luego, $F \approx KV$, donde K es una constante. Consideremos una partícula

de masa m que se mueve horizontalmente desde su posición inicial $x = 0$ con velocidad inicial V_0 . Muestre (a) que la velocidad de la partícula decrece exponencialmente con el tiempo y (b) que la partícula se detiene después de desplazarse una distancia $x = mV_0/K$.

P1.19

La convección de Marangoni aparece cuando existen diferencias de tensión superficial a lo largo de una superficie libre. El número adimensional de Marangoni M es una combinación de la difusividad térmica $\alpha = k/(\rho c_p)$ (donde k es la conductividad térmica), la longitud característica L , la viscosidad μ , y la diferencia de tensión superficial δY . Obtenga la expresión para M sabiendo que es proporcional a L .

P1.20

Una pelota de béisbol, con $m = 145 \text{ g}$, se lanza hacia arriba desde su posición inicial $z = 0$ con $V_0 = 45 \text{ m/s}$. La resistencia que ejerce el aire sobre la pelota es CV^2 , donde $C \approx 0,0013 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$. Escriba una ecuación diferencial para el movimiento de la pelota, y resuélvala para obtener la velocidad instantánea $V(t)$ y la posición $z(t)$. Determine la altura máxima z_{\max} alcanzada por la pelota, y compare los resultados con los obtenidos cuando se desprecia la resistencia del aire.

P1.21

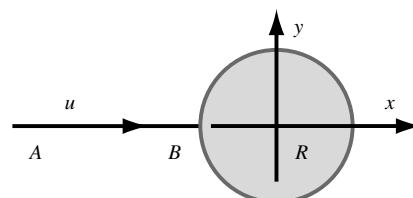
El número adimensional de Grashof Gr se obtiene combinando la densidad ρ , la viscosidad μ , la diferencia de temperaturas ΔT , la longitud característica L , la aceleración de la gravedad g y el coeficiente de expansión volumétrica β , definido por $\beta = (-1/\rho)(\rho, T)_p$. Obtenga la expresión para Gr sabiendo que este número es proporcional a g y a β .

*P1.22

De acuerdo con la teoría del Capítulo 8, cuando una corriente uniforme incide sobre un cilindro de radio R , la velocidad tiene una única componente a lo largo de la línea de simetría AB de la Figura P1.22:

$$u = U \frac{F}{\pi} \left(\frac{R^2}{x^2} \right)^{1/2} \quad \text{para } -R < x < R$$

donde U es la velocidad de la corriente lejos del cilindro. Usando las ideas del Ejemplo 1.5, determine (a) la máxima deceleración del flujo a lo largo de AB y (b) el punto en que se produce.



P1.22

P1.23

Experimente con el chorro de un grifo (de cocina o similar) para determinar los caudales típicos Q en m^3/h , midiendo por ejemplo el tiempo que se tarda en llenar un volumen conocido. Trate de obtener condiciones de descarga en las que el chorro sea (a) suave y redondo y (b) desordenado y fluctuante. Mida el diámetro del conducto de alimentación (mire debajo del fregadero). En ambos casos, calcule la velocidad media

del flujo, $V_{\text{med}} = Q/A_{\text{sección transversal}}$ y el número de Reynolds del flujo, $\text{Re} = \rho V_{\text{med}} D / \mu$. Comente los resultados.

- P1.24** Considere dióxido de carbono a 10 atm y 400 °C. Calcule los valores correspondientes de ρ y c_p y estime la nueva presión cuando el gas se enfriá isentrópicamente a 100 °C. Utilice dos métodos: (a) la hipótesis de gas ideal y (b) las tablas de gases o el software EES.

- P1.25** Un tanque contiene 0,9 m³ de helio a 200 kPa y 20 °C. Estime la masa total de este gas, en kg, (a) en la tierra y (b) en la luna. Calcule además (c) la cantidad de calor, en MJ, necesaria para expandir este gas a temperatura constante hasta alcanzar un volumen de 1,5 m³.

- P1.26** Cuando en los Estados Unidos se dice que el neumático de un coche está inflado «a 32 lb», significa que la presión interna es 32 lbf/in² superior a la presión atmosférica. Si el neumático se encuentra a nivel del mar, tiene un volumen de 3,0 ft³ y está a 75 °F, estime el peso total de aire, en lbf, contenido en el neumático. Según la Referencia 13, el volumen específico a distintas temperaturas del vapor de agua a 40 lbf/in² es el siguiente:

$T, {}^{\circ}\text{F}$	400	500	600	700	800
$v, \text{ft}^3/\text{lbfm}$	12,624	14,165	15,685	17,195	18,699

¿Se comporta el vapor de agua, en estas condiciones, como un gas perfecto, o tiene un comportamiento fuertemente no ideal? Si fuera razonablemente perfecto, obtenga mediante un ajuste de mínimos cuadrados[†] el valor de la constante de los gases R , en m²/(s² · K), estime el porcentaje de error de esta aproximación y compare con la Tabla A.4.

- P1.28** El aire húmedo de la atmósfera con un 100 por 100 de humedad relativa contiene vapor de agua saturado y, según la ley de Dalton de las presiones parciales,

$$P_{\text{atm}} = P_{\text{aire seco}} + P_{\text{vapor de agua}}$$

Supongamos que el aire atmosférico se encuentra a 40 °C y 1 atm. Calcule la densidad del aire húmedo con un 100 por 100 de humedad, y compárela con la densidad del aire seco en las mismas condiciones.

- P1.29** Un tanque de aire comprimido contiene 5 ft³ de aire a 120 lbf/in² por encima de la presión atmosférica. Estime la energía, en ft · lbf, necesaria para comprimir este aire desde las condiciones atmosféricas, suponiendo un proceso isotermo ideal.

- P1.30** Repita el Problema P1.29 si el tanque está lleno con agua comprimida en lugar de aire. ¿Por qué el resultado es miles de veces más pequeño que el resultado de 215.000 ft · lbf del Problema P1.29?

- *P1.31** La densidad del agua (dulce) a 1 atm, en el intervalo de temperaturas de 0 a 100 °C, se indica en la Tabla A.1. Ajuste estos valores mediante mínimos cuadrados[†] a una curva de la forma $\rho = a + bT + cT^2$, con T en °C, y estime el error cometido. Utilice la fórmula para cal-

cular la densidad del agua a 45 °C, y compare el resultado con el valor experimental de 990,1 kg/m³.

- P1.32** Un dirigible puede modelarse como un elipsoide de revolución de 90 m de largo y 30 m de diámetro. Estime el peso de gas contenido en un dirigible, a 20 °C, lleno de (a) helio a 1,1 atm y (b) aire a 1,0 atm. ¿Qué representa la diferencia entre estos dos valores (véase Capítulo 2)?

- *P1.33** La variación de la densidad del mercurio con la presión a 20 °C viene dada por los siguientes datos experimentales:

p, atm	1	500	1000	1500	2000
$\rho, \text{kg/m}^3$	13,545	13,573	13,600	13,625	13,653

Ajuste estos datos a la ecuación empírica de estado para líquidos, Ecuación (1.19), para obtener los valores más apropiados de los coeficientes B y n para el mercurio. A continuación, suponiendo que los datos son casi isentrópicos, utilice estos valores para estimar la velocidad del sonido del mercurio a 1 atm y compare con la Tabla 9.1.

- P1.34** Considere vapor de agua en el siguiente estado, próximo a la línea de saturación: $(p_1, T_1) = (1,31 \text{ MPa}, 290 \text{ }^{\circ}\text{C})$. Calcule y compare, para un gas ideal (Tabla A.4) y usando las tablas de vapor (o el programa EES), (a) la densidad ρ_1 y (b) la densidad ρ_2 si el vapor se expande isentrópicamente hasta una presión de 414 kPa. Discuta los resultados.

- P1.35** Como se observa en la Tabla A.4, la mayoría de los gases comunes (aire, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno) tienen una relación de calores específicos γ 5 1,40. ¿Por qué el argón y el helio tienen valores tan altos? ¿Por qué el NH₃ tiene un valor tan bajo? ¿Cuál es el valor más pequeño de γ entre los gases comunes que usted conozca?

- P1.36** El módulo de compresibilidad isentrópico B de un fluido se define como el cambio isentrópico de presión medido con el cambio relativo de densidad:

$$B = \frac{\frac{P}{P_1} - 1}{\frac{\rho}{\rho_1} - 1}$$

¿Cuáles son las dimensiones de B ? Usando relaciones $p(\rho)$ teóricas, estime el módulo de compresibilidad de (a) N₂O, suponiendo que se trata de un gas ideal, y (b) agua, a 20 °C y 1 atm.

- P1.37** Un gas casi-ideal tiene un peso molecular de 44 y un calor específico $c_v = 610 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$. ¿Cuál es (a) su relación de calores específicos, γ , y (b) su velocidad del sonido a 100 °C?

- P1.38** En la Figura 1.6, si el fluido es glicerina a 20 °C y el ancho entre las placas es de 6 mm, ¿qué esfuerzo cortante (en Pa) se requiere para mover la placa superior a una velocidad de 5,5 m/s? ¿Cuál es el número de Reynolds basado en la distancia L entre las placas?

- P1.39** A partir de la viscosidad μ del aire a 20 °C, dada por la Tabla 1.4, estime su viscosidad a 500 °C usando (a) la

[†] El concepto de «mínimos cuadrados» es muy importante y todo estudiante debería conocerlo.

ley potencial y (b) la ley de Sutherland. Estímela también usando (c) la Figura 1.5. Compare los resultados con el valor aceptado $\mu = 5,38 \times 10^{-5}$ kg/m · s.

- *P1.40** Una simplificación de la ley logarítmico-cuadrática para la viscosidad de un líquido en función de la temperatura, dada por la Ecuación (1.28), es la ecuación de Andrade [11], $\mu = A \exp(B/T)$, donde (A, B) son constantes obtenidas del ajuste de datos experimentales y T es la temperatura absoluta. Ajuste esta relación a los datos del agua de la Tabla A.1 y estime el porcentaje de error cometido en la aproximación.

- P1.41** La siguiente tabla muestra valores experimentales de la viscosidad del argón a 1 atm:

T, K	300	400	500	600	700	800
$\mu, \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	$2,27 \times 10^{-5}$	$2,85 \times 10^{-5}$	$3,37 \times 10^{-5}$	$3,83 \times 10^{-5}$	$4,25 \times 10^{-5}$	$4,64 \times 10^{-5}$

Ajuste estos valores mediante (a) una ley potencial y (b) la ley de Sutherland, Ecuación (1.30).

- P1.42** La siguiente tabla muestra valores experimentales de la viscosidad del helio a 1 atm:

T, K	200	400	600	800	1000	1200
$\mu, \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	$1,50 \times 10^{-5}$	$2,43 \times 10^{-5}$	$3,20 \times 10^{-5}$	$3,88 \times 10^{-5}$	$4,50 \times 10^{-5}$	$5,08 \times 10^{-5}$

Ajuste estos valores mediante (a) una ley potencial y (b) la ley de Sutherland, Ecuación (1.30).

- *P1.43** Yaws et al. [34] proponen la siguiente fórmula de ajuste para la viscosidad de líquidos orgánicos en función de la temperatura:

$$\log_{10} \mu = 5A + \frac{B}{T} + CT + DT^2$$

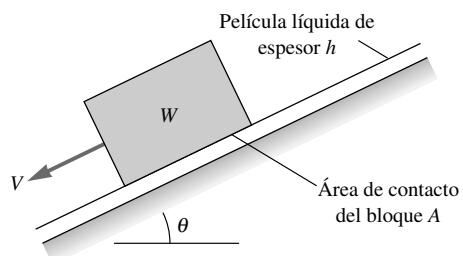
siendo T la temperatura absoluta. (a) ¿Se puede poner alguna objeción a esta fórmula desde un punto de vista dimensional? (b) Haciendo caso omiso de (a), indique cómo podrían obtenerse analíticamente las constantes de ajuste A, B, C y D a partir de N puntos experimentales (μ_i, T_i) usando el método de los mínimos cuadrados. No es necesario llevar a cabo ningún cálculo.

- P1.44** Los valores correspondientes al aceite SAE 30 de la Tabla 1.4 son estrictamente «representativos», no exactos, porque las propiedades de los aceites lubricantes varían considerablemente según el tipo de petróleo crudo del cual se han refinado. La Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE, Society of Automotive Engineers) [26] permite ciertos rangos de viscosidad cinemática para todos los aceites lubricantes: para el SAE 30, $9,3 < v < 12,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ a 100°C . La densidad del aceite SAE 30 también puede variar un ± 2 por 100 respecto al valor tabulado de 891 kg/m^3 . Consideremos los siguientes datos correspondientes a un aceite SAE 30 aceptable:

$T, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100
$\mu, \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	2,00	0,40	0,11	0,042	0,017	0,0095

¿Cómo es este aceite comparado con el de la Figura A.1 de los Apéndices? ¿Cómo de bien se ajustan los datos a la ecuación de Andrade del Problema 1.40?

- P1.45** Un bloque cuyo peso es W se desliza sobre un plano inclinado lubricado por una película de aceite, como se indica en la Figura P1.45. La superficie de contacto del bloque es A y el espesor de la película de aceite h . Suponiendo una distribución lineal de velocidad en el aceite, halle una expresión para la velocidad «límite» V del bloque.

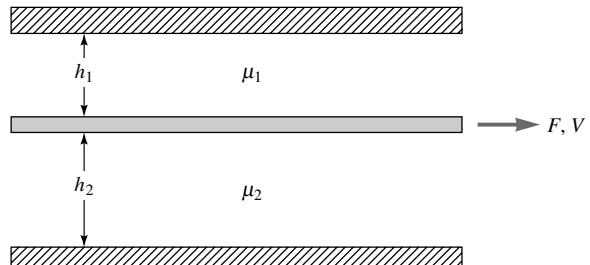


P1.45

Calcule la velocidad límite del bloque de la Figura P1.45 si la masa del mismo es 6 kg, $A = 35 \text{ cm}^2$, $\theta = 15^\circ$ y la película lubricante es de aceite SAE 30 a 20°C y tiene 1 mm de espesor.

- P1.47** Un eje de 6,00 cm de diámetro se aloja en una carcasa de 6,02 cm de diámetro y 40 cm de largo. La holgura, que se supone uniforme, está llena de un aceite de viscosidad $v = 0,003 \text{ m}^2/\text{s}$ y densidad relativa $S = 0,88$. Si el eje se mueve en dirección axial a $0,4 \text{ m/s}$, calcule la fuerza de resistencia producida por el aceite.

- P1.48** Una placa plana está separada de dos placas fijas por dos líquidos muy viscosos de viscosidades μ_1 y μ_2 , respectivamente, como muestra la Figura P1.48. Como puede verse, los espaciamientos entre las placas h_1 y h_2 son distintos. La placa central tiene un área de contacto A con cada fluido. (a) Suponiendo un perfil de velocidad lineal en ambos fluidos, halle la fuerza F requerida para mover la placa con velocidad V . (b) ¿Debe existir alguna relación entre las dos viscosidades μ_1 y μ_2 ?



P1.48

- P1.49** El número de aparatos comerciales y de laboratorio que se han desarrollado para medir la viscosidad de los fluidos es muy abundante, como se puede comprobar

en la Referencia 27. Consideremos un cilindro y un eje coaxial, como el del Problema 1.47, que en este caso tiene restringido el movimiento axial y gira dentro de la carcasa. Sean r_i y r_e los radios de los cilindros interior y exterior, respectivamente, L la longitud del cojinete, Ω (rad/s) la velocidad de giro y M el par motor aplicado. Usando estos datos, obtenga una expresión analítica para la viscosidad μ del fluido lubricante.

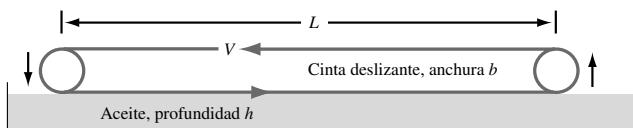
- P1.50** Una forma muy sencilla de medir la viscosidad es medir el tiempo t que tarda una esfera sólida en caer una distancia L a través de un fluido de ensayo de densidad ρ . La viscosidad μ del fluido viene entonces dada por

$$\mu \leq \frac{W_{\text{neto}}t}{3/DL} \quad \text{si } t > \frac{2/LD}{\mu}$$

donde D es el diámetro de la esfera y W_{neto} es el peso neto de la esfera dentro del fluido. (a) Demuestre que ambas fórmulas son dimensionalmente homogéneas. (b) Suponga que una esfera de aluminio (densidad 2700 kg/m³) de 2,5 mm de diámetro cae a través de un aceite de densidad 875 kg/m³. Si el tiempo que tarda en caer 50 cm es de 32 s, estime la viscosidad del aceite y verifique que se cumple la desigualdad anterior.

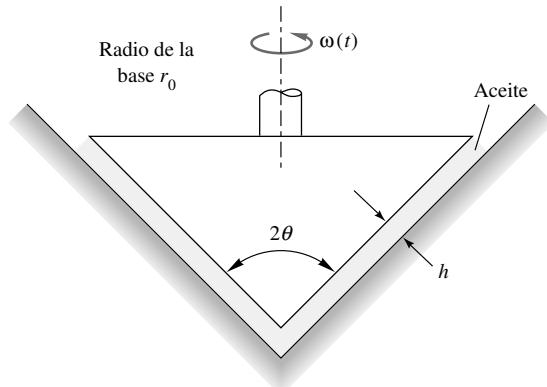
- P1.51** Utilice la teoría del Problema P1.49 (o derive una expresión *ad hoc* si lo desea) para un eje de 8 cm de largo, rotando a 1200 rpm, con $r_i = 2,00$ cm y $r_e = 2,05$ cm. Si el par medido es de 0,293 N · m, ¿cuál es la viscosidad del fluido? Suponga que las incertidumbres experimentales son las siguientes: L ($\pm 0,5$ mm), M ($\pm 0,003$ N · m), V (± 1 por 100), y r_i o r_e ($\pm 0,02$ mm). ¿Cuál es la incertidumbre de la medida de la viscosidad?

- P1.52** La cinta de la Figura P1.52 se mueve con velocidad uniforme V y está en contacto con la superficie de un tanque de aceite de viscosidad μ . Suponiendo un perfil de velocidad lineal en el aceite, obtenga una fórmula sencilla para la potencia P requerida para mover la cinta en función de (h , L , V , b , μ). ¿Qué potencia P se requiere si la cinta se mueve a 2,5 m/s sobre aceite SAE 30W a 20 °C, siendo $L = 2$ m, $b = 60$ cm y $h = 3$ cm?



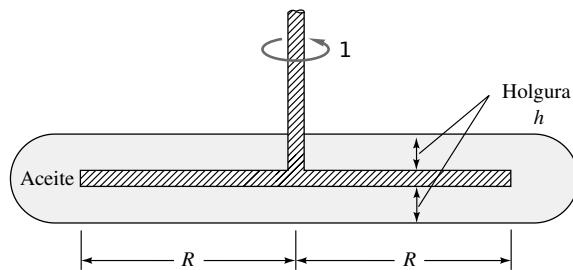
P1.52

- *P1.53** Un cono sólido de ángulo 2θ , radio de la base r_0 y densidad ρ_c está girando con una velocidad angular ω_0 en su asiento cónico, como se muestra en la Figura P1.53. La holgura h está llena de aceite con viscosidad μ . Despreciando la resistencia del aire, obtenga una expresión para la velocidad angular del cono $\omega(t)$ si no se aplica ningún par motor.



P1.53

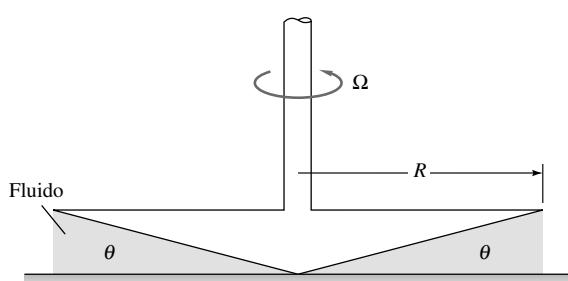
- *P1.54** Un disco de radio R gira con velocidad angular Ω dentro de un contenedor discoidal lleno de aceite con viscosidad μ , como se muestra en la Figura P1.54. Suponiendo un perfil de velocidad lineal y despreciando los esfuerzos cortantes en el borde exterior del disco, obtenga una expresión para el par de resistencia viscosa que actúa sobre el disco.



P1.54

- *P1.55** El dispositivo de la Figura P1.54 se denomina *viscosímetro de disco giratorio* [27]. Supongamos que $R = 5$ cm y $h = 1$ mm. Si el par requerido para hacer girar el disco a 900 rpm es de 0,537 N · m, ¿cuál es la viscosidad del fluido? Si la incertidumbre en los datos (M , R , h , Ω) es del ± 1 por 100, ¿cuál es la incertidumbre global de la medida de la viscosidad?

- *P1.56** El dispositivo de la Figura P1.56 se denomina *viscosímetro cono-placa* [27]. El ángulo del cono es muy pe-



P1.56

queño, luego sen $\theta \leq 5^\circ$, y el hueco entre cono y placa se llena con el líquido a ensayar, midiendo el par M que hay que aplicar para hacer girar el cono a la velocidad Ω . Suponiendo un perfil de velocidad lineal en la película fluida, obtenga una expresión para la viscosidad del fluido μ en función de (M, R, Ω, θ) .

- *P1.57** Supongamos que el viscosímetro cono-placa de la Figura P1.56 tiene por dimensiones $R = 6\text{ cm}$ y $\theta = 3^\circ$. Si el par necesario para hacer girar el cono a 600 rpm es $0,157\text{ N} \cdot \text{m}$, ¿cuál es la viscosidad del fluido? Si la incertidumbre en los datos (M, R, Ω, θ) es del ± 1 por 100, ¿cuál es la incertidumbre global de la medida de la viscosidad?

- *P1.58** El análisis del flujo laminar en un conducto circular del Problema P1.12 se puede usar para diseñar un viscosímetro capilar [27]. Si Q es el caudal, L es la longitud del conducto y Δp es la caída de presión entre la entrada y la salida, la teoría del Capítulo 6 permite expresar la viscosidad en la forma:

$$\mu \approx \frac{r_0^4 \Delta p}{8LQ}$$

donde se desprecian los efectos de borde [27]. Supongamos que nuestro viscosímetro capilar tiene $r_0 = 2\text{ mm}$ y $L = 25\text{ cm}$. Para un cierto fluido se obtienen los siguientes valores para el caudal y la caída de presiones:

$Q, \text{m}^3/\text{h}$	0,36	0,72	1,08	1,44	1,80
$\Delta p, \text{kPa}$	159	318	477	1274	1851

¿Cuál es la viscosidad del fluido? Nota: sólo los tres primeros puntos dan la viscosidad adecuada. ¿Qué tienen de especial los últimos dos puntos, cuyas medidas se obtuvieron con gran precisión?

- P1.59** Un cilindro de diámetro D , longitud L y densidad ρ_c cae por efecto de la gravedad dentro de un tubo de diámetro D_0 . La holgura, $D_0 - D \ll D$, está llena de un fluido lubricante de densidad ρ y viscosidad μ . Despreciando el efecto del aire situado por encima y por debajo del cilindro, obtenga una fórmula para la velocidad límite de caída del cilindro. Aplique la fórmula al caso de un cilindro de acero, $D = 2\text{ cm}$, $D_0 = 2,04\text{ cm}$, $L = 15\text{ cm}$, con una película de aceite SAE 30 a 20°C .

- P1.60** Un fluido muy viscoso (flujo laminar) llena el espacio entre dos cilindros coaxiales alargados de radios a y $b > a$, respectivamente. Si el cilindro exterior está fijo y el interior se mueve axialmente con velocidad U constante, la distribución de velocidad axial en el fluido es

$$v_z = \frac{U \ln(b/r)}{\ln(b/a)}$$

La Figura 4.2 muestra cómo se define la componente de la velocidad v_z . Represente la distribución de velocidades entre los dos cilindros y comente el resultado. Obtenga expresiones para el esfuerzo cortante en la

pared, tanto del cilindro interior como del exterior, y explique por qué son diferentes.

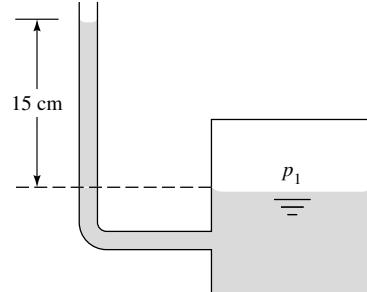
- *P1.61**  Un disco aerodeslizante tiene una masa de 50 g y un diámetro de 9 cm . Cuando se coloca sobre una mesa de hockey sobre aire, se forma bajo el disco una delgada película de aire a 20°C , de $0,12\text{ mm}$ de espesor. Tras golpear el disco, éste adquiere una velocidad inicial de 10 m/s . Suponiendo una distribución de velocidad lineal en la película de aire, ¿cuánto tiempo tardará el disco en (a) reducir su velocidad a 1 m/s y (b) pararse completamente? Además, (c) ¿qué distancia habrá recorrido el disco a lo largo de la (extraordinariamente larga) mesa en la condición (a)?

- P1.62** Las burbujas de hidrógeno utilizadas para visualizar los perfiles de velocidades de la Figura 1.13 son muy pequeñas, $D \approx 0,01\text{ mm}$. Si la entrefase hidrógeno-agua es comparable a la entrefase aire-agua y la temperatura del agua es de 30°C , estime la sobrepresión en el interior de la burbuja.

- P1.63** Obtenga la Ecuación (1.34) imponiendo el equilibrio de fuerzas en la entrefase fluida de la Figura 1.9c.

- P1.64** A bajas velocidades, un chorro de agua del grifo presenta una entrefase limpia aire-agua con forma aproximadamente cilíndrica. La presión en el interior del chorro es aproximadamente 200 Pa mayor que la presión atmosférica. Estime el diámetro del chorro en mm.

- P1.65** El sistema de la Figura P1.65 permite calcular la presión p_1 en el interior del tanque midiendo la altura de la columna de líquido de 15 cm en el tubo de 1 mm de diámetro. El fluido está a 60°C . Calcule la altura real del fluido en el tubo y el porcentaje del error debido a la capilaridad si el fluido es (a) agua o (b) mercurio.



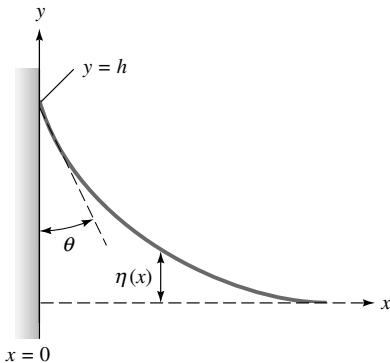
P1.65

- P1.66** Un anillo delgado de 3 cm de diámetro es levantado de la superficie del agua a 20°C . Despreciando el peso del metal, ¿qué fuerza se necesitaría para subir el anillo? ¿Puede ser ésta una buena forma de medir la tensión superficial? ¿Debería ser el anillo de un material determinado?

- P1.67** Dos cilindros coaxiales, con radio exterior r_e e interior r_i , se sumergen en un fluido de tensión superficial γ y ángulo de contacto $\theta < 90^\circ$. Obtenga una expresión para el ascenso capilar h en la holgura anular entre los dos cilindros cuando esta holgura es muy estrecha.

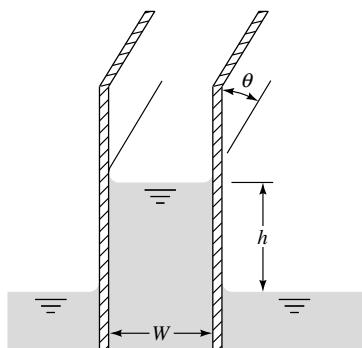
- *P1.68** Analice la forma $h(x)$ de la entrefase agua-aire en las proximidades de una pared plana, como en la Figu-

ra P1.68, suponiendo que la pendiente es pequeña y por tanto $R^1 5 d^2\eta/dx^2$, y que la diferencia de presiones a través de aquélla está equilibrada por el peso de la altura de la entrefase, $\Delta p 5 \rho g \eta$. Las condiciones de contorno son un ángulo de contacto θ en $x = 0$ y una superficie horizontal $\eta = 0$ al hacer $x \rightarrow ^+$. ¿Cuál es la máxima altura h en la pared?



P1.68

- P1.69** Una aguja cilíndrica sólida de diámetro d , longitud L y densidad ρ_a puede flotar en la superficie de un líquido de tensión superficial γ . Despreciando la flotabilidad y suponiendo un ángulo de contacto de 0° , obtenga una expresión para el diámetro máximo d_{\max} de una aguja que flota en el líquido. Calcule d_{\max} para una aguja de acero (densidad relativa $S = 7,84$) en agua a 20°C .
P1.70 Obtenga una expresión para el ascenso capilar h de un fluido de tensión superficial γ y ángulo de contacto θ entre dos placas paralelas separadas una distancia W , como se muestra en la Figura P1.70. ¿Cuál será el valor de h si $W = 0,5$ mm en agua a 20°C ?



P1.70

- *P1.71** Una pompa de jabón de diámetro D_1 se funde con otra pompa de diámetro D_2 para formar una única pompa de diámetro D_3 que contiene la misma cantidad de aire. Suponiendo que el proceso es isotermo, obtenga una expresión para D_3 en función de D_1 , D_2 , p_{atm} y γ .
P1.72 Antiguamente, los montañeros hervían el agua para estimar la altura a la que se encontraban. ¿Qué altura tendrá una montaña si al alcanzar la cima observamos que el agua hierve a 84°C ? EES

- P1.73** Un pequeño sumergible se mueve con velocidad V en agua dulce a 20°C , a 2 m de profundidad, donde la presión ambiente es de 131 kPa. Se sabe que su número de cavitación crítica es $Ca = 0,25$. ¿A qué velocidad empezarán a formarse burbujas de cavitación? ¿Se producirá cavitación si $V = 30$ m/s y el agua está fría (5°C)?

- P1.74** Se distribuye petróleo, que tiene una presión de vapor de 20 kPa, a través de un oleoducto usando bombas equiespaciadas, cada una de las cuales incrementa la presión del petróleo en 1,3 MPa. Las pérdidas de fricción en la tubería son de 150 Pa por metro de tubería. ¿Cuál es el espacio más grande entre las bombas si queremos evitar la cavitación del petróleo?

- P1.75** Un avión vuela a 555 mi/h. ¿A qué altitud en la atmósfera estándar el número de Mach del avión será exactamente 0,8?

- P1.76** Estime la velocidad del sonido del vapor de agua a 200°C y 400 kPa (a) suponiendo que se trata de un gas ideal (Tabla A.4) y (b) usando el programa EES (o las tablas de vapor) y haciendo pequeños cambios isentrópicos en la presión y en la densidad para aproximar la Ecuación (1.38).

- *P1.77** La densidad de la gasolina a 20°C varía con la presión como se indican en la siguiente tabla:

EES	p , atm	1	500	100	1500
	ρ , lbm/ft ³	42,45	44,85	46,60	47,98

Use estos datos para estimar (a) la velocidad del sonido (m/s) y (b) el módulo de compresibilidad (MPa) de la gasolina a 1 atm.

- P1.78** Isaac Newton midió la velocidad del sonido cronometrando el tiempo entre el avistamiento del humo del disparo de un cañón y el sonido del cañonazo. Si el cañón se encuentra en una montaña a 5,2 millas de distancia, estime la temperatura del aire en $^\circ\text{C}$ sabiendo que la diferencia de tiempos entre ambos es de (a) 24,2 s y (b) 25,1 s.

- P1.79** La más mínima cantidad de gas disuelto en un líquido puede cambiar drásticamente la velocidad del sonido de una mezcla líquido-gas. Estimando las variaciones de presión y volumen de diversas mezclas, Olson [40] obtuvo la siguiente fórmula aproximada:

$$a_{\text{mezcla}} \approx 5 \sqrt{\frac{p_g K_l}{[x l_g + (1-x) l_g][x K_l + (1-x) p_g]}}$$

Donde x es la fracción volumétrica de gas, K es el módulo de compresibilidad y los subíndices l y g denotan el líquido y el gas, respectivamente. (a) Demuestre que la fórmula es dimensionalmente homogénea. (b) En el caso de tener burbujas de aire (densidad 1,7 kg/m³ y presión 150 kPa) en agua (densidad 998 kg/m³ y módulo de compresibilidad 2,2 GPa), represente gráficamente la velocidad del sonido en el intervalo $0 \leq x \leq 0,002$ y discuta los resultados.

- *P1.80** Un campo de velocidades bidimensional y estacionario viene dado por $u = x^2 - y^2$, $v = -2xy$. Obtenga la expre-

sión de las líneas de corriente y represéntelas esquemáticamente en el semiplano y*0. *Consejo:* la ecuación diferencial es exacta.

- P1.81** Repita el Ejemplo 1.13 suponiendo que las componentes de la velocidad crecen linealmente con el tiempo:

$$\mathbf{V} = Kxt\mathbf{i} - Ky\mathbf{j} + 0\mathbf{k}$$

Obtenga y dibuje esquemáticamente las líneas de corriente instantáneas en varios instantes representativos. ¿En qué difieren de las líneas de corriente estacionarias del Ejemplo 1.13?

- P1.82** Un campo de velocidades viene dado por $u = V \cos \theta$, $v = V \sin \theta$ y $w = 0$, donde V y θ son constantes. Obtenga la expresión de las líneas de corriente de este flujo.

- *P1.83** Un campo de velocidades bidimensional no estacionario viene dado por $u = x(1 + 2t)$, $v = y$. Obtenga la expresión de las líneas de corriente que en diversos ins-

tantes pasan por el punto (x_0, y_0) y esquematice algunas de ellas.

- *P1.84** Repita el Problema P1.83 para determinar la senda que en $t = 0$ pasa por el punto (x_0, y_0) .

- P1.85** Consulte algún libro y enumere las principales contribuciones a la Mecánica de Fluidos de

- (a) Evangelista Torricelli (1608-1647)
- (b) Henri de Pitot (1695-1771)
- (c) Antoine Chézy (1718-1798)
- (d) Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (1797-1884)
- (e) Julius Weisbach (1806-1871)
- (f) George Gabriel Stokes (1819-1903)
- (g) Moritz Weber (1871-1951)
- (h) Theodor von Kármán (1881-1963)
- (i) Paul Richard Heinrich Blasius (1883-1970)
- (j) Ludwig Prandtl (1875-1953)
- (k) Osborne Reynolds (1842-1912)
- (l) John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919)
- (m) Daniel Bernoulli (1700-1782)
- (n) Leonhard Euler (1707-1783)

Problemas del examen de fundamentos de ingeniería

- FE1.1** La viscosidad absoluta μ de un fluido es fundamentalmente función de la

- (a) Densidad, (b) Temperatura, (c) Presión, (d) Velocidad, (e) Tensión superficial.

- FE1.2** Si un cuerpo sólido uniforme pesa 50 N en el aire y 30 N en el agua, su densidad relativa es de

- (a) 1,5, (b) 1,67, (c) 2,5, (d) 3,0, (e) 5,0

- FE1.3** El helio tiene un peso molecular de 4,003. ¿Cuánto pesan 2 m³ de helio a 1 atm y 20 °C?

- (a) 3,3 N, (b) 6,5 N, (c) 11,8 N, (d) 23,5 N, (e) 94,2 N

- FE1.4** Un aceite tiene una viscosidad cinemática de $1,25 \times 10^{-4}$ m²/s y una densidad relativa de 0,80. ¿Cuál es su viscosidad dinámica (absoluta) en kg/(m · s)?

- (a) 0,08, (b) 0,10, (c) 0,125, (d) 1,0, (e) 1,25

- FE1.5** Considere una pompa de jabón de 3 mm de diámetro. Si el coeficiente de tensión superficial es 0,072 N/m y la presión externa es la atmosférica, ¿cuál es la sobrepresión en el interior de la burbuja respecto a la presión atmosférica?

- (a) -24 Pa, (b) +48 Pa, (c) +96 Pa, (d) +192 Pa, (e) -192 Pa

- FE1.6** El único grupo adimensional que combina la velocidad V , el tamaño del cuerpo L , la densidad del fluido ρ y el coeficiente de tensión superficial γ es

- (a) $L\rho\gamma/V$, (b) $\rho VL^2/\gamma$, (c) $\rho\gamma V^2/L$, (d) $\gamma LV^2/\rho$, (e) $\rho LV^2/\gamma$

- FE1.7** Dos placas paralelas, una moviéndose a 4 m/s y la otra en reposo, están separadas por una película de aceite de 5 mm de espesor. La densidad relativa del aceite es de 0,80 y su viscosidad cinemática $1,25 \times 10^{-4}$ m²/s. ¿Cuál es el esfuerzo cortante medio en el aceite?

- (a) 80 Pa, (b) 100 Pa, (c) 125 Pa, (d) 160 Pa, (e) 200 Pa

- FE1.8** El dióxido de carbono tiene una relación de calores específicos de 1,30 y una constante del gas de 189 J/(kg · °C). Si su temperatura se incrementa de 20 a 45 °C, ¿cuál es el incremento de energía interna?

- (a) 12,6 kJ/kg, (b) 15,8 kJ/kg, (c) 17,6 kJ/kg, (d) 20,5 kJ/kg, (e) 25,1 kJ/kg

- FE1.9** Un flujo de agua a 20 °C tiene un número de cavitación crítico, para el cual se forman burbujas, $Ca = 0,25$, donde $Ca = 2(p_a - p_{vap})/\rho V^2$. Si $p_a = 1$ atm y la presión de vapor absoluta es 0,34 libras por pulgada cuadrada (psia, pounds per square inch absolute), ¿a qué velocidad del agua se produce la cavitación?

- (a) 12 mi/h, (b) 28 mi/h, (c) 36 mi/h, (d) 55 mi/h, (e) 63 mi/h

- FE1.10** Un flujo estacionario e incompresible, que atraviesa una sección de contracción de longitud L , tiene una distribución de velocidad media unidimensional que viene dada por $u = U_0(1 + 2x/L)$. ¿Cuál es la aceleración convectiva al final de la contracción, $x = L$?

- (a) U_0^2/L , (b) $2U_0^2/L$, (c) $3U_0^2/L$, (d) $4U_0^2/L$, (e) $6U_0^2/L$

Problemas extensos

- PE1.1** En ocasiones podemos llegar a obtener ecuaciones y resolver problemas prácticos sin conocer más que las dimensiones de los parámetros más importantes del problema. Consideremos, por ejemplo, las pérdidas de calor a través de una ventana de un edificio. El rendi-

miento de una ventana se mide en términos de un cierto «parámetro R », con unidades de (ft² · h · °F)/Btu. Un cierto fabricante anuncia una ventana de doble cristal con un parámetro R de 2,5. La misma compañía fabrica una ventana de triple cristal con un parámetro R

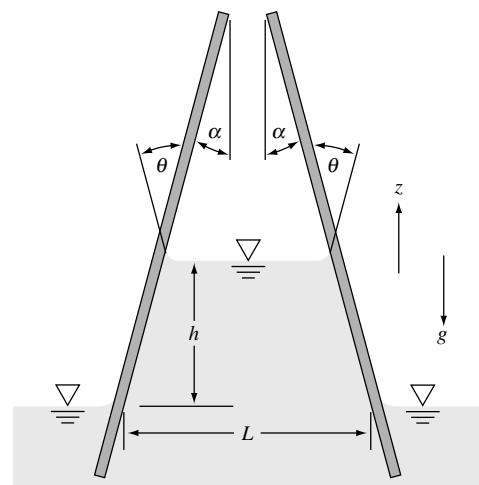
de 3,4. En ambos casos las dimensiones de la ventana son 3 ft por 5 ft. En un día de invierno, la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio es de 45 °F.

- Obtenga una ecuación para el calor que se pierde, en un cierto intervalo de tiempo Δt , a través de una ventana de área A , con parámetro R igual a R y diferencia de temperaturas ΔT . ¿Cuánto calor (en Btu) se pierde a través de la ventana de doble cristal durante un periodo de 24 h?
- ¿Cuánto calor (en Btu) se pierde a través de la ventana de triple cristal durante un periodo de 24 h?
- Supongamos que la calefacción del edificio funciona con gas propano, cuyo precio es de 1,25 dólares por galón. El quemador de propano tiene una eficiencia del 80 por 100. El propano tiene aproximadamente 90.000 Btu de energía disponible por galón. En el mismo periodo de 24 h, ¿cuánto dinero se ahorraría por cada ventana de triple cristal que se instalara en lugar de las de doble cristal?
- Finalmente, supongamos que el propietario de una vivienda compra 20 ventanas de triple cristal para su casa. Durante un invierno típico, el número de días que se utiliza la calefacción es de 120, siendo la diferencia de temperaturas media de 45 °F. Cada ventana de triple cristal cuesta 85 dólares más que una de doble cristal. Ignorando los intereses y la inflación, ¿cuántos años tardará el propietario en rentabilizar los costes adicionales de las ventanas de triple cristal con el ahorro en la factura de calefacción?

PE1.2 Cuando una persona patina sobre hielo, la superficie del hielo se funde bajo las cuchillas, de modo que él o ella patina sobre la delgada película de agua que se forma entre la cuchilla y el hielo.

- Obtenga una expresión para la fuerza total de fricción ejercida sobre la cuchilla en función de la velocidad del patinador V , la longitud de la cuchilla L , el espesor de la película de agua (entre la cuchilla y el hielo) h , la viscosidad del agua μ , y el ancho de la cuchilla W .
- Supongamos que un patinador de masa m está patinando a velocidad constante V_0 cuando de repente deja de propulsarse y continúa patinando en la misma posición hasta detenerse. Despreciando la resistencia del aire, ¿qué distancia recorrerá el patinador antes de pararse? (Recuerde que el patinador se desliza sobre *dos* cuchillas.) Exprese la distancia total recorrida, x , en función de V_0 , m , L , h , μ y W .
- Determine x siendo $V_0 = 4,0$ m/s, $m = 100$ kg, $L = 30$ cm, $W = 5,0$ mm y $h = 0,10$ mm. ¿Cree que es razonable la hipótesis de que la resistencia del aire es despreciable?

PE1.3 Dos placas planas delgadas, inclinadas un ángulo α , se encuentran semisumergidas en un depósito que contiene un líquido de tensión superficial conocida γ y ángulo de contacto θ , como muestra la Figura PE1.3. A la altura de la superficie libre del líquido en el depósito

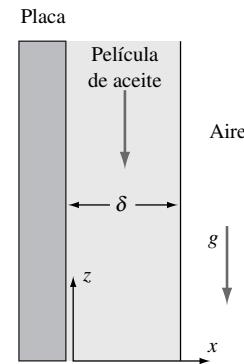


PE1.3

to, las dos placas se encuentran separadas una distancia L y tienen un espesor b en la dirección perpendicular al papel. En la región entre las placas el líquido sube una distancia h , tal como se indica.

- ¿Cuál es la fuerza total hacia arriba (según el eje z), debida a la tensión superficial, que actúa sobre la columna de líquido entre las placas?
- Si la densidad del líquido es ρ , obtenga una expresión que dé la tensión superficial γ en función del resto de las variables.

PE1.4 Un aceite de viscosidad μ y densidad ρ desciende de forma estacionaria por un lado de una placa vertical de grandes dimensiones, tal como ilustra la Figura PE1.4. En la región que se muestra en la figura el flujo está *completamente desarrollado*; es decir, la forma del perfil de velocidades y el espesor δ de la película de



PE1.4

aceite son independientes de la distancia z a lo largo de la placa. La velocidad vertical w es sólo función de x , y la resistencia debida al esfuerzo cortante en la entrefase con la atmósfera es despreciable.

- Dibuje esquemáticamente la forma del perfil de velocidades $w(x)$ teniendo en cuenta las condiciones de contorno en la pared y en la superficie libre de la película.

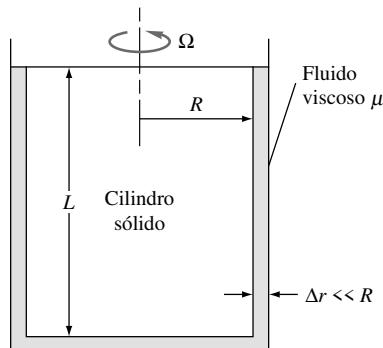
- (b) Supongamos que el espesor de la película δ , y la pendiente del perfil de velocidades en la pared, $(dw/dx)_{\text{pared}}$, se miden usando anemometría láser Doppler (a discutir en el Capítulo 6). Halle una expresión para la viscosidad del aceite en función de ρ , δ , $(dw/dx)_{\text{pared}}$, y la aceleración de la gravedad g . Nótese que, en el sistema de coordenadas considerado, tanto w como $(dw/dx)_{\text{pared}}$ son negativas.

- PE1.5** La viscosidad se puede medir haciendo pasar un fluido a través de un tubo *capilar* de pequeño calibre, si el flujo volumétrico es suficientemente pequeño. Si la longitud del tubo es L , el diámetro $D \ll L$, la caída de presión Δp y el caudal Q , la fórmula para la viscosidad es $\mu = D^4 \Delta p / (CLQ)$, donde C es una constante. (a) Verifique que C es adimensional. Los siguientes datos corresponden al flujo de agua a través de un tubo de 2 mm de diámetro y 1 metro de largo. La caída de presiones se mantiene constante e igual a $\Delta p = 5$ kPa.

$T, {}^\circ\text{C}$	10,0	40,0	70,0
$Q, \text{L/min}$	0,091	0,179	0,292

- (b) Usando las unidades apropiadas del SI, determine un valor medio de C teniendo en cuenta la variación de la viscosidad del agua con la temperatura.

- PE1.6** En el *viscosímetro de cilindro rotatorio* de la Figura PE1.6 el fluido se encuentra sometido a cortadura dentro de la estrecha holgura Δr que queda entre los cilindros. Suponiendo un perfil de velocidad lineal en el fluido, si se mide el par motor M , halle una expresión para μ (a) despreciando y (b) reteniendo el efecto de la fricción en el fondo.

**PE1.6**

- PE1.7** Consideremos el flujo de aceite SAE 10W a $20 {}^\circ\text{C}$ en contacto con una superficie plana, como en la Figura 1.4b. Tras medir el perfil de velocidades $u(y)$, se obtienen los siguientes resultados:

y, m	0,0	0,003	0,006	0,009	0,012	0,015
$u, \text{m/s}$	0,0	1,99	3,94	5,75	7,29	8,46

Usando técnicas de interpolación apropiadas, determine el esfuerzo cortante en el aceite (a) en la pared y (b) en $y = 15 \text{ mm}$.

- PE1.8** El *viscosímetro Stormer* [27] es un dispositivo mecánico que usa el cilindro rotatorio de la Figura PE1.6. En lugar de girar a una velocidad constante Ω , se enrolla una cuerda alrededor del eje en cuyo extremo se coloca un peso W que se deja caer libremente. Midiendo el tiempo t que tarda el eje en dar un cierto número de vueltas (normalmente cinco) para distintos valores de la viscosidad, se obtiene la siguiente correlación

$$t \propto \frac{A\mu}{W} < B$$

donde A y B son constantes que deben determinarse calibrando el dispositivo utilizando un fluido conocido. Estos son valores de calibración para un viscosímetro Stormer ensayado con glicerol, usando un peso de 50 N:

$\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	0,23	0,34	0,57	0,84	1,15
$t, \text{seg.}$	15	23	38	56	77

- (a) Halle valores razonables de A y B que ajusten estos valores de calibración. [*Consejo*: los datos no son muy sensibles al valor de B .] (b) Al ensayar un fluido más viscoso con un peso de 100 N se mide un tiempo de 44 s. Estime la viscosidad de este fluido.

Referencias

1. J. C. Tannehill, D. A. Anderson y R. H. Pletcher, *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 2.^a ed., Taylor and Francis, Bristol, PA, 1997.
2. J. H. Ferziger y M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Nueva York, 1999.
3. F. M. White, *Viscous Fluid Flow*, 2.^a ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1991.
4. R. J. Goldstein (ed.), *Fluid Mechanics Measurements*, 2.^a ed., Taylor and Francis, Bristol, PA, 1997.
5. R. A. Granger, *Experiments in Fluid Mechanics*, Oxford University Press, 1995.
6. H. A. Barnes, J. F. Hutton y K. Walters, *An Introduction to Rheology*, Elsevier, Nueva York, 1989.
7. P. B. Whalley, *Two-Phase Flow and Heat Transfer*, Oxford University Press, Nueva York, 1996.
8. Carlo Cercignani, «*Rarefied Gas Dynamics: From Basic Concepts to Actual Calculations*», Cambridge University Press, Nueva York, 2000.
9. F. Carderelli y M. J. Shields, «*Scientific Unit Conversion: A Practical Guide to Metrification*», 2.^a ed., Springer-Verlag, Nueva York, 1999.
10. J. P. Holman, *Heat Transfer*, 8.^a ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1997.
11. R. C. Reid, J. M. Prausnitz y T. K. Sherwood, *The Properties of Gases and Liquids*, 4.^a ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1987.
12. J. Hilsenrath et al., «Tables of Thermodynamic and Transport Properties», *U. S. Nat. Bur. Stand. Circ.* 564, 1955; reeditado por Pergamon, Nueva York, 1960.
13. W. T. Parry, J. C. Bellows, J. S. Gallagher y A. H. Harvey, *ASME International Steam Tables for Industrial Use*, ASME Press, Nueva York, 2000 (software disponible).
14. O. A. Hougen y K. M. Watson, *Chemical Process Principles Charts*, Wiley, Nueva York, 1960.
15. A. W. Adamson, *Physical Chemistry of Surfaces*, 6.^a ed., Wiley, Nueva York, 1997.
16. J. A. Knauss, *Introduction to Physical Oceanography*, 2.^a ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
17. National Committee for Fluid Mechanics Films, *Illustrated Experiments in Fluid Mechanics*, M.I.T. Press, Cambridge, MA, 1972.
18. I. G. Currie, *Fundamental Mechanics of Fluids*, 2.^a ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1993.
19. M. van Dyke, *An Album of Fluid Motion*, Parabolic Press, Stanford, CA, 1982.
20. Y. Nakayama (ed.), *Visualized Flow*, Pergamon Press, Oxford, 1988.
21. W. J. Yang (ed.), *Handbook of Flow Visualization*, Hemisphere, Nueva York, 1989.
22. W. Merzkirch, *Flow Visualization*, 2.^a ed., Academic, Nueva York, 1987.
23. H. Rouse y S. Ince, *History of Hydraulics*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ. of Iowa, Iowa City, 1957; reeditado por Dover, Nueva York, 1963.
24. H. Rouse, *Hydraulics in the United States 1776–1976*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ. of Iowa, Iowa City, 1976.
25. G. Garbrecht, *Hydraulics and Hydraulic Research: An Historical Review*, Gower Pub., Aldershot, Reino Unido, 1987.
26. *1999 SAE Handbook*, 4 vols., Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
27. J. R. van Wazer, *Viscosity and Flow Measurement*, Interscience, Nueva York, 1963.
28. *SAE Fuels and Lubricants Standards Manual*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 2000.
29. John F. Wendt (ed.), *Computational Fluid Dynamics: An Introduction*, Springer-Verlag, Nueva York, 1996.
30. H. W. Coleman y W. G. Steele, *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, 2.^a ed., John Wiley, Nueva York, 1998.
31. R. J. Moffatt, «Describing the Uncertainties in Experimental Results», *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 1, 1988, págs. 3-17.
32. Paul A. Libby, *An Introduction to Turbulence*, Taylor and Francis, Bristol, PA, 1996.
33. Sanford Klein y William Beckman, *Engineering Equation Solver (EES)*, F-Chart Software, Middleton, WI, 2001.
34. C. L. Yaws, X. Lin y L. Bu, «Calculate Viscosities for 355 Compounds. An Equation Can Be Used to Calculate Liquid Viscosity as a Function of Temperature», *Chemical Engineering*, vol. 101, núm. 4, abril 1994, págs. 119–128.
35. R. W. Miller, *Flow Measurement Engineering Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York, 1996.
36. Carl L. Yaws, *Handbook of Viscosity*, 3 vols., Gulf Publishing, Houston, TX, 1994.
37. G. L. Mellor, *Introduction to Physical Oceanography*, Springer-Verlag, Nueva York, 1996.
38. M. Raffel, C. E. Willert y J. Kompenhaus, *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide (Experimental Fluid Mechanics)*, Springer-Verlag, Nueva York, 1998.
39. MathPad Corp., *Internet Steam Tables Calculator*, Dirección URL <<http://www.mathpad.com/public/htmls/main/left/SteamInfo.html>>.
40. R. M. Olson, *Essentials of Engineering Fluid Mechanics*, Harper & Row, Nueva York, 1980.
41. Wen-Jai Yang, *Computer-Assisted Flow Visualization*, Begell House, Nueva York, 1994.
42. S. Y. Son et al., «Coolant Flow Field Measurements in a Two-Pass Channel Using Particle Image Velocimetry», 1999 Heat Transfer Gallery, *Journal of Heat Transfer*, vol. 121, agosto.
43. B. Carr y V. E. Young, «Videotapes and Movies on Fluid Dynamics and Fluid Machines», en *Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery*, vol. II, eds. J. A. Schetz y A. E. Fuhs, John Wiley, Nueva York, 1996, págs. 1171–1189.



La Presa Roosevelt, en Arizona. La presión hidrostática, debida al peso de un fluido en reposo, puede provocar fuerzas y momentos enormes sobre grandes estructuras como esta presa. Este capítulo tiene por objeto el análisis de la hidrostática de los fluidos. (*Cortesía del Dr. E. R. Degginger/Color-Pic Inc.*)