

FIGURA 5.2 Ejemplos de los tipos de problemas de flotabilidad.

Exploración

Si usted se acuesta sobre una piscina, flotará aun cuando esté casi completamente sumergido. El uso de un chaleco salvavidas o de una almohadilla flotante ayuda a no sumergirse. ¿Dónde más ha observado usted objetos que flotan en el agua u otros fluidos? Algunos ejemplos son cualquier tipo de embarcación, una motocicleta acuática, una boyta, una bola de plástico hueca, un colchón de aire, un juguete para agua o un palo de madera. ¿Dónde ha visto objetos completamente sumergidos en un fluido? Algunos ejemplos son un submarino, platos en un fregadero y los buzos. Anote por lo menos otras cinco situaciones en las que observó o percibió la tendencia de un fluido a sostener algo. Describa si el objeto tiende a flotar o a hundirse y su orientación deseada. Comente sus observaciones con sus compañeros y con el profesor.

Conceptos introductorios

Los objetos que se muestran en la figura 5.2 tienen diferentes tendencias de flotación. Es evidente que la boyta y el barco están diseñados para flotar y mantener una orientación específica. La campana de buceo tendería a hundirse si no estuviera sostenida por la grúa del barco mediante un cable.

El paquete de instrumentos tiende a flotar y debe ser sujetado por medio de un cable unido a un pesado bloque de anclaje que permanece en el fondo del mar. Sin embargo, el submarino está diseñado para ser capaz de ajustar su lastre y quedar suspendido a cualquier profundidad (a esta condición se le llama *flotabilidad neutra*), también para sumergirse a niveles más profundos o para subir hasta la superficie y flotar. Considere cualquier tipo de embarcación, balsa u otros objetos flotantes de los cuales se espera que mantengan una orientación particular cuando se colocan sobre un fluido. ¿Cómo pueden ser diseñados para asegurar que van a flotar en un nivel deseado y que serán estables cuando se les dé cierto desplazamiento angular? ¿Por qué una canoa es más propensa a volcarse que un bote grande y ancho al ponerse alguien de pie o moverse sobre estas embarcaciones?

Este capítulo proporciona los principios fundamentales de la flotabilidad y la estabilidad para ayudar a desarrollar la capacidad de análisis y diseño de dispositivos que operen de manera efectiva mientras flotan o están sumergidos en un fluido. Usted aprenderá cómo calcular la magnitud de la fuerza de flotación —para determinar la posición de un cuerpo que flota sobre un fluido— y a determinar el grado de estabilidad de un objeto sumergido o flotante.

5.1 OBJETIVOS

Después de completar este capítulo, usted deberá ser capaz de:

- Escribir la ecuación de la fuerza de flotación.
- Analizar el caso de los cuerpos que flotan sobre un fluido.
- Utilizar el principio de equilibrio estático para determinar las fuerzas involucradas en problemas de flotabilidad.
- Definir las condiciones que deben cumplirse para que un cuerpo sea estable cuando se encuentra completamente sumergido en un fluido.

- Definir las condiciones que deben cumplirse para que un cuerpo sea estable cuando flota sobre un fluido.
- Definir el término *metacentro* y calcular su ubicación.

5.2 FLOTABILIDAD

Un cuerpo que esté en un fluido, ya sea en flotación o sumergido, se mantiene a flote por medio de una fuerza que es igual al peso del fluido desplazado.

La fuerza de flotación actúa verticalmente hacia arriba a través del centroide del volumen desplazado.

Estos principios fueron descubiertos por el sabio griego Arquímedes y la fuerza de flotación se puede definir matemáticamente de la siguiente manera:

▷ Fuerza de flotación

$$F_b = \gamma_f V_d \quad (5-1)$$

donde

F_b = Fuerza de flotación

γ_f = Peso específico del fluido

V_d = Volumen desplazado del fluido

Cuando un cuerpo está flotando libremente, desplaza un volumen suficiente de fluido simplemente para equilibrar su propio peso.

El análisis de problemas relacionados con la flotabilidad requiere aplicar la ecuación de equilibrio estático en la dirección vertical, $\sum F = 0$, suponiendo que el objeto está en reposo en el fluido. Se recomienda el siguiente procedimiento para todos los problemas, ya sea que se trate de cuerpos flotantes o sumergidos.

Procedimiento de solución para problemas de flotabilidad

- Determine el objetivo de la solución del problema. ¿Se desea determinar una fuerza, un peso, un volumen o un peso específico?

- Dibuje un diagrama de cuerpo libre del objeto presente en el fluido. Muestre todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo libre en la dirección vertical, incluyendo el peso del cuerpo, la fuerza de flotación y todas las fuerzas externas. Si no conoce la dirección de alguna fuerza, suponga la más probable y muéstrela sobre el cuerpo libre.
- Escriba la ecuación de equilibrio estático en la dirección vertical, $\sum F = 0$, suponiendo que la dirección positiva es hacia arriba.
- Despeje la fuerza, el peso, el volumen o el peso específico que se desea encontrar; recuerde los siguientes conceptos:
 - La fuerza de flotación se calcula a partir de $F_b = \gamma_f V_d$.
 - El peso de un objeto sólido es el producto de su volumen total por su peso específico; es decir, $w = \gamma V$.
 - Un objeto con un peso específico promedio menor que el del fluido tenderá a flotar debido a que $w < F_b$ con el objeto sumergido.
 - Un objeto con un peso específico promedio mayor que el del fluido tenderá a hundirse porque $w > F_b$ con el objeto sumergido.
 - La *flotabilidad neutra* se produce cuando un cuerpo se mantiene en una posición dada, independientemente de lo sumergido que esté en un fluido. Un objeto cuyo peso específico promedio es igual al del fluido es neutralmente flotante.

PROBLEMAS DE EJEMPLO PROGRAMADOS

Problema de ejemplo

- 5.1** Un cubo con lados de 0.50 m está hecho de bronce con un peso específico de 86.9 kN/m^3 . Determine la magnitud y dirección de la fuerza requerida para mantener el cubo en equilibrio cuando está sumergido por completo (a) en agua y (b) en mercurio. La gravedad específica del mercurio es 13.54.

- Solución** Considere primero el inciso (a). Imagine que el cubo de bronce está sumergido en agua. Ahora realice el paso 1 del procedimiento.

En el supuesto de que el cubo de bronce no permanezca en equilibrio por sí mismo, se requiere de alguna fuerza externa. El objetivo es encontrar la magnitud de esta fuerza y la dirección en la que actuaría, es decir, hacia arriba o hacia abajo.

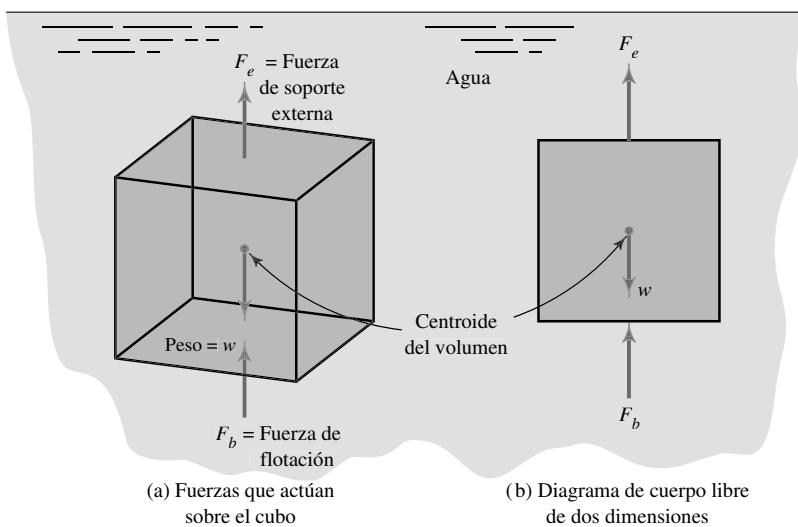
Ahora realice el paso 2 del procedimiento antes de ver el siguiente panel.

El cuerpo libre es simplemente el propio cubo. Existen tres fuerzas que actúan sobre el cubo en la dirección vertical, como se muestra en la figura 5.3:

- El peso w del cubo, que actúa hacia abajo a través de su centro de gravedad
- La fuerza de flotación F_b , que actúa hacia arriba a través del centroide del volumen desplazado
- La fuerza de soporte F_e aplicada externamente

La parte (a) de la figura 5.3 muestra el cubo como un objeto tridimensional con las tres fuerzas actuando a lo largo de una línea vertical a través del centroide del volumen. Esta es la visualización preferida del diagrama de cuerpo libre. Sin embargo, para la mayoría de los problemas es conveniente usar un bosquejo simplificado en dos dimensiones, como se muestra en la parte (b).

¿Cómo se sabe que la fuerza F_e debe dibujarse en la dirección hacia arriba?

FIGURA 5.3 Diagrama de cuerpo libre de un cubo.

Realmente no se sabe con certeza. Sin embargo, la experiencia debe indicar que, sin una fuerza externa, el cubo de bronce sólido tiende a hundirse en el agua. Por lo tanto, una fuerza hacia arriba parece ser necesaria para mantener el cubo en equilibrio. Si la elección es errónea, el resultado final lo indicará así.

Ahora, suponiendo que las fuerzas son como se muestran en la figura 5.3, vaya al paso 3.

La ecuación debe verse de la siguiente manera (suponga que las fuerzas positivas actúan hacia arriba):

$$\begin{aligned}\sum F &= 0 \\ F_b + F_e - w &= 0\end{aligned}\quad (5-2)$$

Como parte del paso 4, despeje en forma algebraica el término deseado de esta ecuación.

Ahora debe tener

$$F_e = w - F_b \quad (5-2)$$

porque el objetivo es encontrar la fuerza externa.

¿Cómo calculamos el peso del cubo w ?

En el paso 4 del procedimiento, el punto b indica que $w = \gamma_B V$, donde γ_B representa el peso específico del cubo de bronce y V el volumen total. Para el cubo, ya que cada lado mide 0.50 m, se tiene

$$V = (0.50 \text{ m})^3 = 0.125 \text{ m}^3$$

y

$$w = \gamma_B V = (86.9 \text{ kN/m}^3)(0.125 \text{ m}^3) = 10.86 \text{ kN}$$

Hay otra incógnita en el lado derecho de la ecuación (5-3). ¿Cómo se calcula F_b ?

Revise el paso 4a del procedimiento si lo ha olvidado. Escriba

$$F_b = \gamma_f V_d$$

En este caso, γ_f representa el peso específico del agua (9.81 kN/m^3), y el volumen desplazado V_d es igual al volumen total del cubo, que ya se sabe es de 0.125 m^3 . Entonces, se tiene

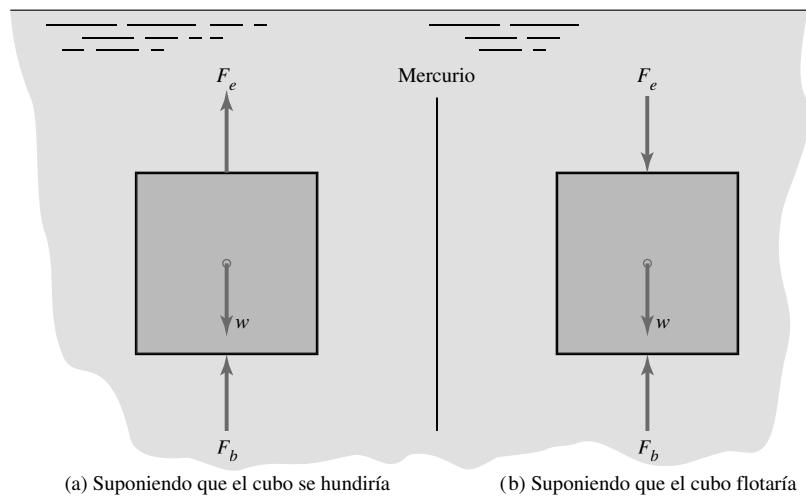
$$F_b = \gamma_f V_d = (9.81 \text{ kN/m}^3)(0.125 \text{ m}^3) = 1.23 \text{ kN}$$

Ahora se puede completar la solución para F_e .

La solución es:

$$F_e = w - F_b = 10.86 \text{ kN} - 1.23 \text{ kN} = 9.63 \text{ kN}$$

FIGURA 5.4 Dos posibles diagramas de cuerpo libre.



Resultado de la parte (a) Observe que el resultado es positivo. Esto significa que la dirección supuesta para F_e fue correcta. Entonces, la solución al problema es que se requiere una fuerza hacia arriba de 9.63 kN para mantener el bloque de bronce en equilibrio bajo el agua.

¿Qué hay de la parte (b) del problema, donde el cubo está sumergido en mercurio? El objetivo es el mismo que antes —determinar la magnitud y la dirección de la fuerza requerida para mantener al cubo en equilibrio.

Ahora realice el paso 2 del procedimiento.

Cualquiera de los dos diagramas de cuerpo libre es correcto, como se muestra en la figura 5.4, dependiendo de la dirección supuesta para la fuerza externa F_e . La solución para los dos diagramas se llevará a cabo de manera simultánea para que usted pueda comprobar su trabajo, sin importar cuál diagrama se parezca al suyo, y para demostrar que cualquiera de los enfoques producirá la respuesta correcta.

Ahora realice el paso 3 del procedimiento.

Las siguientes son las ecuaciones de equilibrio correctas. Observe las diferencias y relacionelas con las figuras:

$$F_b + F_e - w = 0 \quad | \quad F_b - F_e - w = 0$$

Ahora despeje F_e .

Entonces debe tener

$$F_e = w - F_b \quad | \quad F_e = F_b - w$$

Debido a que las magnitudes de w y F_b son las mismas para cada ecuación, ahora es posible calcularlas.

Igual que en la parte (a) del problema, el peso del cubo es

$$w = \gamma_B V = (86.9 \text{ kN/m}^3)(0.125 \text{ m}^3) = 10.86 \text{ kN}$$

Para la fuerza de flotación F_b , usted debe tener

$$F_b = \gamma_m V = (\text{sg})_m(9.81 \text{ kN/m}^3)(V)$$

donde el subíndice m se refiere al mercurio. Así, se tiene que

$$F_b = (13.54)(9.81 \text{ kN/m}^3)(0.125 \text{ m}^3) = 16.60 \text{ kN}$$

Ahora se continuará en busca de la solución para F_e .

Las respuestas correctas son

$$\begin{aligned} F_e &= w - F_b \\ &= 10.86 \text{ kN} - 16.60 \text{ kN} \\ &= -5.74 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_e &= F_b - w \\ &= 16.60 \text{ kN} - 10.86 \text{ kN} \\ &= +5.74 \text{ kN} \end{aligned}$$

Observe que ambas soluciones producen el mismo valor numérico, pero tienen signos opuestos. El signo negativo en la solución de la izquierda significa que la dirección supuesta para F_e en la figura 5.4(a) era errónea. Por lo tanto, ambos enfoques dan el mismo resultado.

Resultado de la parte (b)

La fuerza externa requerida es una fuerza hacia abajo de 5.74 kN.

¿Cómo se podría haber razonado desde el principio que sería necesaria una fuerza hacia abajo?

Los elementos c y d del paso 4 del procedimiento sugieren que se compare el peso específico del cubo con el del fluido. En este caso, se tienen los siguientes resultados:

Para el cubo de bronce $\gamma_B = 86.9 \text{ kN/m}^3$

$$\begin{aligned} \text{Para el fluido (mercurio)} \quad \gamma_m &= (13.54)(9.81 \text{ kN/m}^3) \\ &= 132.8 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

Comentario Debido a que el peso específico del cubo es menor que el del mercurio, éste tendería a flotar sin una fuerza externa. Por lo tanto, se requeriría una fuerza hacia abajo, como se ilustra en la figura 5.4(b), para mantenerlo en equilibrio bajo la superficie del mercurio.

Con esto concluye el problema de ejemplo.

Problema de ejemplo

5.2

Cierto objeto de metal sólido pesa 60 lb cuando se mide de manera normal en el aire, pero tiene una forma tan irregular que es difícil calcular su volumen mediante la geometría. Utilice el principio de la flotabilidad para calcular su volumen y peso específico.

Solución

Se sabe que el peso del objeto es de 60 lb. Ahora, usando una configuración similar a la de la figura 5.5, se encuentra que su peso aparente mientras está sumergido en agua es de 46.5 lb. A partir de estos datos y con base en el procedimiento empleado para analizar problemas de flotabilidad, es posible encontrar el volumen del objeto.

Ahora aplique el paso 2 del procedimiento y dibuje el diagrama de cuerpo libre del objeto mientras se encuentra suspendido en el agua.

El diagrama de cuerpo libre del objeto mientras está suspendido en el agua debe ser similar al de la figura 5.6. En esta figura, ¿cuáles son las dos fuerzas F_e y w ?

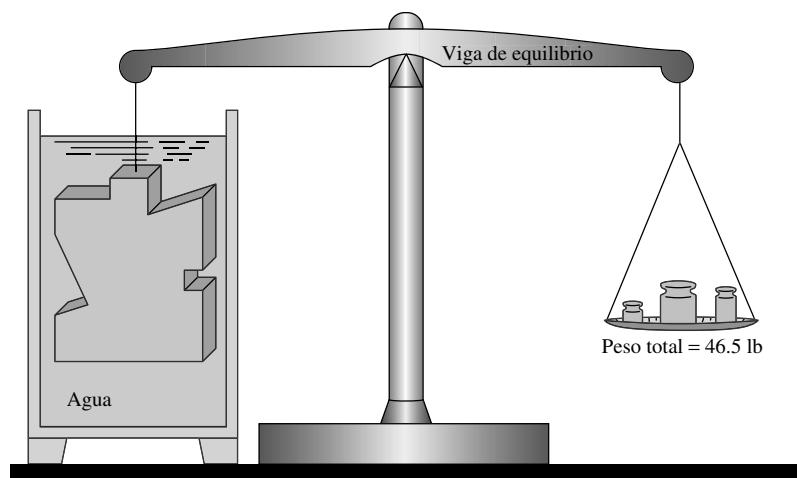


FIGURA 5.5 Objeto de metal suspendido en un fluido.

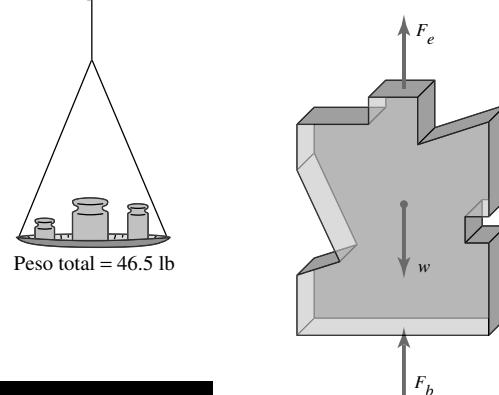


FIGURA 5.6 Diagrama de cuerpo libre.

Se sabe que $w = 60$ lb, el peso del objeto en el aire, y que $F_e = 46.5$ lb, la fuerza de apoyo ejercida por la balanza mostrada en la figura 5.5.

Ahora realice el paso 3 del procedimiento.

Al usar $\sum F_V = 0$, resulta

$$F_b + F_e - w = 0$$

El objetivo aquí es encontrar el volumen total V del objeto. ¿Cómo se puede introducir V en esta ecuación?

Se usa la siguiente ecuación del paso 4a,

$$F_b = \gamma_f V$$

donde γ_f es el peso específico del agua, 62.4 lb/ft³.

Sustituya esto en la ecuación anterior y despeje V .

Ahora debe tener

$$F_b + F_e - w = 0$$

$$\gamma_f V + F_e - w = 0$$

$$\gamma_f V = w - F_e$$

$$V = \frac{w - F_e}{\gamma_f}$$

Entonces ya es posible introducir los valores conocidos y calcular V .

Resultado El resultado es $V = 0.216$ ft³. Así es como se hace:

$$V = \frac{w - F_e}{\gamma_f} = (60 - 46.5) \text{ lb} \left(\frac{\text{ft}^3}{62.4 \text{ lb}} \right) = \frac{13.5 \text{ ft}^3}{62.4} = 0.216 \text{ ft}^3$$

Comentario Ahora que se conoce el volumen del objeto, es posible encontrar el peso específico del material.

$$\gamma = \frac{w}{V} = \frac{60 \text{ lb}}{0.216 \text{ ft}^3} = 278 \text{ lb/ft}^3$$

Esto es aproximadamente el peso específico de una aleación de titanio.

Los dos problemas siguientes se resuelven con todo detalle y deben servir para comprobar su capacidad de resolver problemas de flotabilidad. Después de leer el enunciado del problema, usted debe completar la solución por sí mismo antes de leer el panel donde aparece una solución correcta. Asegúrese de leer el problema con toda atención y usar las unidades apropiadas en

sus cálculos. Aunque algunos problemas pueden resolverse en más de una forma, es posible obtener la respuesta correcta mediante el método equivocado. Si su método es diferente al proporcionado aquí, asegúrese de que esté basado en principios sólidos antes de suponer que es correcto.

Problema de ejemplo

5.3

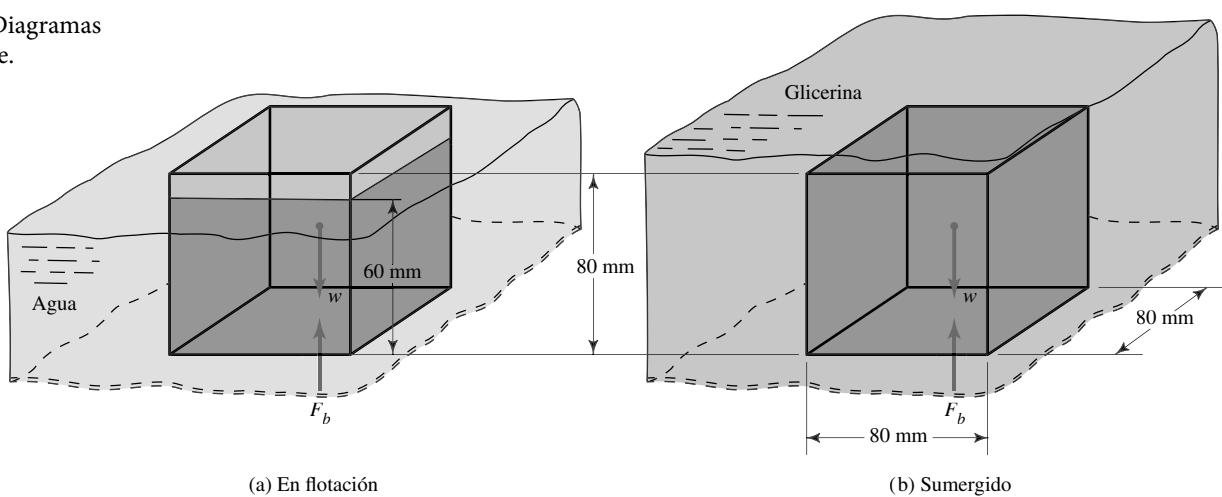
Un cubo con lados de 80 mm está hecho de un material de espuma rígida y flota en el agua manteniendo 60 mm por debajo de la superficie. Calcule la magnitud y la dirección de la fuerza requerida para mantenerlo completamente sumergido en glicerina, la cual tiene gravedad específica de 1.26.

Complete la solución antes de ver el panel siguiente.

Solución

Primero calcule el peso del cubo, después la fuerza requerida para mantenerlo sumergido en glicerina. Utilice los diagramas de cuerpo libre de la figura 5.7: (a) un cubo que flota en agua y (b) un cubo sumergido en glicerina.

FIGURA 5.7 Diagramas de cuerpo libre.



A partir de la figura 5.7(a), se tiene

$$\sum F_c = 0$$

$$F_b - w = 0$$

$$w = F_b = \gamma_f V_d$$

$$V_d = (80 \text{ mm})(80 \text{ mm})(60 \text{ mm}) = 384 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

(volumen sumergido del cubo)

$$w = \left(\frac{9.81 \times 10^3 \text{ N}}{\text{m}^3} \right) (384 \times 10^3 \text{ mm}^3) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{(10^3 \text{ mm})^3} \right) \\ = 3.77 \text{ N}$$

A partir de la figura 5.7(b), se tiene

$$\sum F_c = 0$$

$$F_b - F_e - w = 0$$

$$F_e = F_b - w = \gamma_f V_d - 3.77 \text{ N}$$

$$V_d = (80 \text{ mm})^3 = 512 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

(volumen total del cubo)

$$\gamma_f = (1.26)(9.81 \text{ kN/m}^3) = 12.36 \text{ kN/m}^3$$

$$F_e = \gamma_f V_d - 3.77 \text{ N}$$

$$= \left(\frac{12.36 \times 10^3 \text{ N}}{\text{m}^3} \right) (512 \times 10^3 \text{ mm}^3) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{(10^3 \text{ mm})^3} \right) - 3.77 \text{ N}$$

$$F_e = 6.33 \text{ N} - 3.77 \text{ N} = 2.56 \text{ N}$$

Resultado Se requiere una fuerza hacia abajo de 2.56 N para mantener al cubo sumergido en glicerina.

Problema de ejemplo

5.4

Un cubo de latón con lados de 6 in pesa 67 lb. Se desea mantener este cubo en equilibrio bajo el agua conectándolo a una boya ligera de espuma. Si la espuma pesa 4.5 lb/ft³, ¿cuál es el volumen mínimo requerido de la boya? Complete la solución antes de ver el panel siguiente.

Solución

Calcule el volumen mínimo de la espuma para mantener el cubo de latón en equilibrio.

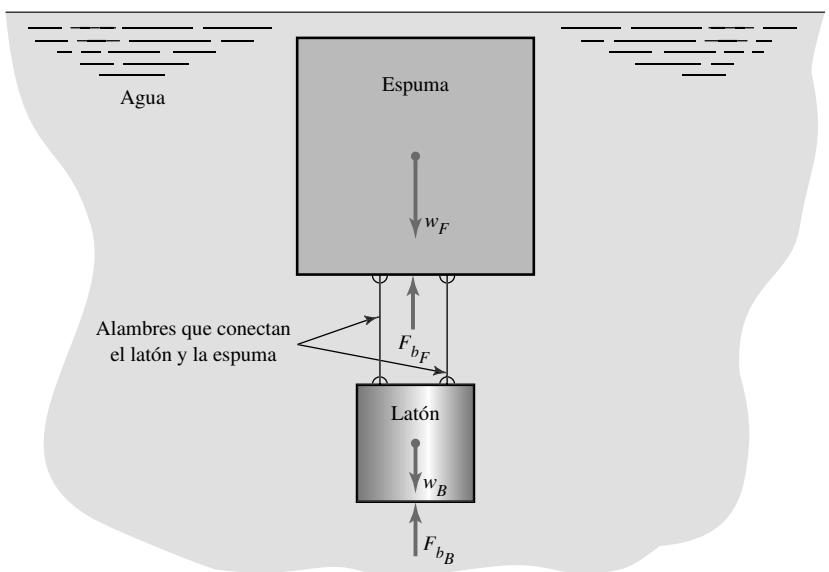
Observe que la espuma y el latón mostrados en la figura 5.8 se consideran como partes de un mismo sistema y que existe una fuerza de flotación sobre cada uno. El subíndice *F* se refiere a la espuma y el subíndice *B* se refiere al latón. No se requiere ninguna fuerza externa.

La ecuación de equilibrio es:

$$\sum F_c = 0$$

$$0 = F_{b_B} + F_{b_F} - w_B - w_F \quad (5-4)$$

FIGURA 5.8 Diagrama de cuerpo libre para el latón y la espuma juntos.



$$w_B = 67 \text{ lb (dado)}$$

$$F_{b_B} = \gamma_f V_{d_B} = \left(\frac{62.4 \text{ lb}}{\text{ft}^3} \right) (6 \text{ in})^3 \left(\frac{\text{ft}^3}{1728 \text{ in}^3} \right) = 7.8 \text{ lb}$$

$$w_F = \gamma_F V_F$$

$$F_{b_F} = \gamma_f V_F$$

Sustituya estas cantidades en la ecuación (5-4):

$$F_{b_B} + F_{b_F} - w_B - w_F = 0$$

$$7.8 \text{ lb} + \gamma_f V_F - 67 \text{ lb} - \gamma_F V_F = 0$$

Despeje V_F , para ello use $\gamma_f = 62.4 \text{ lb/ft}^3$ y $\gamma_F = 4.5 \text{ lb/ft}^3$:

$$\gamma_f V_F - \gamma_F V_F = 67 \text{ lb} - 7.8 \text{ lb} = 59.2 \text{ lb}$$

$$V_F(\gamma_f - \gamma_F) = 59.2 \text{ lb}$$

$$V_F = \frac{59.2 \text{ lb}}{\gamma_f - \gamma_F} = \frac{59.2 \text{ lb ft}^3}{(62.4 - 4.5) \text{ lb}}$$

$$V_F = 1.02 \text{ ft}^3$$

Resultado Esto significa que si se conectaran 1.02 ft^3 de espuma al cubo de latón, la combinación estaría en equilibrio en el agua sin requerir de ninguna fuerza externa. Habría flotabilidad neutra.

Esto completa los problemas de ejemplo programados.

5.3 MATERIALES DE FLOTACIÓN

Con frecuencia, el diseño de cuerpos flotantes requiere el uso de materiales ligeros que ofrecen un alto grado de flotabilidad. Además, cuando es necesario mover un objeto relativamente pesado mientras está sumergido en un fluido, suele ser deseable añadir flotabilidad para facilitar la movilidad. El material de flotabilidad general tiene las siguientes propiedades:

- Bajo peso y baja densidad específica
- Poca o ninguna tendencia a absorber el fluido
- Compatibilidad con el fluido en el que va a operar
- Capacidad de conformarse a los perfiles adecuados

- Capacidad para soportar las presiones del fluido al que estará expuesto
- Resistencia a la abrasión y tolerancia al daño
- Apariencia atractiva

Los materiales de espuma son muy populares para aplicaciones de flotabilidad. Se componen de una red continua de celdas cerradas y huecas que contienen aire u otros gases ligeros para producir un peso específico bajo. Las celdas cerradas también aseguran que el fluido no se absorba. Para evaluar el desempeño de las espumas se realizan las siguientes pruebas: densidad, resistencia a la tensión, alargamiento a la tensión, resistencia al desgarro, deformación por compresión, deflexión por compresión, estabilidad

térmica, conductividad térmica y absorción de agua. Los detalles de las pruebas se establecen en la norma ASTM D 3575, *Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials Made from Olefin Polymers*. Existen otras normas que se aplican a otros materiales.

Los pesos específicos de las espumas de flotación van desde aproximadamente 2.0 lb/ft³ hasta 40 lb/ft³. A menudo, esto se reporta como densidad, tomando la unidad lb como libra-masa. Por lo general, las resistencias a la compresión aumentan con la densidad. En un entorno de aguas marinas profundas, las aplicaciones requieren espumas más densas, rígidas y pesadas.

Los materiales utilizados incluyen uretano, polietileno, polímeros de olefinas, polímeros de cloruro de vinilo, poliestireno extruido y esponja o caucho expandidos. A menudo, las aplicaciones submarinas emplean materiales de espuma sintética compuestos a partir de pequeñas esferas huecas incrustadas en un plástico que las rodea, como fibra de vidrio, poliéster, epoxi o resinas de éster de vinilo para producir un material compuesto que tenga buenas características de flotabilidad con resistencia a la abrasión y baja absorción de fluido. Vea los recursos de internet del 1 al 5.

Las formas en que los materiales con flotabilidad están disponibles comercialmente incluyen planchas (aproximadamente de 50 mm × 500 mm × 2750 mm o 2 in × 20 in × 110 in), palanquillas (175 mm × 500 mm × 1200 mm o 7 in × 20 in × 48 in), cilindros y cilindros huecos. Es posible fabricar productos especiales en formas casi ilimitadas utilizando moldes o espuma en el sitio. Existe un uretano vertible de dos partes en el que dos líquidos, un poliol de poliéster y un isocianito polifuncional, se mezclan en el punto de utilización. La mezcla se expande rápidamente produciendo la conocida estructura de espuma con celdas cerradas. Vea los recursos de internet 3 y 5.

5.4 ESTABILIDAD DE CUERPOS COMPLETAMENTE SUMERGIDOS

Un cuerpo que esté dentro de un fluido se considerará estable si regresa a su posición original después de haber sido girado un poco con respecto a un eje horizontal. Dos ejemplos familiares de cuerpos completamente sumergidos en un fluido son los submarinos y los globos meteorológicos. Es importante que este tipo de objetos permanezcan en una orientación específica a pesar de la acción de las corrientes, los vientos o fuerzas provocadas por maniobras.

▷ Condición de estabilidad para cuerpos sumergidos

La condición necesaria para lograr la estabilidad de cuerpos completamente sumergidos en un fluido es que su centro de gravedad se sitúe por debajo de su centro de flotabilidad.

El centro de flotabilidad de un cuerpo está en el centroide del volumen desplazado de fluido, y es a través de este punto que la fuerza de flotación actúa en una dirección vertical. El peso del cuerpo actúa verticalmente hacia abajo a través del centro de gravedad.

En la figura 5.9 se muestra el bosquejo de un vehículo de investigación submarina que tiene una configuración estable debido a su forma y a la ubicación de los equipos colocados dentro de su estructura. Un ejemplo es el vehículo de inmersión profunda *Alvin*, propiedad de la U. S. Navy (Marina de Estados Unidos) y operado por la Woods Hole Oceanographic Institution. Vea los recursos de internet 6 y 7. Puede operar a profundidades de hasta 4.50 km (14 700 ft), donde la presión es de 45.5 MPa (6600 psi). La longitud total del *Alvin* es de 7.1 m (23.3 ft), la manga (ancho) mide 2.6 m (8.5 pies) y la altura es de 3.7 m (12.0 pies). Su tripulación de tres personas pilotea el vehículo y realiza observaciones científicas desde el interior de un casco esférico de titanio a presión que tiene un diámetro de 2.08 m (82 pulgadas). Cuando se carga, su peso es de aproximadamente 165 kN (37 000 lb), dependiendo del peso de la tripulación y el equipo experimental. De acuerdo con el diseño, el equipo más pesado como baterías, pesas de descenso, recipientes a presión, esferas de lastre variable y controles del motor se colocan en la parte inferior de la estructura. Gran parte de la estructura superior se llena con espuma sintética ligera para proporcionar flotabilidad. Esto hace que el centro de gravedad (cg) esté más abajo que el centro de flotabilidad (cb), con lo que se logra estabilidad. En una configuración, el centro de gravedad se encuentra 1.34 m (4.40 ft) por encima del fondo y el centro de flotabilidad se encuentra a 1.51 m (4.94 ft).

En la figura 5.9(a) se muestra la forma aproximada de la sección transversal del vehículo con el cg y el cb mostrados en sus respectivas posiciones a lo largo de la línea central vertical del casco. La figura 5.9(b) muestra el casco con cierto desplazamiento angular, donde el peso total w actúa verticalmente hacia abajo a través del cg y la fuerza de flotación F_b actúa verticalmente hacia arriba a través del cb. Debido a que sus líneas de acción están compensadas, estas fuerzas crean un *par de corrección* que lleva al vehículo hasta su orientación original, lo cual demuestra estabilidad.

FIGURA 5.9 Estabilidad de un submarino sumergido.

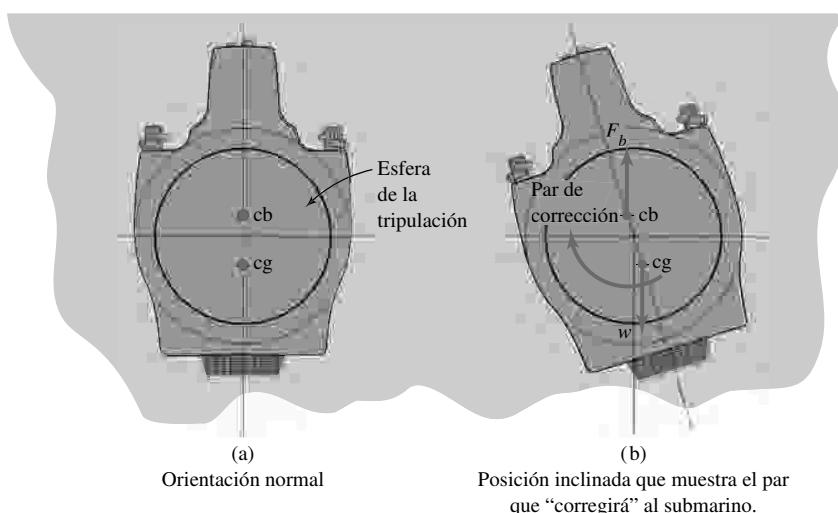
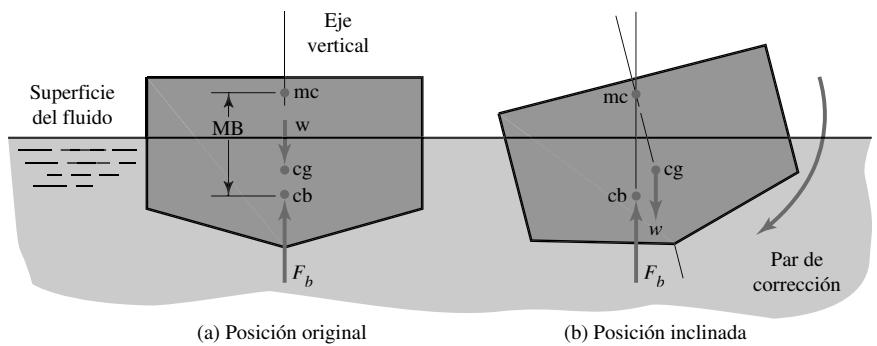


FIGURA 5.10 Método para encontrar el metacento.



Si el centro de gravedad se colocara por encima del centro de flotabilidad, el par creado cuando el cuerpo se inclina produciría un *par de volcamiento* que causaría una vuelta de campana. En objetos homogéneos sólidos, el cg coincide con el cb y estos objetos exhiben estabilidad neutral cuando están completamente sumergidos, esto significa que tienden a permanecer en cualquier posición que se coloquen.

5.5 ESTABILIDAD DE CUERPOS FLOTANTES

La condición necesaria para lograr la estabilidad de los cuerpos flotantes es diferente de la de los cuerpos completamente sumergidos; la razón se ilustra en la figura 5.10, que muestra la sección transversal aproximada del casco de un barco. En la parte (a) de la figura, el cuerpo flotante está en su orientación de equilibrio y el centro de gravedad (cg) está por encima del centro de flotación (cb). Una línea vertical que pase a través de estos puntos se llama *eje vertical* del cuerpo. En la figura 5.10(b) se muestra que si el cuerpo gira ligeramente, el centro de flotación se desplaza a una nueva posición debido a que la geometría del volumen desplazado ha cambiado. La fuerza de flotación y el peso producen ahora un par de corrección que tiende a devolver el cuerpo a su orientación original. Por lo tanto, el cuerpo es estable.

Con el fin de establecer la condición necesaria para lograr la estabilidad de un cuerpo flotante, es necesario definir un nuevo término, el *metacento*. El metacento (mc) se define como la intersección del eje vertical de un cuerpo cuando está en su posición de equilibrio y una línea vertical que pasa a través de la nueva posición del centro de flotabilidad cuando el cuerpo es girado ligeramente. Esto se ilustra en la figura 5.10(b).

⇒ Condición de estabilidad para los cuerpos flotantes

Un cuerpo flotante es estable si su centro de gravedad está por debajo del metacento.

Es posible determinar en forma analítica si un cuerpo flotante es estable mediante el cálculo de la ubicación de su metacento. La distancia al metacento desde el centro de flotabilidad se llama *MB* y se calcula a partir de

$$MB = I/V_d \quad (5-5)$$

En esta ecuación, V_d representa el volumen desplazado de líquido e I es el *menor* momento de inercia de una sección horizontal del cuerpo tomado en la superficie del fluido. *Si la distancia MB coloca el metacento por encima del centro de gravedad, el cuerpo es estable.*

Procedimiento para evaluar la estabilidad de cuerpos flotantes

- Determine la posición del cuerpo flotante utilizando los principios de flotabilidad.
- Localice el centro de flotabilidad, cb; calcule la distancia desde algún eje de referencia hasta cb, llamada y_{cb} . Por lo general, la parte inferior del objeto se toma como el eje de referencia.
- Localice el centro de gravedad, cg; calcule y_{cg} medida desde el mismo eje de referencia.
- Determine la forma del área en la superficie del fluido y calcule el momento de inercia I más pequeño para esa forma.
- Calcule el volumen desplazado V_d .
- Calcule $MB = I/V_d$.
- Calcule $y_{mc} = y_{cb} + MB$.
- Si $y_{mc} > y_{cg}$, el cuerpo es estable.
- Si $y_{mc} < y_{cg}$, el cuerpo es inestable.

PROBLEMAS DE EJEMPLO PROGRAMADOS

Problema de ejemplo

5.5

La figura 5.11(a) muestra el casco de una barcaza que, cuando está completamente cargada, pesa 150 kN. Las partes (b) a (d) muestran las vistas superior, frontal y lateral de la embarcación, respectivamente. Observe la ubicación del centro de gravedad, cg. Determine si la barcaza es estable en agua dulce.

Solución

Primero, averigüe si la barcaza flotará.

Esto se hace determinando qué tanto se hunde la embarcación en el agua mediante los principios de flotabilidad indicados en la sección 5.1. Complete ese cálculo antes de ir al siguiente panel.