



Warren Bolster/Stone/Getty Images

Um surfista espera pacientemente, ajoelhado na prancha, pela próxima onda. Quando vê uma onda se aproximar, rema em direção à praia até estar se movendo quase tão depressa quanto a onda. Quando a onda o alcança, fica de pé, ajustando constantemente a posição do corpo para manter o equilíbrio. Como ele consegue acompanhar a onda? Como consegue subir ou descer a onda?

Como um surfista surfa?

A resposta está neste capítulo.

14-1 O QUE É FÍSICA?

A física dos fluidos é a base da engenharia hidráulica, um ramo da engenharia com muitas aplicações práticas. Um engenheiro nuclear pode estudar o escoamento de um fluido no sistema hidráulico de um reator nuclear após alguns anos de uso, enquanto um bioengenheiro pode estudar o fluxo de sangue nas artérias de um paciente idoso. Um engenheiro ambiental pode estar preocupado com a contaminação das vizinhanças de um depósito de lixo ou com a eficiência de um sistema de irrigação. Um engenheiro naval pode estar interessado em investigar os riscos de um mergulho em águas profundas ou a possibilidade de salvar a tripulação de um submarino danificado. Um engenheiro aeronáutico pode projetar o sistema hidráulico dos *flaps* que ajudam um avião a pousar. A engenharia hidráulica é usada também em muitos espetáculos da Broadway e de Las Vegas, nos quais enormes cenários são rapidamente montados e desmontados por sistemas hidráulicos.

Antes de estudar essas aplicações da física dos fluidos, precisamos responder à seguinte pergunta: “O que é um fluido?”

14-2 | O que É um Fluido?

Um **fluido**, ao contrário de um sólido, é uma substância que pode escoar. Os fluidos assumem a forma do recipiente em que são colocados. Eles se comportam dessa forma porque um fluido não pode resistir a uma força paralela à sua superfície. (Na linguagem mais formal da Seção 12-7, um fluido é uma substância que escoar porque ele não pode resistir a uma tensão de cisalhamento. Um fluido pode, porém, exercer uma força na direção perpendicular à superfície.) Algumas substâncias, como o piche, levam um longo tempo para se amoldar aos contornos de um recipiente, mas acabam por fazê-lo; assim, mesmo essas substâncias são classificadas como fluidos.

Você talvez se pergunte por que os líquidos e gases são agrupados na mesma categoria e chamados de fluidos. Afinal (pode pensar), a água é tão diferente do vapor quanto do gelo. Isso, porém, não é verdade. O gelo, como outros sólidos cristalinos, tem seus átomos organizados em um arranjo tridimensional bastante rígido chamado rede cristalina. Nem no vapor nem na água existe um arranjo com ordem de longo alcance como este.

14-3 | Massa Específica e Pressão

Quando discutimos os corpos rígidos, estamos interessados em concentrações de matéria como blocos de madeira, bolas de tênis ou barras de metal. As grandezas físicas que utilizamos nesse caso e em termos das quais expressamos as leis de Newton são a *massa* e a *força*. Podemos falar, por exemplo, de um bloco de 3,6 kg submetido a uma força de 25 N.

No caso dos fluidos, estamos mais interessados em substâncias sem uma forma definida e em propriedades que podem variar de um ponto a outro da substância. Nesse caso, é mais útil falar em **massa específica** e **pressão** do que em massa e força.

Massa Específica

Para determinar a massa específica ρ de um fluido em um certo ponto do espaço, isolamos um pequeno elemento de volume ΔV em torno do ponto e medimos a massa Δm do fluido contido nesse elemento de volume. A **massa específica** é dada por

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}. \quad (14-1)$$

TABELA 14-1

Algumas Massas Específicas

Substância ou Objeto	Massa Específica (kg/m ³)	Substância ou Objeto	Massa Específica (kg/m ³)
Espaço interestelar	10 ⁻²⁰	Ferro	7,9 × 10 ³
Melhor vácuo em laboratório	10 ⁻¹⁷	Mercúrio (o metal, não o planeta)	13,6 × 10 ³
Ar: 20°C e 1 atm de pressão	1,21	Terra: média	5,5 × 10 ³
20°C e 50 atm	60,5	núcleo	9,5 × 10 ³
Isopor	1 × 10 ²	crosta	2,8 × 10 ³
Gelo	0,917 × 10 ³	Sol: média	1,4 × 10 ³
Água: 20°C e 1 atm	0,998 × 10 ³	núcleo	1,6 × 10 ⁵
20°C e 50 atm	1,000 × 10 ³	Anã branca (núcleo)	10 ¹⁰
Água do mar: 20°C e 1 atm	1,024 × 10 ³	Núcleo de urânio	3 × 10 ¹⁷
Sangue	1,060 × 10 ³	Estrela de nêutrons (núcleo)	10 ¹⁸

Teoricamente, a massa específica em um ponto qualquer de um fluido é o limite dessa razão quando o elemento de volume ΔV em torno do ponto tende a zero. Na prática, supomos que o volume de fluido usado para calcular a massa específica, embora pequeno, é muito maior que um átomo e, portanto, “regular” (com a mesma massa específica em todos os pontos) e não “granulado” por causa da presença de átomos. Além disso, em muitos casos supomos que a massa específica do fluido em uma amostra é a mesma em todos os pontos. Essas duas hipóteses permitem escrever a massa específica na forma

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{massa específica uniforme}), \quad (14-2)$$

onde m e V são a massa e o volume da amostra.

A massa específica é uma grandeza; sua unidade no SI é o quilograma por metro cúbico. A Tabela 14-1 mostra a massa específica de algumas substâncias e a massa específica média de alguns objetos. Observe que a massa específica de um gás (veja Ar na tabela) varia consideravelmente com a pressão, mas a massa específica de um líquido (veja Água) não varia; isso significa que os gases são *compressíveis*, mas o mesmo não acontece com os líquidos.

Pressão

Considere um pequeno sensor de pressão suspenso em um recipiente cheio de fluido, como na Fig. 14-1a. O sensor (Fig. 14-1b) é formado por um êmbolo de área ΔA que pode deslizar no interior de um cilindro fechado que repousa sobre uma mola. Um mostrador registra o deslocamento sofrido pela mola (calibrada) ao ser comprimida pelo fluido, indicando assim o módulo ΔF da força normal que age sobre o êmbolo. Definimos a **pressão** do fluido sobre o êmbolo como

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta A}. \quad (14-3)$$

Teoricamente, a pressão em qualquer ponto no fluido é o limite dessa razão quando a área ΔA de um êmbolo com o centro nesse ponto tende a zero. Entretanto, se a força é uniforme em uma superfície plana de área A podemos escrever a Eq. 14-3 na forma

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{pressão de uma força uniforme em uma superfície plana}), \quad (14-4)$$

onde F é o módulo da força normal a que está sujeita a superfície de área A . (Quando dizemos que uma força é uniforme em uma superfície isso significa que a força está uniformemente distribuída por todos os pontos da superfície.)

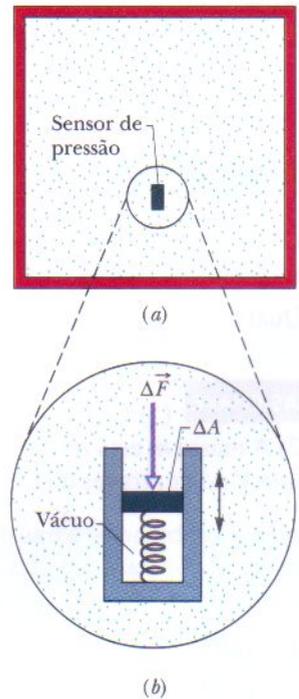


FIG. 14-1 (a) Um recipiente cheio de fluido com um pequeno sensor de pressão, mostrado em (b). A pressão é medida pela posição relativa do êmbolo móvel do sensor.

TABELA 14-2

Algumas Pressões

	Pressão (Pa)		Pressão (Pa)
Centro do Sol	2×10^{16}	Pneu de automóvel ^a	2×10^5
Centro da Terra	4×10^{11}	Atmosfera ao nível do mar	$1,0 \times 10^5$
Maior pressão constante em laboratório	$1,5 \times 10^{10}$	Pressão arterial sistólica normal ^{a,b}	$1,6 \times 10^4$
Maior fossa oceânica (no fundo)	$1,1 \times 10^8$	Melhor vácuo obtido em laboratório	10^{-12}
Salto agulha em uma pista de dança	10^6		

^aAcima da pressão atmosférica.

^bEquivalente a 120 torr nos medidores de pressão dos médicos.

Observamos experimentalmente que em um dado ponto de um fluido em repouso a pressão p definida pela Eq. 14-4 tem o mesmo valor, qualquer que seja a orientação do êmbolo. A pressão é uma grandeza escalar; suas propriedades não dependem da orientação. É verdade que a força que age sobre o êmbolo do nosso sensor de pressão é uma grandeza vetorial, mas a Eq. 14-4 envolve apenas o *módulo* dessa força, que é uma grandeza escalar.

A unidade de pressão no SI é o newton por metro quadrado, que recebe um nome especial, o **pascal** (Pa). Em muitos países, os medidores de pressão de pneus estão calibrados em quilopascals. A relação entre o pascal e outras unidades de pressão muito usadas na prática (mas que não pertencem ao SI) é a seguinte:

$$1 \text{ atm} = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ torr} = 14,7 \text{ lb/in}^2.$$

A *atmosfera* (atm) é, como o nome indica, a pressão média aproximada da atmosfera ao nível do mar. O *torr* (nome dado em homenagem a Evangelista Torricelli, que inventou o barômetro de mercúrio em 1674) já foi chamado de *milímetro de mercúrio* (mm Hg). A abreviação de libra por polegada quadrada é psi (do inglês *pound per square inch*). A Tabela 14-2 mostra algumas pressões em pascal.

Exemplo 14-1

Uma sala de estar tem 4,2 m de comprimento, 3,5 m de largura e 2,4 m de altura.

(a) Qual é o peso do ar na sala se a pressão do ar é 1,0 atm?

IDÉIAS-CHAVE (1) O peso do ar é mg , onde m é a massa do ar. (2) A massa m está relacionada à massa específica ρ e ao volume V do ar através da Eq. 14-2 ($\rho = m/V$).

Cálculo: Combinando essas duas idéias e usando a massa específica do ar para 1,0 atm que aparece na Tabela 14-1, temos:

$$\begin{aligned} mg &= (\rho V)g \\ &= (1,21 \text{ kg/m}^3)(3,5 \text{ m} \times 4,2 \text{ m} \times 2,4 \text{ m})(9,8 \text{ m/s}^2) \\ &= 418 \text{ N} \approx 420 \text{ N}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Este é o peso de aproximadamente 110 latas de refrigerante.

(b) Qual é o módulo da força que a atmosfera exerce sobre o alto da cabeça de uma pessoa, que tem uma área da ordem de $0,040 \text{ m}^2$?

IDÉIA-CHAVE Quando a pressão p que um fluido exerce sobre uma superfície de área A é uniforme, a força que o fluido exerce sobre a superfície pode ser calculada usando a Eq. 14-4 ($F = pA$).

Cálculo: Embora a pressão do ar varie de acordo com o local e a hora do dia, podemos dizer que é de aproximadamente 1,0 atm. Nesse caso, a Eq. 14-4 nos dá

$$\begin{aligned} F &= pA = (1,0 \text{ atm}) \left(\frac{1,01 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{1,0 \text{ atm}} \right) (0,040 \text{ m}^2) \\ &= 4,0 \times 10^3 \text{ N}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Esta força gigantesca é igual ao peso da coluna de ar que está acima da cabeça da pessoa, e se estende até o limite superior da atmosfera terrestre.

14-4 | Fluidos em Repouso

A Fig. 14-2a mostra um tanque de água (ou outro líquido qualquer) aberto para a atmosfera. Como todo mergulhador sabe, a pressão *aumenta* com a profundidade abaixo da interface ar-água. O medidor de profundidade usado pelos mergulhadores é, na verdade, um sensor de pressão semelhante ao da Fig. 14-1b. Como todo alpinista sabe, a pressão *diminui* com a altitude acima do nível do mar. As pressões encontradas pelos mergulhadores e alpinistas são chamadas de *pressões hidrostáticas* porque se devem a fluidos estáticos (em repouso). Vamos agora procurar uma expressão para a pressão hidrostática em função da profundidade ou da altitude.

Para começar, vamos examinar o aumento da pressão com a profundidade em um tanque cheio d'água. Definimos um eixo y vertical no tanque, com a origem na interface ar-água e o sentido positivo para cima. Em seguida, consideramos a água contida em um cilindro imaginário circular reto de bases A horizontais, de modo que y_1 e y_2 (ambos números *negativos*) são as profundidades abaixo da superfície das bases superior e inferior do cilindro, respectivamente.

A Fig. 14-2b mostra o diagrama de corpo livre da água do cilindro. A água se encontra em *equilíbrio estático*, ou seja, está em repouso, e a resultante das forças que agem sobre ela é nula. A água está sujeita a três forças verticais: a força \vec{F}_1 age sobre a superfície superior do cilindro e se deve à água que está acima do cilindro. A força \vec{F}_2 age sobre a superfície inferior do cilindro e se deve à água que está abaixo do cilindro. A força gravitacional que age sobre a água no cilindro está representada por $m\vec{g}$, onde m é a massa da água no cilindro. O equilíbrio dessas forças pode ser escrito na forma

$$F_2 = F_1 + mg. \quad (14-5)$$

Queremos transformar a Eq. 14-5 em uma equação envolvendo pressões. De acordo com a Eq. 14-4,

$$F_1 = p_1A \quad \text{e} \quad F_2 = p_2A. \quad (14-6)$$

A massa m da água no cilindro é, segundo a Eq. 14-2, $m = \rho V$, onde o volume V do cilindro é o produto da área da base A pela sua altura $y_1 - y_2$. Assim, m é igual a $\rho A(y_1 - y_2)$. Substituindo este resultado e a Eq. 14-6 na Eq. 14-5, obtemos

$$p_2A = p_1A + \rho Ag(y_1 - y_2)$$

$$\text{ou} \quad p_2 = p_1 + \rho g(y_1 - y_2). \quad (14-7)$$

Esta equação pode ser usada para determinar a pressão tanto em um líquido (em função da profundidade) como na atmosfera (em função da altitude ou altura). No primeiro caso, suponha que estejamos interessados em conhecer a pressão p a uma profundidade h abaixo da superfície do líquido. Nesse caso, escolhamos o nível 1 como sendo a superfície, o nível 2 como sendo uma distância h abaixo do nível 1 (como na Fig. 14-3) e p_0 como a pressão atmosférica na superfície. Fazemos, portanto,

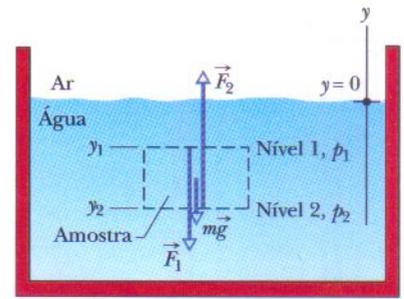
$$y_1 = 0, \quad p_1 = p_0 \quad \text{e} \quad y_2 = -h, \quad p_2 = p$$

na Eq. 14-7, e obtemos

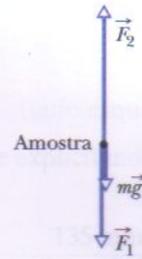
$$p = p_0 + \rho gh \quad (\text{pressão na profundidade } h). \quad (14-8)$$

Note que a pressão em uma dada profundidade no líquido depende dessa profundidade, mas não da dimensão horizontal.

A pressão em um ponto de um fluido em equilíbrio estático depende da profundidade desse ponto, mas não da dimensão horizontal do fluido ou do recipiente.



(a)



(b)

FIG. 14-2 (a) Um tanque de água no qual uma amostra de água está contida em um cilindro imaginário com base horizontal de área A . Uma força \vec{F}_1 age sobre a superfície superior do cilindro; uma força \vec{F}_2 age sobre a superfície inferior do cilindro; a força gravitacional que age sobre a água do cilindro está representada por $m\vec{g}$. (b) Diagrama de corpo livre da amostra de água.

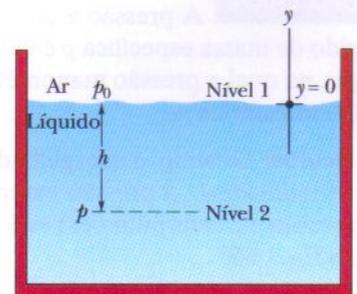


FIG. 14-3 A pressão p aumenta com a profundidade h abaixo da superfície do líquido de acordo com a Eq. 14-8.

Assim, a Eq. 14-8 é válida qualquer que seja a forma do recipiente. Se a superfície inferior do recipiente está a uma profundidade h , a Eq. 14-8 fornece a pressão p nessa profundidade.

Na Eq. 14-8, p é chamada de pressão total, ou **pressão absoluta**, no nível 2. Para compreender por quê, observe na Fig. 14-3 que a pressão p no nível 2 é a soma de duas parcelas: (1) p_0 , a pressão devida à atmosfera, que é aplicada à superfície do líquido, e (2) ρgh , a pressão devida ao líquido acima do nível 2, que é aplicada neste nível. A diferença entre uma pressão absoluta e uma pressão atmosférica é chamada de **pressão manométrica**. (O nome se deve ao uso de um manômetro para medir essa diferença de pressão.) Para a situação da Fig. 14-3, a pressão manométrica é ρgh .

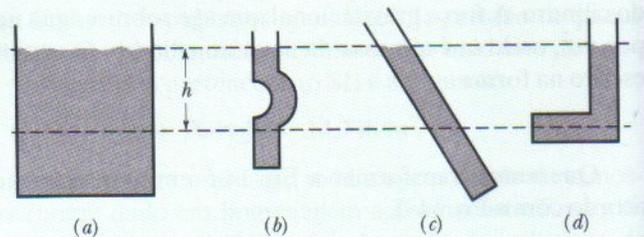
A Eq. 14-7 também pode ser usada acima da superfície do líquido: ela fornece a pressão atmosférica a uma dada distância acima do nível 1 em termos da pressão atmosférica p_1 no nível 1 (*supondo* que a massa específica da atmosfera é uniforme ao longo dessa distância). Assim, por exemplo, para calcular a pressão atmosférica a uma distância d acima do nível 1 da Fig. 14-3, fazemos

$$y_1 = 0, p_1 = p_0 \quad \text{e} \quad y_2 = d, p_2 = p.$$

Nesse caso, com $\rho = \rho_{\text{ar}}$, obtemos

$$p = p_0 - \rho_{\text{ar}}gd.$$

TESTE 1 A figura mostra quatro recipientes de azeite. Ordene-os de acordo com a pressão na profundidade h , da maior para a menor.



Exemplo 14-2

Um mergulhador novato, praticando em uma piscina, inspira ar suficiente do tanque para expandir totalmente os pulmões antes de abandonar o tanque a uma profundidade L e nadar para a superfície. Ele ignora as instruções e não exala o ar durante a subida. Ao chegar à superfície, a diferença entre a pressão externa a que está submetido e a pressão do ar em seus pulmões é 9,3 kPa. De que profundidade partiu? Que risco possivelmente fatal está correndo?

IDÉIA-CHAVE

A pressão a uma profundidade h em um líquido de massa específica ρ é dada pela Eq. 14-8 ($p = p_0 + \rho gh$), na qual a pressão manométrica ρgh é somada à pressão atmosférica p_0 .

Cálculos: Quando o mergulhador enche os pulmões na profundidade L , a pressão externa sobre ele (e, portanto, a pressão em seus pulmões) está acima do normal e é dada pela Eq. 14-8:

$$p = p_0 + \rho gL,$$

onde p_0 é a pressão atmosférica e ρ é a massa específica da água (998 kg/m^3 , de acordo com a Tabela 14-1). Quando o mergulhador sobe, a pressão externa sobre ele diminui até

se tornar igual à pressão atmosférica p_0 quando o mergulhador atinge a superfície. A pressão sanguínea também diminui até voltar ao normal. Entretanto, como o mergulhador não exalou o ar, a pressão do ar em seus pulmões permanece no valor correspondente à profundidade L . Na superfície, a diferença entre a pressão mais alta nos pulmões e a pressão mais baixa no tórax é

$$\Delta p = p - p_0 = \rho gL,$$

e, portanto,

$$L = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{9300 \text{ Pa}}{(998 \text{ kg/m}^3)(9,8 \text{ m/s}^2)} = 0,95 \text{ m.}$$

(Resposta)

Trata-se de uma profundidade muito pequena! Mesmo assim, a diferença de pressão de 9,3 kPa (aproximadamente 9% da pressão atmosférica) é suficiente para romper os pulmões do mergulhador e forçar a passagem de ar dos pulmões para a corrente sanguínea, que transporta o ar para o coração, matando o mergulhador. Se ele seguir as instruções e exalar o ar gradualmente enquanto sobe, permitirá que a pressão nos pulmões se torne igual à pressão externa, eliminando o perigo.

Exemplo 14-3

O tubo em forma de U da Fig. 14-4 contém dois líquidos em equilíbrio estático: no lado direito existe água de massa específica $\rho_a (= 998 \text{ kg/m}^3)$, e no lado esquerdo existe óleo de massa específica desconhecida ρ_x . Os valores das distâncias indicadas na figura são $l = 135 \text{ mm}$ e $d = 12,3 \text{ mm}$. Qual é a massa específica do óleo?

IDÉIAS-CHAVE

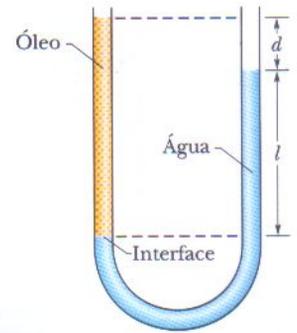
(1) A pressão p_{int} no nível correspondente à interface óleo-água do lado esquerdo depende da massa específica ρ_x e da altura do óleo acima da interface. (2) A água do lado direito à mesma altura está submetida à mesma pressão p_{int} . Isso acontece porque, como a água está em equilíbrio estático, as pressões em pontos na água no mesmo nível são necessariamente iguais, mesmo que os pontos estejam separados horizontalmente.

Cálculos: No lado direito, a interface está a uma distância l abaixo da superfície da água, e a Eq. 14-8 nos dá

$$p_{\text{int}} = p_0 + \rho_a g l \quad (\text{lado direito}).$$

No lado esquerdo, a interface está a uma distância $l + d$ abaixo da superfície do óleo, e novamente a Eq. 14-8 nos dá

FIG. 14-4 O óleo do lado esquerdo fica mais alto que a água do direito porque a massa específica do óleo é menor que a da água. Ambas as colunas de fluidos produzem a mesma pressão p_{int} na interface.



$$p_{\text{int}} = p_0 + \rho_x g (l + d) \quad (\text{lado esquerdo}).$$

Igualando essas duas expressões e explicitando a massa específica desconhecida, obtemos

$$\begin{aligned} \rho_x &= \rho_a \frac{l}{l + d} = (998 \text{ kg/m}^3) \frac{135 \text{ mm}}{135 \text{ mm} + 12,3 \text{ mm}} \\ &= 915 \text{ kg/m}^3. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Note que a resposta não depende da pressão atmosférica p_0 nem da aceleração de queda livre g .

14-5 | Medindo a Pressão**O Barômetro de Mercúrio**

A Fig. 14-5a mostra um *barômetro de mercúrio* simples, um aparelho usado para medir a pressão da atmosfera. O tubo de vidro é enchido com mercúrio e invertido com a extremidade aberta mergulhada em um recipiente com mercúrio, como mostra a figura. O espaço acima da coluna de mercúrio contém apenas vapor de mercúrio, cuja pressão é tão baixa à temperatura ambiente que pode ser desprezada.

Podemos usar a Eq. 14-7 para determinar a pressão atmosférica p_0 em termos da altura h da coluna de mercúrio. Escolhemos o nível 1 da Fig. 14-2 como sendo o da interface ar-mercúrio, e o nível 2 como sendo o do alto da coluna de mercúrio, como mostra a Fig. 14-5a. Em seguida, fazemos

$$y_1 = 0, p_1 = p_0 \quad \text{e} \quad y_2 = h, p_2 = 0$$

na Eq. 14-7, o que nos dá

$$p_0 = \rho g h, \quad (14-9)$$

onde ρ é a massa específica do mercúrio.

Para uma dada pressão, a altura h da coluna de mercúrio não depende da área de seção reta do tubo vertical. O barômetro de mercúrio mais sofisticado da Fig. 14-5b fornece a mesma leitura que o da Fig. 14-5a; tudo que importa é a distância vertical h entre os níveis de mercúrio.

A Eq. 14-9 mostra que, para uma dada pressão, a altura da coluna de mercúrio depende do valor de g no local onde se encontra o barômetro e da massa específica do mercúrio, que varia com a temperatura. A altura da coluna (em milímetros) é numericamente igual à pressão (em torr) apenas se o barômetro estiver em um local onde g tem o valor-padrão de $9,80665 \text{ m/s}^2$ e se a temperatura do mercúrio for 0°C . Se essas condições não forem satisfeitas (e raramente o são), pequenas correções devem ser feitas para que a altura da coluna de mercúrio possa ser lida como pressão.

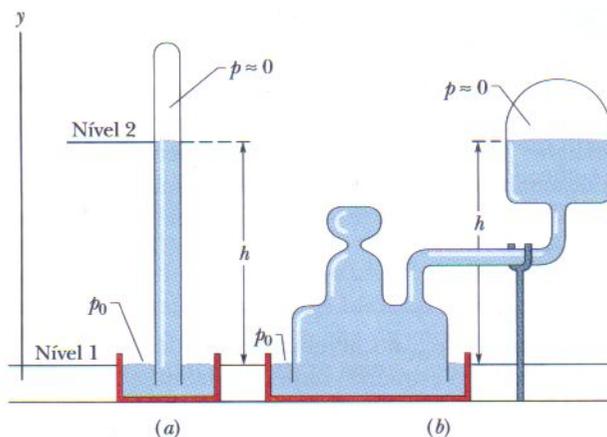


FIG. 14-5 (a) Um barômetro de mercúrio. (b) Outro barômetro de mercúrio. A distância h é a mesma nos dois casos.

O Manômetro de Tubo Aberto

Um *manômetro de tubo aberto* (Fig. 14-6) é usado para medir a pressão manométrica p_m de um gás. Ele é formado por um tubo em forma de U contendo um líquido, com uma das extremidades ligada a um recipiente cuja pressão manométrica se deseja medir e a outra aberta para a atmosfera. Podemos usar a Eq. 14-7 para determinar a pressão manométrica em termos da altura h mostrada na Fig. 14-6. Vamos escolher os níveis 1 e 2 da Fig. 14-6. Fazendo

$$y_1 = 0, p_1 = p_0 \text{ e } y_2 = -h, p_2 = p$$

na Eq. 14-7, obtemos

$$p_m = p - p_0 = \rho gh, \quad (14-10)$$

onde ρ é a massa específica do líquido contido no tubo. A pressão manométrica p_m é diretamente proporcional a h .

A pressão manométrica pode ser positiva ou negativa, dependendo de $p > p_0$ ou $p < p_0$. Nos pneus e no sistema circulatório a pressão (absoluta) é maior do que a pressão atmosférica, de modo que a pressão manométrica é uma grandeza positiva, às vezes chamada de *sobrepessão*. Quando alguém usa um canudo para beber um refrigerante a pressão (absoluta) nos pulmões é menor do que a pressão atmosférica. Nesse caso, a pressão manométrica nos pulmões é uma grandeza negativa.

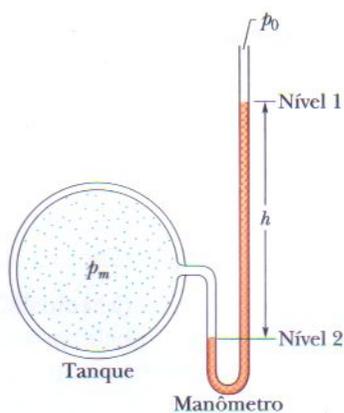


FIG. 14-6 Um manômetro de tubo aberto, usado para medir a pressão manométrica do gás no tanque da esquerda. O lado direito do tubo em U está aberto para a atmosfera.

14-6 | O Princípio de Pascal

Quando apertamos uma extremidade de um tubo de pasta de dente para fazer a pasta sair pela outra extremidade estamos pondo em prática o **princípio de Pascal**. Este princípio também é usado na manobra de Heimlich, na qual uma pressão aplicada ao abdômen é transmitida para a garganta, liberando um pedaço de comida ali alojado. O princípio foi enunciado com clareza pela primeira vez em 1652 por Blaise Pascal (em cuja homenagem foi batizada a unidade de pressão do SI):

Uma variação da pressão aplicada a um fluido incompressível contido em um recipiente é transmitida integralmente a todas as partes do fluido e às paredes do recipiente.

Demonstração do Princípio de Pascal

Considere o caso no qual o fluido incompressível é um líquido contido em um cilindro, como na Fig. 14-7. O cilindro é fechado por um êmbolo no qual repousa um recipiente com bolinhas de chumbo. A atmosfera, o recipiente e as bolinhas de chumbo exercem uma pressão p_{ext} sobre o êmbolo e, portanto, sobre o líquido. A pressão p em qualquer ponto P do líquido é, portanto,

$$p = p_{\text{ext}} + \rho gh. \quad (14-11)$$

Vamos adicionar mais algumas bolinhas de chumbo ao recipiente para aumentar p_{ext} de um valor Δp_{ext} . Como os valores dos parâmetros ρ , g e h da Eq. 14-11 permanecem os mesmos, a variação de pressão no ponto P é

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ext}}. \quad (14-12)$$

Como esta variação de pressão não depende de h , é a mesma para todos os pontos do interior do líquido, como afirma o princípio de Pascal.

O Princípio de Pascal e o Macaco Hidráulico

A Fig. 14-8 mostra a relação entre o princípio de Pascal e o macaco hidráulico. Suponha que uma força externa de módulo F_e seja aplicada de cima para baixo ao êmbolo da esquerda (ou de entrada), cuja área é A_e . Um líquido incompressível produz uma força de baixo para cima, de módulo F_s , no êmbolo da direita (ou de saída), cuja área é A_s . Para manter o sistema em equilíbrio deve existir uma força para baixo de módulo F_s no êmbolo de saída, exercida por uma carga externa (não mostrada na figura). A força \vec{F}_e aplicada no lado esquerdo, e a força \vec{F}_s para baixo exercida pela carga no lado direito produzem uma variação Δp da pressão do líquido que é dada por

$$\Delta p = \frac{F_e}{A_e} = \frac{F_s}{A_s},$$

$$F_s = F_e \frac{A_s}{A_e}. \quad (14-13)$$

e portanto

A Eq. 14-13 mostra que a força de saída F_s exercida sobre a carga é maior que a força de entrada F_e se $A_s > A_e$, como acontece na Fig. 14-8.

Se deslocamos o êmbolo de entrada para baixo de uma distância d_e , o êmbolo de saída se desloca para cima de uma distância d_s , de modo que o mesmo volume V de líquido incompressível é deslocado pelos dois êmbolos. Assim,

$$V = A_e d_e = A_s d_s,$$

que pode ser escrita como

$$d_s = d_e \frac{A_e}{A_s}. \quad (14-14)$$

Isso mostra que, se $A_s > A_e$ (como na Fig. 14-8) o êmbolo de saída percorre uma distância menor que o êmbolo de entrada.

De acordo com as Eqs. 14-13 e 14-14, podemos escrever o trabalho da saída na forma

$$W = F_s d_s = \left(F_e \frac{A_s}{A_e} \right) \left(d_e \frac{A_e}{A_s} \right) = F_e d_e, \quad (14-15)$$

que mostra que o trabalho W realizado sobre o êmbolo de entrada pela força aplicada é igual ao trabalho W realizado pelo êmbolo de saída ao levantar uma carga.

A vantagem do macaco hidráulico é a seguinte:

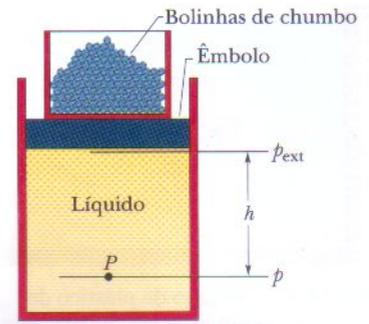


FIG. 14-7 Bolinhas de chumbo colocadas sobre o êmbolo criam uma pressão p_{ext} no alto de um líquido confinado (incompressível). Se mais bolinhas de chumbo são colocadas sobre o êmbolo, fazendo aumentar p_{ext} , a pressão aumenta do mesmo valor em todos os pontos do líquido.

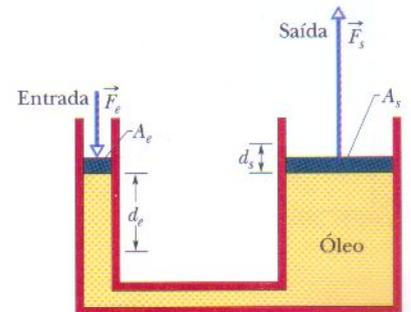


FIG. 14-8 Um dispositivo hidráulico que pode ser usado para aumentar a força \vec{F}_e . O trabalho realizado não é amplificado e é o mesmo para as forças de entrada e de saída.

Com um macaco hidráulico uma certa força aplicada ao longo de uma dada distância pode ser transformada em uma força maior aplicada ao longo de uma distância menor.

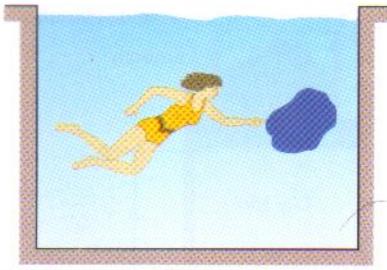


FIG. 14-9 Um saco de plástico de massa desprezível, cheio d'água, está em equilíbrio estático na piscina. A força gravitacional experimentada pelo saco é equilibrada por uma força resultante para cima exercida pela água que o cerca.

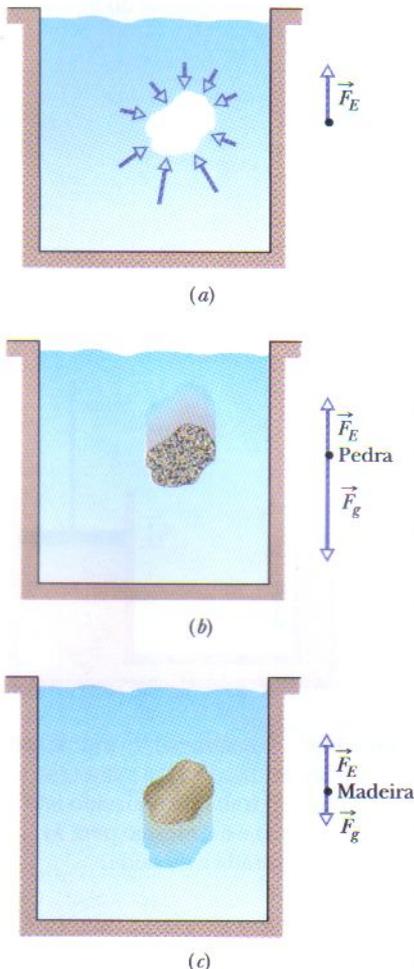


FIG. 14-10 (a) A água que está em volta da cavidade produz um empuxo resultante para cima sobre qualquer material que ocupe a cavidade. (b) No caso de uma pedra de mesmo volume que a cavidade, a força gravitacional é maior que o empuxo. (c) No caso de um pedaço de madeira de mesmo volume, a força gravitacional é menor que o empuxo.

Como o produto da força pela distância permanece inalterado, o trabalho realizado é o mesmo. Entretanto, há freqüentemente uma grande vantagem em poder exercer uma força maior. Muitos de nós, por exemplo, não temos força para levantar um automóvel, mas podemos fazê-lo usando um macaco hidráulico, ainda que tenhamos que movimentar a alavanca do macaco por uma distância muito maior que a percorrida pelo automóvel em uma série de movimentos curtos.

14-7 | O Princípio de Arquimedes

A Fig. 14-9 mostra uma estudante em uma piscina, manuseando um saco de plástico muito fino (de massa desprezível) cheio de água. Ela observa que o saco e a água nele contida estão em equilíbrio estático, ou seja, não tendem a subir nem a descer. A força gravitacional para baixo \vec{F}_g a que a água contida no saco está submetida deve ser equilibrada por uma força resultante para cima exercida pela água que está do lado de fora do saco.

Esta força resultante para cima é uma força \vec{F}_E , que recebe o nome de **força de empuxo**. Ela existe porque a pressão da água que envolve o saco aumenta com a profundidade. Assim, a pressão na parte inferior do saco é maior que na parte superior, o que equivale a dizer que as forças a que o saco está submetido devido à pressão são maiores em módulo na parte inferior do saco do que na parte superior. Algumas dessas forças estão representadas na Fig. 14-10a, onde o espaço ocupado pelo saco foi deixado vazio. Note que os vetores que representam as forças na parte de baixo do saco (com componentes para cima) são mais compridos que os vetores que representam as forças na parte de cima do saco (com componentes para baixo). Quando somamos vetorialmente todas as forças exercidas pela água sobre o saco, as componentes horizontais se cancelam e a soma das componentes verticais é o empuxo \vec{F}_E que age sobre o saco. (A força \vec{F}_E está representada à direita da piscina na Fig. 14-10a.)

Como o saco de água está em equilíbrio estático, o módulo de \vec{F}_E é igual ao módulo $m_f g$ da força gravitacional \vec{F}_g que age sobre o saco com água: $F_E = m_f g$. (O índice f significa *fluido*, no caso água.) Em palavras, o módulo do empuxo é igual ao peso da água no interior do saco.

Na Fig. 14-10b, trocamos o saco de água por uma pedra que ocupa um volume exatamente igual ao do espaço vazio da Fig. 14-10a. Dizemos que a pedra *desloca* a água, ou seja, ocupa o espaço que de outra forma seria ocupado pela água. Como a forma da cavidade não foi alterada, as forças na superfície da cavidade são as mesmas que quando o saco com água estava no lugar. Assim, o mesmo empuxo para cima que agia sobre o saco com água agora age sobre a pedra, ou seja, o módulo F_E do empuxo é igual a $m_f g$, o peso da água deslocada pela pedra.

Ao contrário do saco com água, a pedra não está em equilíbrio estático. A força gravitacional \vec{F}_g para baixo que age sobre a pedra tem um módulo maior que o empuxo para cima, como mostra o diagrama de corpo livre da Fig. 14-10b. Assim, a pedra acelera para baixo, descendo até o fundo da piscina.

Vamos agora preencher a cavidade da Fig. 14-10a com um pedaço de madeira, como mostra a Fig. 14-10c. Mais uma vez, nada mudou com relação às forças que agem sobre a superfície da cavidade, de modo que o módulo F_E do empuxo é igual a $m_f g$, o peso da água deslocada. Como a pedra, o pedaço de madeira não está em equilíbrio estático. Neste caso, porém, o módulo F_g da força gravitacional é menor que o módulo F_E do empuxo (como mostra o diagrama à direita da piscina), de modo que a madeira acelera para cima, subindo até a superfície.

Nossos resultados para o saco, a pedra e o pedaço de madeira se aplicam a qualquer fluido, e podem ser resumidos no **princípio de Arquimedes**:

Quando um corpo está total ou parcialmente submerso em um fluido uma força de empuxo \vec{F}_E exercida pelo fluido age sobre o corpo. A força é dirigida para cima e tem um módulo igual ao peso $m_f g$ do fluido deslocado pelo corpo.

De acordo com princípio de Arquimedes, o módulo da força de empuxo é dado por

$$F_E = m_f g \quad (\text{força de empuxo}), \quad (14-16)$$

onde m_f é a massa do fluido deslocado pelo corpo.

Flutuação

Quando pousamos um pedaço de madeira na superfície de uma piscina, a madeira começa a afundar na água porque é puxada para baixo pela força gravitacional. À medida que o bloco desloca mais e mais água o módulo F_E da força de empuxo, que aponta para cima, aumenta. Finalmente, F_E se torna igual ao módulo F_g da força gravitacional e a madeira pára de afundar. A partir desse momento o pedaço de madeira permanece em equilíbrio estático, e dizemos que está *flutuando* na água. Em todos os casos,

Quando um corpo flutua em um fluido, o módulo F_E da força de empuxo que age sobre o corpo é igual ao módulo F_g da força gravitacional a que o corpo está submetido.

Podemos escrever esta afirmação como

$$F_E = F_g \quad (\text{flutuação}). \quad (14-17)$$

De acordo com a Eq. 14-16, $F_E = m_f g$. Assim,

Quando um corpo flutua em um fluido, o módulo F_g da força gravitacional a que o corpo está submetido é igual ao peso $m_f g$ do fluido deslocado pelo corpo.

Podemos escrever esta afirmação como

$$F_g = m_f g \quad (\text{flutuação}). \quad (14-18)$$

Em outras palavras, um corpo que flutua desloca um peso de fluido igual ao seu próprio peso.

Peso Aparente em um Fluido

Se colocamos uma pedra sobre uma balança calibrada para medir pesos a leitura da balança é o peso da pedra. Se, porém, repetimos a experiência debaixo d'água a força de empuxo a que a pedra é submetida diminui a leitura da balança. Esta leitura passa a ser, portanto, um peso aparente. O **peso aparente** de um corpo está relacionado ao peso real e à força de empuxo através da equação

$$\left(\begin{array}{c} \text{peso} \\ \text{aparente} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{peso} \\ \text{real} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{módulo da} \\ \text{força de empuxo} \end{array} \right),$$

que pode ser escrita na forma

$$\text{peso}_{\text{ap}} = \text{peso} - F_E \quad (\text{peso aparente}). \quad (14-19)$$

Se em um teste de força você tivesse que levantar uma pedra pesada, poderia fazer isso com mais facilidade debaixo d'água. Nesse caso, a força aplicada teria que ser maior que o peso aparente da pedra e não que o peso real, pois a força de empuxo o ajudaria a levantar a pedra.

O módulo da força de empuxo a que está sujeito um corpo que flutua é igual ao peso do corpo. A Eq. 14-19 nos diz, portanto, que um corpo que flutua tem um peso aparente igual a zero; o corpo produziria uma leitura zero ao ser pesado em uma balança. (Quando os astronautas se preparam para realizar uma tarefa complexa no espaço usam uma piscina para praticar, pois na água seu peso aparente é nulo, como no espaço.)

TESTE 2 Um pingüim flutua, primeiro em um fluido de massa específica ρ_0 , depois em um fluido de massa específica $0,95\rho_0$ e, finalmente, em um fluido de massa específica $1,1\rho_0$. (a) Ordene as massas específicas de acordo com o módulo da força de empuxo exercida pelo pingüim, da maior para a menor. (b) Ordene as massas específicas de acordo com o volume de fluido deslocado pelo pingüim, do maior para o menor.

Exemplo 14-4

Na Fig. 14-11a um surfista está na parte dianteira de uma onda, em um ponto no qual uma tangente à onda tem uma inclinação $\theta = 30,0^\circ$. A massa total do surfista e da prancha é $m = 83,0$ kg, e o volume submerso da prancha é $V = 2,50 \times 10^{-2} \text{ m}^3$. O surfista mantém sua posição em relação à onda quando esta se move com velocidade constante em direção à praia. Quais são o módulo e a orientação (em relação ao semi-eixo x positivo da Fig. 14-11b) da força de arrasto que a água exerce sobre o surfista?

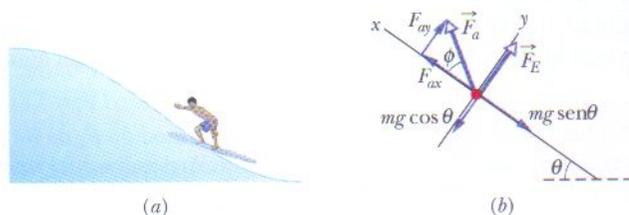


FIG. 14-11 (a) Surfista. (b) Diagrama de corpo livre do sistema surfista-prancha.

IDÉIAS-CHAVE

(1) A força de empuxo a que o surfista está submetido tem um módulo F_E igual ao peso da água do mar deslocada pelo volume submerso da prancha. Esta força é perpendicular à superfície na posição do surfista. (2) De acordo com a segunda lei de Newton, como o surfista se move com velocidade constante em direção à praia, a soma (vetorial) da força de empuxo \vec{F}_E , da força gravitacional \vec{F}_g e da força de arrasto \vec{F}_a deve ser nula.

Cálculos: O diagrama de corpo livre da Fig. 14-11b mostra as forças e suas componentes. A força gravitacional \vec{F}_g aponta para baixo e (como vimos no Capítulo 5) tem uma componente $mg \sin \theta$ ao longo da superfície inclinada da onda e uma componente $mg \cos \theta$ da direção perpendicular à superfície da onda. Uma força de arrasto \vec{F}_a é exercida pela água sobre a prancha porque a água sobe continuamente a onda enquanto a onda se desloca em direção à praia. Esta força está orientada para cima e para trás, e faz um ângulo ϕ com o eixo x . A força de empuxo \vec{F}_E é perpendicular à superfície da água; de acordo com a Eq. 14-16 ($F_E = m_f g$), o módulo dessa força depende da massa m_f da água deslocada pela prancha. De acordo com a Eq. 14-2 ($\rho = m/V$), podemos escrever a massa em termos da massa específica da água do mar, ρ_a , e do volume submerso V da prancha: $m_f = \rho_a V$. De acordo com a Tabela 14-1, a massa específica da água do mar é $\rho_a = 1,024 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Assim, o módulo da força de empuxo é

$$\begin{aligned} F_E &= m_f g = \rho_a V g \\ &= (1,024 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(2,50 \times 10^{-2} \text{ m}^3)(9,8 \text{ m/s}^2) \\ &= 2,509 \times 10^2 \text{ N.} \end{aligned}$$

Nesse caso, aplicando a segunda lei de Newton ao eixo y , temos:

$$F_{ay} + F_E - mg \cos \theta = m(0),$$

e, portanto,

$$F_{ay} + 2,509 \times 10^2 \text{ N} - (83 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2) \cos 30,0^\circ = 0,$$

e

$$F_{ay} = 453,5 \text{ N.}$$

Aplicando a segunda lei de Newton ao eixo x , temos:

$$F_{ax} - mg \sin \theta = m(0),$$

e

$$F_{ax} = 406,7 \text{ N.}$$

Combinando as duas componentes da força de arrasto, verificamos que o módulo da força é

$$\begin{aligned} F_a &= \sqrt{(406,7 \text{ N})^2 + (453,5 \text{ N})^2} \\ &= 609 \text{ N} \end{aligned} \quad \text{(Resposta)}$$

e o ângulo é

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{453,5 \text{ N}}{406,7 \text{ N}} \right) = 48,1^\circ. \quad \text{(Resposta)}$$

Mantendo o controle: Se o surfista inclina a prancha ligeiramente para cima, o módulo da força de arrasto diminui e o ângulo ϕ muda. Em consequência, a força resultante deixa de ser nula e o surfista desce em relação à onda. Esta decisão é, até certo ponto, auto-regulada, porque quando o surfista desce o ângulo θ de inclinação da onda diminui, e o mesmo acontece com a componente $mg \sin \theta$ da força gravitacional que age sobre o surfista. Assim, o equilíbrio é restabelecido com o surfista em uma nova posição (mais baixa) em relação à onda. Da mesma forma, inclinando a prancha ligeiramente para baixo, o surfista aumenta a força de arrasto e sobe em relação à onda. Se o surfista se encontra na parte mais baixa da onda, θ e $mg \sin \theta$ aumentam e o equilíbrio é restabelecido com o surfista em uma nova posição (mais alta) em relação à onda.

Exemplo 14-5

Na Fig. 14-12, um bloco de massa específica $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$ flutua em um fluido de massa específica $\rho_f = 1200 \text{ kg/m}^3$. O bloco tem uma altura $H = 6,0 \text{ cm}$.

(a) Qual é a altura h da parte submersa do bloco?

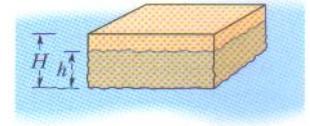


FIG. 14-12 Um bloco de altura H flutuando em um fluido com uma parte h submersa.

IDÉIAS-CHAVE

(1) Para que o bloco flutue, a força de empuxo que age sobre ele deve ser igual à força gravitacional. (2) A força de empuxo é igual ao peso $m_f g$ do fluido deslocado pela parte submersa do bloco.

Cálculos: De acordo com a Eq. 14-16, o módulo da força de empuxo é $F_E = m_f g$, onde m_f é a massa do fluido deslocado pelo volume submerso do bloco, V_f . De acordo com a Eq. 14-2 ($\rho = m/V$), a massa do fluido deslocado é $m_f = \rho_f V_f$. Não conhecemos V_f , mas se chamarmos o comprimento do bloco de C e a largura de L , o volume submerso do bloco será, de acordo com a Fig. 14-12, $V_f = CLh$. Combinando as três expressões, descobrimos que o módulo da força de empuxo é dado por

$$F_E = m_f g = \rho_f V_f g = \rho_f CLhg. \quad (14-20)$$

Da mesma forma, podemos escrever o módulo F_g da força gravitacional a que o bloco está submetido, primeiro em termos da massa m do bloco e depois em termos da massa específica ρ e do volume (total) V do bloco, que, por sua vez, pode ser expresso em termos das dimensões do bloco, C , L e H (altura total):

$$F_g = mg = \rho Vg = \rho CLHg. \quad (14-21)$$

Como o bloco está em repouso, a aplicação da segunda lei de Newton às componentes das forças em relação a um eixo vertical y ($F_{\text{res},y} = ma_y$) nos dá

$$F_E - F_g = m(0),$$

ou, de acordo com as Eqs. 14-20 e 14-21,

$$\rho_f CLhg - \rho CLHg = 0,$$

e, portanto,

$$h = \frac{\rho}{\rho_f} H = \frac{800 \text{ kg/m}^3}{1200 \text{ kg/m}^3} (6,0 \text{ cm}) = 4,0 \text{ cm}.$$

(Resposta)

(b) Se o bloco é totalmente imerso e depois liberado, qual é o módulo da sua aceleração?

Cálculos: A força gravitacional que age sobre o bloco é a mesma, mas agora, com o bloco totalmente submerso, o volume da água deslocada é $V = CLH$. (É usada a altura total do bloco.) Isso significa que $F_E > F_g$ e o bloco é acelerado para cima. De acordo com a segunda lei de Newton,

$$F_E - F_g = ma,$$

ou

$$\rho_f CLHg - \rho CLHg = \rho CLHa,$$

onde substituímos a massa do bloco por ρCLH . Explícitando a , obtemos

$$a = \left(\frac{\rho_f}{\rho} - 1 \right) g = \left(\frac{1200 \text{ kg/m}^3}{800 \text{ kg/m}^3} - 1 \right) (9,8 \text{ m/s}^2) = 4,9 \text{ m/s}^2.$$

(Resposta)

14-8 | Fluidos Ideais em Movimento

O movimento de *fluidos reais* é muito complicado, e ainda não está perfeitamente compreendido. Por essa razão, vamos discutir apenas o movimento de um **fluido ideal**, que é mais fácil de analisar matematicamente. Nosso fluido ideal satisfaz quatro requisitos, que estão relacionados ao seu *escoamento*:

- Escoamento laminar** No *escoamento laminar*, a velocidade do fluido em um ponto fixo qualquer não varia com o tempo, nem em módulo nem em orientação. O escoamento suave da água no centro de um rio de águas calmas é estacionário; o escoamento da água em uma corredeira, não. A Fig. 14-13 mostra a transição de escoamento laminar para *turbulento* em um fluxo de fumaça. A velocidade das partículas de fumaça aumenta à medida que sobem; para um certo valor crítico da velocidade, o escoamento muda de laminar para turbulento.
- Escoamento incompressível** Supomos, como para fluidos em repouso, que nosso fluido ideal é incompressível, ou seja, que sua massa específica tem um valor uniforme e constante.
- Escoamento não-viscoso** Em termos coloquiais, a viscosidade de um fluido é uma medida da resistência que o fluido oferece ao escoamento. Assim, por

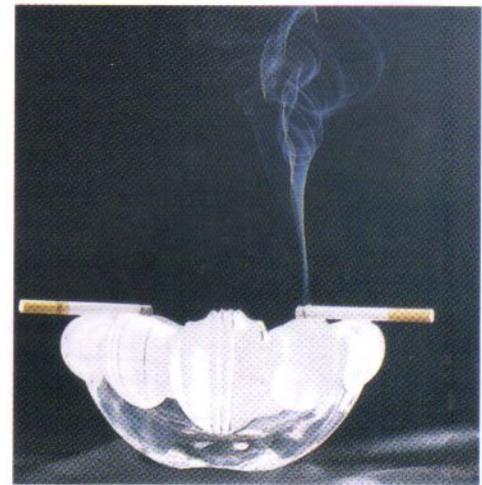


FIG. 14-13 Em certo ponto, o escoamento ascendente de fumaça e gás aquecido muda de laminar para turbulento. (Will McIntyre/Photo Researchers)

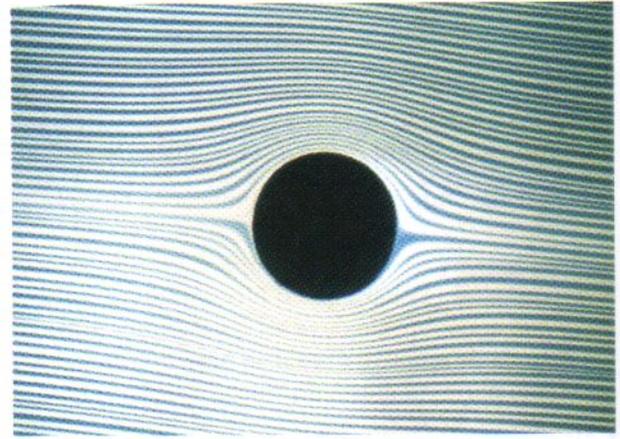


FIG. 14-14 O escoamento laminar de um fluido ao redor de um cilindro, revelado por um corante injetado no fluido antes que este passe pelo cilindro. (Cortesia de D.H. Peregrine, University of Bristol)

exemplo, o mel resiste mais ao escoamento que a água e, portanto, é mais viscoso do que a água. A viscosidade dos fluidos é análoga ao atrito entre sólidos; ambos são mecanismos através dos quais a energia cinética de objetos em movimento pode ser transferida para energia térmica. Na ausência de atrito, um bloco desliza com velocidade constante em uma superfície horizontal. Analogamente, um objeto imerso em um fluido não-viscoso não experimenta uma *força de arrasto viscoso* e se move com velocidade constante através do fluido. O cientista inglês Lorde Rayleigh observou que em um fluido ideal as hélices de um navio não funcionariam, mas, por outro lado, em um fluido ideal um navio (uma vez em movimento) não precisaria de hélices!

4. **Escoamento irrotacional** Embora a rigor não seja necessário, vamos também supor que o escoamento é *irrotacional*. Para entender o que significa esta propriedade, suponha que um pequeno grão de poeira se move com o fluido. Se o escoamento é irrotacional, este grão de areia não gira em torno de um eixo que passa pelo seu centro de massa, embora possa girar em torno de um outro eixo qualquer. O movimento de uma roda gigante, por exemplo, é rotacional, enquanto o movimento dos passageiros é irrotacional.

Podemos observar o escoamento de um fluido usando um *traçador*, que pode ser constituído por gotas de corante injetadas em vários pontos de um líquido (Fig. 14-14) ou por partículas de fumaça misturadas a um gás (Fig. 14-13). Cada gota ou partícula de um traçador torna visível uma *linha de fluxo*, que é a trajetória seguida por um pequeno elemento do fluido. Como vimos no Capítulo 4, a velocidade de uma partícula é sempre tangente à trajetória da partícula. Neste caso, a partícula é o elemento do fluido e sua velocidade \vec{v} é sempre tangente a uma linha de fluxo (Fig. 14-15). Por essa razão, duas linhas de fluxo jamais se cruzam; se o fizessem, uma partícula que chegasse ao ponto de interseção poderia ter ao mesmo tempo duas velocidades diferentes, o que seria um absurdo.



FIG. 14-15 Um elemento do fluido traça uma linha de fluxo ao se deslocar. O vetor velocidade do elemento é tangente à linha de fluxo em todos os pontos.

14-9 | A Equação de Continuidade

Você provavelmente já observou que é possível aumentar a velocidade da água que sai de uma mangueira de jardim fechando parcialmente o bico da mangueira com o polegar. Esta é uma demonstração prática do fato de que a velocidade v da água depende da área de seção reta A através da qual a água escoar.

Vamos agora deduzir uma expressão que relaciona v e A no caso do escoamento laminar de um fluido ideal em um tubo de seção reta variável, como o da Fig. 14-16. O escoamento é para a direita e o segmento de tubo mostrado (parte de um tubo mais longo) tem comprimento L . A velocidade do fluido é v_1 na extremidade esquerda e v_2 na extremidade direita. A área da seção reta do tubo é A_1 na extremidade esquerda e A_2 na extremidade direita. Suponha que em um intervalo de tempo Δt um volume

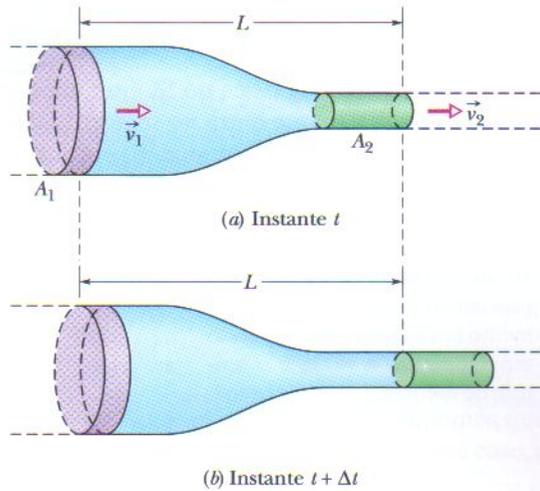


FIG. 14-16 Um fluido escoá da esquerda para a direita com vazão constante através de um segmento de tubo de comprimento L . A velocidade do fluido é v_1 no lado esquerdo e v_2 no lado direito. A área de seção reta é A_1 no lado esquerdo e A_2 no lado direito. Do instante t em (a) até o instante $t + \Delta t$ em (b), a quantidade de fluido mostrada em cor violeta entra do lado esquerdo e uma quantidade igual, mostrada em cor verde, sai do lado direito.

ΔV do fluido entre no segmento de tubo pela extremidade esquerda (este volume é violeta na Fig. 14-16). Como o fluido é incompressível, um volume igual ΔV deve sair pela extremidade direita do tubo (este volume é verde na Fig. 14-16).

Podemos usar este volume ΔV comum às duas extremidades para relacionar as velocidades e áreas. Para isso, consideremos primeiramente a Fig. 14-17, que mostra uma vista lateral de um tubo de seção reta *uniforme* de área A . Na Fig. 14-17a, um elemento e do fluido está prestes a passar pela reta tracejada perpendicular ao eixo do tubo. Se a velocidade do elemento é v , durante um intervalo de tempo Δt o elemento percorre uma distância $\Delta x = v\Delta t$ ao longo do tubo. O volume ΔV do fluido que passa pela reta tracejada durante este intervalo de tempo Δt é

$$\Delta V = A \Delta x = Av \Delta t. \quad (14-22)$$

Aplicando a Eq. 14-22 às duas extremidades do segmento de tubo da Fig. 14-14, temos:

$$\Delta V = A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t$$

ou
$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (\text{equação de continuidade}). \quad (14-23)$$

Esta relação entre velocidade e área da seção reta é chamada de **equação de continuidade** para o escoamento de um fluido ideal. Ela nos diz que a velocidade do escoamento aumenta quando a área da seção reta através da qual o fluido escoá é reduzida (como acontece quando fechamos parcialmente o bico de uma mangueira de jardim com o polegar).

A Eq. 14-23 se aplica não só a um tubo real, mas também a qualquer *tubo de fluxo*, um tubo imaginário limitado por linhas de fluxo. Um tubo de fluxo se comporta como um tubo real porque nenhum elemento do fluido pode cruzar uma linha de fluxo; assim, todo o fluido contido em um tubo de fluxo permanece indefinidamente no seu interior. A Fig. 14-18 mostra um tubo de fluxo no qual a área de seção reta aumenta de A_1 para A_2 no sentido do escoamento. De acordo com a Eq. 14-23, com o aumento da área a velocidade deve diminuir, como mostra o espaçamento maior das linhas de fluxo no lado direito da Fig. 14-18. De modo semelhante, o menor espaçamento das linhas de fluxo na Fig. 14-14 revela que a velocidade de escoamento é maior logo acima e logo abaixo do cilindro.

A Eq. 14-23 pode ser escrita na forma

$$R_V = Av = \text{constante} \quad (\text{vazão, equação de continuidade}), \quad (14-24)$$

onde R_V é a **vazão** do fluido (volume que passa por uma seção reta por unidade de tempo). A unidade de vazão no SI é o metro cúbico por segundo (m^3/s). Se a massa específica ρ do fluido é uniforme, podemos multiplicar a Eq. 14-24 por essa massa específica para obter a **vazão mássica** R_m (massa por unidade de tempo):

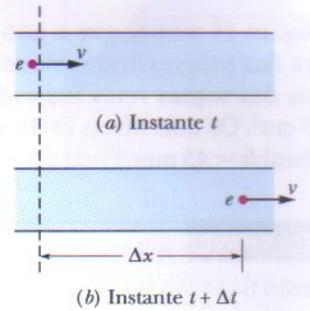


FIG. 14-17 Um fluido escoá com velocidade v constante em um tubo. (a) No instante t , o elemento do fluido e está prestes a passar pela reta tracejada. (b) No instante $t + \Delta t$, o elemento e está a uma distância $\Delta x = v\Delta t$ da reta tracejada.

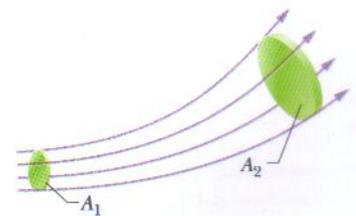


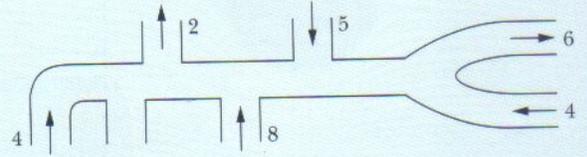
FIG. 14-18 Um tubo de fluxo é definido pelas linhas de fluxo que o envolvem. A vazão é a mesma em todas as seções retas de um tubo de fluxo.

$$R_m = \rho R_V = \rho A v = \text{constante} \quad (\text{vazão mássica}). \quad (14-25)$$

A unidade de vazão mássica no SI é o quilograma por segundo (kg/s). A Eq. 14-25 nos diz que a massa que entra no segmento de tubo da Fig. 14-16 por segundo deve ser igual à massa que sai do segmento por segundo.



TESTE 3 A figura mostra um encanamento e indica a vazão (em cm^3/s) e o sentido do escoamento em todos os canos exceto um. Quais são a vazão e o sentido do escoamento neste cano?



Exemplo 14-6

A Fig. 14-19 mostra que o jato de água que sai de uma torneira fica progressivamente mais fino durante a queda. As áreas das seções retas indicadas são $A_0 = 1,2 \text{ cm}^2$ e $A = 0,35 \text{ cm}^2$. Os dois níveis estão separados por uma distância vertical $h = 45 \text{ mm}$. Qual é a vazão da torneira?

IDÉIA-CHAVE

A vazão na seção reta maior deve ser igual à vazão na seção reta menor.

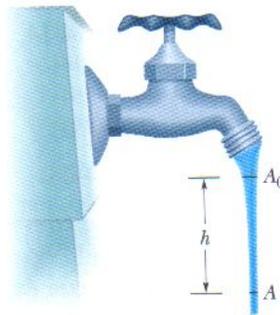


FIG. 14-19 Quando a água cai de uma torneira, sua velocidade aumenta. Como a vazão deve ser a mesma em todas as seções retas horizontais, o jorro tem que ficar mais estreito.

Cálculos: De acordo com a Eq. 14-24, temos:

$$A_0 v_0 = A v, \quad (14-26)$$

onde v_0 e v são as velocidades da água nos níveis correspondentes a A_0 e A . De acordo com a Eq. 2-16, também podemos escrever, já que a água cai livremente com aceleração g ,

$$v^2 = v_0^2 + 2gh. \quad (14-27)$$

Combinando as Eqs. 14-26 e 14-27 para eliminar v e explicitando v_0 , obtemos

$$\begin{aligned} v_0 &= \sqrt{\frac{2ghA^2}{A_0^2 - A^2}} \\ &= \sqrt{\frac{(2)(9,8 \text{ m/s}^2)(0,045 \text{ m})(0,35 \text{ cm}^2)^2}{(1,2 \text{ cm}^2)^2 - (0,35 \text{ cm}^2)^2}} \\ &= 0,286 \text{ m/s} = 28,6 \text{ cm/s}. \end{aligned}$$

De acordo com a Eq. 14-24, a vazão R_V é, portanto,

$$\begin{aligned} R_V &= A_0 v_0 = (1,2 \text{ cm}^2)(28,6 \text{ cm/s}) \\ &= 34 \text{ cm}^3/\text{s}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

14-10 | A Equação de Bernoulli

A Fig. 14-20 mostra um tubo através do qual um fluido ideal escoava com vazão constante. Suponha que, em um intervalo de tempo Δt , um volume ΔV do fluido, de cor violeta na Fig. 14-20, entra pela extremidade esquerda (entrada) do tubo e um volume igual, de cor verde na Fig. 14-20, sai pela extremidade direita (saída) do tubo. Como o fluido é incompressível, com uma massa específica constante ρ , o volume que sai deve ser igual ao volume que entra.

Sejam y_1 , v_1 e p_1 a altura, a velocidade e a pressão do fluido que entra do lado esquerdo, e y_2 , v_2 e p_2 os valores correspondentes do fluido que sai do lado direito. Aplicando ao fluido a lei de conservação da energia, vamos mostrar que esses valores estão relacionados através da equação

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2. \quad (14-28)$$

onde o termo $\frac{1}{2} \rho v^2$ é chamado de **energia cinética específica** (energia cinética por unidade de volume) do fluido. A Eq. 14-28 também pode ser escrita na forma

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{constante} \quad (\text{equação de Bernoulli}). \quad (14-29)$$

As Eqs. 14-28 e 14-29 são formas equivalentes da **equação de Bernoulli**, que tem este nome por causa de Daniel Bernoulli, que estudou o escoamento de fluidos no século XVIII.* Como a equação da continuidade (Eq. 14-24), a equação de Bernoulli não é um princípio novo, mas simplesmente uma reformulação de um princípio conhecido em uma forma mais adequada para a mecânica dos fluidos. Como teste, vamos aplicar a equação de Bernoulli a um fluido em repouso, fazendo $v_1 = v_2 = 0$ na Eq. 14-28. O resultado é

$$p_2 = p_1 + \rho g(y_1 - y_2),$$

que é a Eq. 14-7.

Uma previsão importante da equação de Bernoulli surge quando supomos que y é constante ($y = 0$, digamos), ou seja, que a altura do fluido não varia. Nesse caso, a Eq. 14-28 se torna

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2, \quad (14-30)$$

ou, em palavras,

Se a velocidade de um fluido aumenta enquanto ele se move horizontalmente ao longo de uma linha de fluxo, a pressão do fluido diminui, e vice-versa.

Isso significa que nas regiões em que as linhas de fluxo estão mais concentradas (ou seja, em que a velocidade é maior) a pressão é menor, e vice-versa.

A relação entre uma mudança de velocidade e uma mudança de pressão faz sentido quando consideramos um elemento do fluido. Quando o elemento se aproxima de uma região estreita a pressão mais elevada atrás dele o acelera, de modo que ele adquire uma velocidade maior. Quando o elemento se aproxima de uma região mais larga a pressão maior à frente o desacelera, de modo que ele adquire uma velocidade menor.

A equação de Bernoulli é estritamente válida apenas para fluidos ideais. Quando forças viscosas estão presentes parte da energia é convertida em energia térmica. Na demonstração que se segue vamos supor que o fluido é ideal.

Demonstração da Equação de Bernoulli

Vamos considerar como nosso sistema o volume inteiro do fluido (ideal) da Fig. 14-20. Vamos aplicar a lei de conservação da energia a este sistema quando ele se move do estado inicial (Fig. 14-20a) para o estado final (Fig. 14-20b). O fluido que está entre os dois planos verticais separados por uma distância L na Fig. 14-20 não muda suas propriedades durante esse processo; precisamos nos preocupar apenas com as mudanças que ocorrem nas extremidades de entrada e saída.

Para começar, aplicamos a lei de conservação da energia na forma do teorema do trabalho e energia cinética,

$$W = \Delta K, \quad (14-31)$$

que nos diz que a variação da energia cinética do nosso sistema deve ser igual ao trabalho total realizado sobre o sistema. A variação da energia cinética é uma consequência da variação da velocidade do fluido entre as extremidades do tubo, e é dada por

$$\begin{aligned} \Delta K &= \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2), \end{aligned} \quad (14-32)$$

*Se a vazão for irrotacional (como estamos supondo neste livro), a constante da Eq. 14-29 tem o mesmo valor em todos os pontos do tubo; os pontos não precisam pertencer à mesma linha de fluxo. Da mesma forma, na Eq. 14-28 os pontos 1 e 2 podem estar em qualquer lugar do tubo.

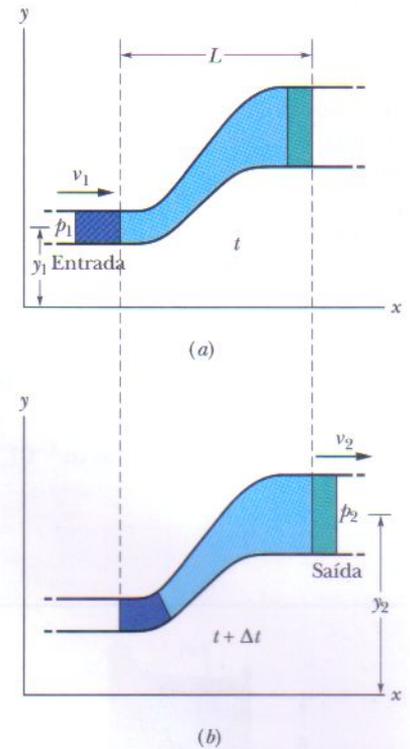


FIG. 14-20 Um fluido escoou com vazão constante através de um comprimento L de um tubo, da extremidade de entrada, à esquerda, até a extremidade de saída, à direita. Do instante t em (a) ao instante $t + \Delta t$ em (b) uma quantidade de fluido, representada na cor violeta, entra pela extremidade esquerda e uma quantidade igual, representada na cor verde, sai pela extremidade direita.

onde $\Delta m (= \rho \Delta V)$ é a massa do fluido que entra em uma extremidade e sai pela outra extremidade durante um pequeno intervalo de tempo Δt .

O trabalho realizado sobre o sistema tem duas origens. O trabalho W_g realizado pela força gravitacional ($\Delta m \vec{g}$) sobre o fluido de massa Δm durante a subida da massa do nível da entrada até o nível da saída é dado por

$$\begin{aligned} W_g &= -\Delta m g(y_2 - y_1) \\ &= -\rho g \Delta V (y_2 - y_1). \end{aligned} \quad (14-33)$$

Este trabalho é negativo, porque o deslocamento para cima e a força gravitacional para baixo têm sentidos opostos.

Algum trabalho também precisa ser realizado *sobre* o sistema (na extremidade de entrada) para empurrar o fluido para dentro do tubo e *pelo* sistema (na extremidade de saída) para empurrar o fluido que está mais adiante no tubo. O trabalho realizado por uma força de módulo F , agindo sobre uma amostra do fluido contida em um tubo de área A para mover o fluido a uma distância Δx , é

$$F \Delta x = (pA)(\Delta x) = p(A \Delta x) = p \Delta V.$$

O trabalho realizado sobre o sistema é, portanto, $p_1 \Delta V$, e o trabalho realizado pelo sistema é $-p_2 \Delta V$. A soma dos dois trabalhos, W_p , é

$$\begin{aligned} W_p &= -p_2 \Delta V + p_1 \Delta V \\ &= -(p_2 - p_1) \Delta V. \end{aligned} \quad (14-34)$$

Assim, a Eq. 14-31 se torna

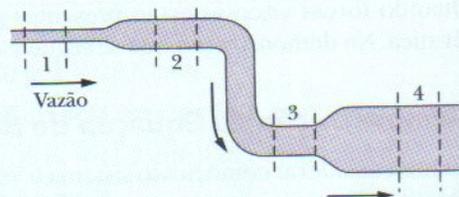
$$W = W_g + W_p = \Delta K.$$

Combinando as Eqs. 14-32, 14-33 e 14-34, obtemos

$$-\rho g \Delta V (y_2 - y_1) - \Delta V (p_2 - p_1) = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2).$$

Cancelando ΔV e reagrupando os termos, obtemos a Eq. 14-28, que queríamos demonstrar.

✓ TESTE 4 A água escoar suavemente pela tubulação da figura, descendo no processo. Ordene as quatro seções numeradas da tubulação de acordo com (a) a vazão R_V , (b) a velocidade v e (c) a pressão p do fluido, em ordem decrescente.



Exemplo 14-7

Um cano horizontal de calibre variável (como o da Fig. 14-16), cuja seção reta muda de $A_1 = 1,20 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ para $A_2 = A_1/2$, conduz um fluxo laminar de etanol, de massa específica $\rho = 791 \text{ kg/m}^3$. A diferença de pressão entre a parte larga e a parte estreita do cano é 4120 Pa. Qual é a vazão R_V de etanol?

IDÉIAS-CHAVE (1) Como todo fluido que passa pela parte mais larga do cano também passa pela parte mais estreita, a vazão R_V deve ser a mesma nas duas partes. Assim, de acordo com a Eq. 14-24,

$$R_V = v_1 A_1 = v_2 A_2. \quad (14-35)$$

Entretanto, como não conhecemos as duas velocidades, não podemos calcular R_V a partir desta equação. (2) Como o escoamento é laminar, podemos aplicar a equação de Bernoulli. De acordo com a Eq. 14-28, temos:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y, \quad (14-36)$$

onde os índices 1 e 2 se referem às partes larga e estreita do cano, respectivamente, e y é a altura comum às duas partes. Esta equação não parece muito útil para a solução do problema, pois não contém a vazão procurada R_V e contém as velocidades desconhecidas v_1 e v_2 .

Cálculos: Existe uma forma engenhosa de fazer a Eq. 14-36 trabalhar para nós. Primeiro, podemos usar a Eq. 14-35 e o fato de que $A_2 = A_1/2$ para escrever

$$v_1 = \frac{R_V}{A_1} \quad \text{e} \quad v_2 = \frac{R_V}{A_2} = \frac{2R_V}{A_1}. \quad (14-37)$$

Em seguida, podemos substituir essas expressões na Eq. 14-36 para eliminar as velocidades desconhecidas e introduzir a vazão procurada. Fazendo isso e explicitando R_V , obtemos

$$R_V = A_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{3\rho}}. \quad (14-38)$$

Ainda temos uma decisão a tomar. Sabemos que a diferença de pressão entre as duas partes é 4120 Pa, mas isso significa que $p_1 - p_2 = 4120$ Pa ou -4120 Pa? Podemos supor que a primeira hipótese deve ser a verdadeira, pois de outra forma a raiz quadrada na Eq. 14-38

não seria um número real. Em vez disso, porém, vamos raciocinar um pouco. De acordo com a Eq. 14-35, a velocidade v_2 na parte estreita deve ser maior do que a velocidade v_1 na parte larga para que os produtos $v_1 A_1$ e $v_2 A_2$ sejam iguais. Sabemos também que se a velocidade de um fluido aumenta enquanto ele escoar em um cano horizontal (como neste caso), a pressão do fluido diminui. Assim, p_1 é maior que p_2 , e $p_1 - p_2 = 4120$ Pa. Substituindo este resultado e os valores conhecidos na Eq. 14-38, obtemos

$$\begin{aligned} R_V &= 1,20 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \sqrt{\frac{(2)(4120 \text{ Pa})}{(3)(791 \text{ kg/m}^3)}} \\ &= 2,24 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (\text{Resposta}) \end{aligned}$$

Exemplo 14-8

No velho Oeste, um bandido atira em uma caixa d'água sem tampa (Fig. 14-21), abrindo um furo a uma distância h da superfície da água. Qual é a velocidade v da água ao sair da caixa d'água?

IDÉIAS-CHAVE

(1) Esta situação é equivalente à da água descendo com velocidade v_0 por um cano largo (o tanque) de seção reta A e depois se movendo (horizontalmente) com velocidade v em um cano estreito (o furo) de seção reta a . (2) Como toda água que passa pelo cano largo passa também pelo cano estreito, a vazão R_V deve ser a mesma nos dois "canos". (3) Podemos também relacionar v a v_0 (e a h) através da equação de Bernoulli (Eq. 14-28).

Cálculos: De acordo com a Eq. 14-24,

$$R_V = av = Av_0$$

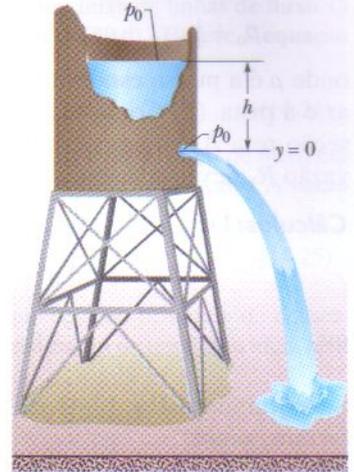
e portanto

$$v_0 = \frac{a}{A} v.$$

Como $a \ll A$, vemos que $v_0 \ll v$. Para aplicar a equação de Bernoulli tomamos o nível do furo como nosso nível de referência para a medida de altura (e, portanto, da energia potencial gravitacional). Notando que a pressão no alto da caixa d'água no local do furo é a pressão atmosférica p_0 (pois os dois locais estão expostos à atmosfera), escrevemos a Eq. 14-28 como

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 + \rho gh = p_0 + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g(0). \quad (14-39)$$

FIG. 14-21 A água sai de um tanque por um furo situado a uma distância h da superfície da água. A pressão na superfície da água e no local do furo é a pressão atmosférica p_0 .



(O alto do tanque é representado pelo lado esquerdo da equação, e o furo pelo lado direito. O zero do lado direito indica que o furo está no nível de referência.) Antes de explicitar v na Eq. 14-39, podemos usar nosso resultado de que $v_0 \ll v$ para simplificá-la: supomos que v_0^2 , e portanto o termo $\frac{1}{2} \rho v_0^2$ na Eq. 14-39 é desprezível em comparação com os outros termos, e o abandonamos. Explicitando v na equação restante, obtemos

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (\text{Resposta})$$

Esta é a mesma velocidade que um objeto teria se caísse de uma altura h a partir do repouso.

Exemplo 14-9 Aumente sua capacidade

Muitos modelos de carros de corrida utilizam a *sustentação negativa* (ou *downforce*) para aumentar o atrito dos pneus com a pista e poder fazer as curvas mais depressa sem derrapar. Parte da sustentação negativa se deve ao *efeito solo*, que é uma força associada ao fluxo de ar por baixo do

carro. Quando o carro de corrida da Fig. 14-22 se desloca a 27,25 m/s, o ar é forçado a passar por cima e por baixo do carro (Fig. 14-22a). O ar que passa por baixo do carro entra por uma abertura na frente do carro cuja seção reta é $A_0 = 0,0330 \text{ m}^2$ (Fig. 14-22b) e passa pelo espaço entre o

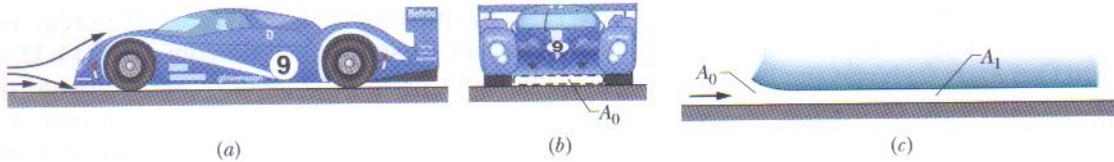


FIG. 14-22 (a) O ar passa por cima e por baixo de um carro de corrida. (b) Na parte de baixo o ar entra por uma abertura de seção reta A_0 . (c) Em seguida, o ar é comprimido em uma região de seção reta A_1 .

fundo do carro e a pista, cuja seção reta é $A_1 = 0,0310 \text{ m}^2$. Trate este fluxo como o de um fluido ideal em cano estacionário horizontal, cuja seção reta diminui de A_0 para A_1 (Fig. 14-22c).

(a) No momento em que passa por A_0 , o ar está à pressão atmosférica p_0 . Qual é a pressão p_1 quando o ar passa por A_1 ?

IDÉIAS-CHAVE

(1) Como o fluxo é laminar, podemos usar a equação de Bernoulli (Eq. 14-28). Nesse caso, a equação assume a forma

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 + \rho g y = p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y, \quad (14-40)$$

onde ρ é a massa específica do ar e y é a distância entre o ar e a pista. (2) Como todo ar que entra pela abertura de seção reta A_0 passa pela região onde a seção reta é A_1 , a vazão R_V deve ser a mesma nas duas regiões.

Cálculos: De acordo com a Eq. 14-24, temos:

$$A_0 v_0 = A_1 v_1,$$

$$\text{ou} \quad v_1 = v_0 \frac{A_0}{A_1}. \quad (14-41)$$

Substituindo a Eq. 14-41 na Eq. 14-40 e reagrupando os termos, temos:

$$p_1 = p_0 - \frac{1}{2} \rho v_0^2 \left(\frac{A_0^2}{A_1^2} - 1 \right). \quad (14-42)$$

A velocidade do ar ao entrar em A_0 , na frente do carro, é $27,25 \text{ m/s}$, a velocidade do carro em relação ao ar. Substituindo esta velocidade, a massa específica do ar $\rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$ e os valores de A_0 e A_1 na Eq. 14-42, obtemos

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 - \frac{1}{2} (1,21 \text{ kg/m}^3) (27,25 \text{ m/s})^2 \left(\frac{(0,0330 \text{ m}^2)^2}{(0,0310 \text{ m}^2)^2} - 1 \right) \\ &= p_0 - 59,838 \text{ Pa} \approx p_0 - 59,8 \text{ Pa}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Assim, a pressão do ar debaixo do carro é $59,8 \text{ Pa}$ menor que a pressão atmosférica.

(b) Se a área da seção reta horizontal do carro é $A_h = 4,86 \text{ m}^2$, qual é o módulo da força resultante vertical $F_{\text{res},h}$ que age sobre o carro por causa da diferença de pressão acima e abaixo do carro?

IDÉIA-CHAVE

De acordo com a Eq. 14-4 ($p = F/A$), a pressão a que uma superfície está sujeita é igual à força por unidade de área.

Cálculos: Nesse caso, estamos interessados nas superfícies superior e inferior do carro. Vamos supor que as duas superfícies possuem a mesma área A_h . Acima do carro, o ar se encontra à pressão atmosférica p_0 e exerce uma força sobre o carro cuja componente vertical é dada por

$$F_{y,\text{acima}} = -p_0 A_h.$$

Abaixo do carro, o ar se encontra à pressão $p_1 = p_0 - 59,838 \text{ Pa}$ e exerce uma força sobre o carro cuja componente vertical é dada por

$$F_{y,\text{abaixo}} = (p_0 - 59,838 \text{ Pa}) A_h.$$

A força vertical resultante é, portanto,

$$\begin{aligned} F_{\text{res},y} &= F_{y,\text{abaixo}} + F_{y,\text{acima}} \\ &= (p_0 - 59,838 \text{ Pa}) A_h - p_0 A_h \\ &= -(59,838 \text{ Pa})(4,86 \text{ m}^2) = -291 \text{ N}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

O risco de "pegar o vácuo": Esta força resultante para baixo, que se deve à pressão reduzida que existe debaixo do carro, é chamada de efeito solo e é responsável por cerca de 30% da sustentação negativa que ajuda a manter o carro na pista. Se não houvesse a sustentação negativa um carro de corrida teria que reduzir drasticamente a velocidade nas curvas para não derrapar. Em uma corrida um piloto pode diminuir a resistência que o ar exerce sobre o seu carro seguindo de perto um outro carro, uma tática conhecida como *pegar o vácuo*. Entretanto, o carro da frente perturba o escoamento laminar do ar sob o carro de trás, eliminando o efeito solo. Se o piloto do carro de trás não reduzir a velocidade na curva para compensar a falta do efeito solo, uma derrapagem pode ser inevitável.

REVISÃO E RESUMO

Massa Específica A massa específica ρ de qualquer material é definida como a massa do material por unidade de volume:

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}. \quad (14-1)$$

Quando uma amostra do material é muito maior do que as dimensões atômicas, costumamos escrever a Eq. 14-1 na forma

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (14-2)$$

Pressão de um Fluido Um **fluido** é uma substância que pode escoar; ele se amolda aos contornos do recipiente porque não resiste a tensões de cisalhamento. Pode, porém, exercer uma força perpendicular à superfície. Essa força é descrita em termos da **pressão** p :

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta A}, \quad (14-3)$$

onde ΔF é a força que age sobre um elemento da superfície de área ΔA . Se a força é uniforme em uma área plana, a Eq. 14-3 pode ser escrita na forma

$$p = \frac{F}{A}. \quad (14-4)$$

A força associada à pressão em um ponto de um fluido tem o mesmo módulo em todas as direções. A **pressão manométrica** é a diferença entre a pressão real (ou *pressão absoluta*) em um ponto e a pressão atmosférica.

Variação da Pressão com a Altura e com a Profundidade A pressão em um fluido em repouso varia com a posição vertical y . Tomando como positivo o sentido para cima,

$$p_2 = p_1 + \rho g(y_1 - y_2). \quad (14-7)$$

A pressão em um fluido é a mesma para todos os pontos situados à mesma altura. Se h é a *profundidade* de uma amostra do fluido em relação a um nível de referência no qual a pressão é p_0 , a Eq. 14-7 se torna

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (14-8)$$

onde p é a pressão da amostra.

Princípio de Pascal Uma variação da pressão aplicada a um fluido incompressível contido em um recipiente é transmitida integralmente a todas as partes do fluido e às paredes do recipiente.

Princípio de Arquimedes Quando um corpo está total ou parcialmente submerso em um fluido, uma força de empuxo \vec{F}_E exercida pelo fluido age sobre o corpo. A força é dirigida para cima e tem um módulo dado por

$$F_E = m_f g, \quad (14-16)$$

onde m_f é a massa do fluido deslocado pelo corpo.

Quando um corpo flutua em um fluido, o módulo F_E do empuxo (para cima) que age sobre o corpo é igual ao módulo F_g da força gravitacional (para baixo) que age sobre ele. O **peso aparente** de um corpo sobre o qual atua um empuxo está relacionado ao peso real através da equação

$$\text{peso}_{\text{ap}} = \text{peso} - F_E. \quad (14-19)$$

Escoamento de Fluidos Ideais Um **fluido ideal** é incompressível, não tem viscosidade e seu escoamento é laminar e irrotacional. Uma *linha de fluxo* é a trajetória seguida por uma partícula do fluido. Um *tubo de fluxo* é um feixe de linhas de fluxo. O escoamento no interior de um tubo de fluxo obedece à **equação da continuidade**:

$$R_V = Av = \text{constante}, \quad (14-24)$$

onde R_V é a **vazão**, A é a área da seção reta do tubo de fluxo em qualquer ponto e v é a velocidade do fluido nesse ponto. A **vazão mássica** R_m é dada por

$$R_m = \rho R_V = \rho Av = \text{constante}. \quad (14-25)$$

Equação de Bernoulli A aplicação do princípio de conservação da energia mecânica ao escoamento de um fluido ideal leva à **equação de Bernoulli**:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gy = \text{constante} \quad (14-29)$$

ao longo de qualquer tubo de fluxo.

PERGUNTAS

1 O efeito bule. A água derramada lentamente de um bule pode mudar de sentido e escorrer por uma distância considerável por baixo do bico do bule, antes de se desprender e cair. (A água é mantida sob o bico pela pressão atmosférica.) Na Fig. 14-23, na camada de água do lado de dentro do bico, o ponto a está no alto e o ponto b está no fundo da camada; na camada de água do lado de fora do bico, o ponto c está no alto e o ponto d está no fundo da camada. Ordene os quatro pontos de acordo com a pressão manométrica a que a água está sujeita, da mais positiva para a mais negativa.

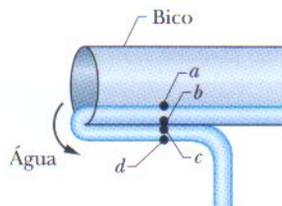


FIG. 14-23 Pergunta 1.

2 A Fig. 14-24 mostra um tanque cheio de água. Cinco pisos e tetos horizontais estão indicados; todos têm a mesma área e estão situados a uma distância L , $2L$ ou $3L$ abaixo do alto do tanque. Ordene-os de acordo com a força que a água exerce sobre eles, começando pela maior.

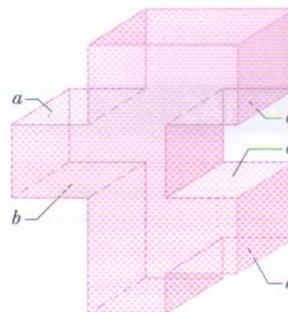


FIG. 14-24 Pergunta 2.

3 Uma peça irregular de 3 kg de um material sólido é totalmente imersa em um certo fluido. O fluido que estaria no espaço ocupado pela peça tem uma massa de 2 kg. (a) Ao ser liberada, a peça sobe, desce ou permanece no mesmo lugar? (b) Se a peça é totalmente imersa em um fluido menos denso e depois liberada, o que acontece?

4 A Fig. 14-25 mostra quatro situações nas quais um líquido vermelho e um líquido cinzento foram colocados em um tubo em forma de U. Em uma dessas situações os líquidos não podem estar em equilíbrio estático. (a) Que situação é essa? (b) Para as outras três situações, suponha que o equilíbrio é estático. Para cada uma delas a massa específica do líquido vermelho é maior, menor ou igual à massa específica do líquido cinzento?

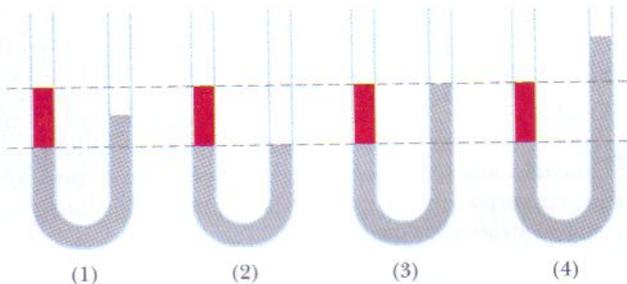


FIG. 14-25 Pergunta 4.

5 Um barco com uma âncora a bordo flutua em uma piscina um pouco mais larga do que o barco. O nível da água sobe, desce ou permanece o mesmo (a) se a âncora é jogada na água e (b) se a âncora é jogada do lado de fora da piscina? (c) O nível da água na piscina sobe, desce ou permanece o mesmo se, em vez disso, uma rolha de cortiça é lançada do barco para a água, onde flutua?

6 A Fig. 14-26 mostra três recipientes iguais, cheios até a borda; patos de brinquedo flutuam em dois deles. Ordene os três conjuntos de acordo com o peso total, em ordem decrescente.

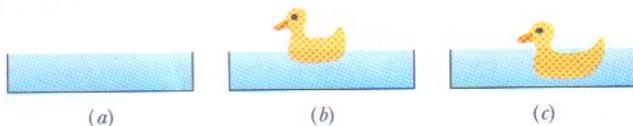


FIG. 14-26 Pergunta 6.

7 A água flui suavemente em um cano horizontal. A Fig. 14-27 mostra a energia cinética K de um elemento de água que se move ao longo de um eixo x paralelo ao

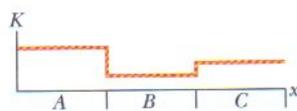


FIG. 14-27 Pergunta 7.

eixo do cano. Ordene os trechos A, B e C de acordo com o raio do cano, do maior para o menor.

8 A Fig. 14-28 mostra a pressão manométrica p_m em função da profundidade h para três líquidos. Uma esfera de plástico é totalmente imersa nos três líquidos, um de cada vez. Ordene os gráficos de acordo com o empuxo exercido sobre a esfera, do maior para o menor.

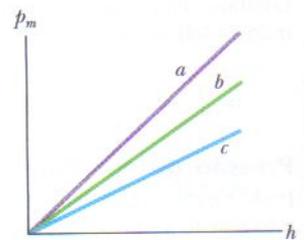


FIG. 14-28 Pergunta 8.

9 A Fig. 14-29 mostra quatro tubos nos quais a água escoava suavemente para a direita. Os raios das diferentes partes dos tubos estão indicados. Em qual dos tubos o trabalho total realizado sobre um volume unitário de água que escoava da extremidade esquerda para a extremidade direita é (a) nulo, (b) positivo e (c) negativo?

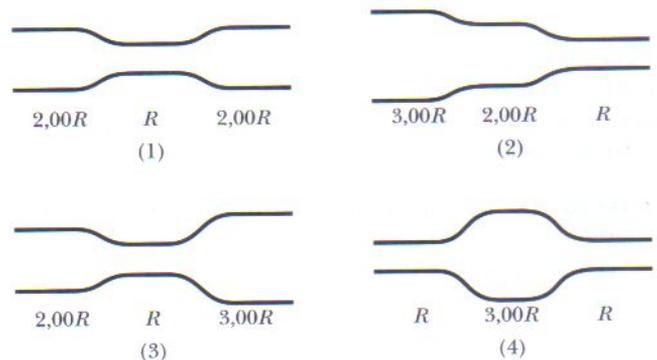


FIG. 14-29 Pergunta 9.

10 Um bloco retangular é empurrado para baixo em três líquidos, um de cada vez. O peso aparente P_{ap} do bloco em função da profundidade h é mostrado na Fig. 14-30 para os três líquidos. Ordene os líquidos de acordo com o peso por unidade de volume, do maior para o menor.

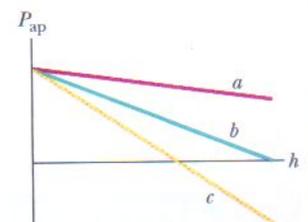


FIG. 14-30 Pergunta 10.

PROBLEMAS

• - ••• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

seção 14-3 Massa Específica e Pressão

- 1 Determine o aumento de pressão do fluido em uma seringa quando uma enfermeira aplica uma força de 42 N ao êmbolo circular da seringa, que tem um raio de 1,1 cm.
- 2 Três líquidos imiscíveis são despejados em um recipiente cilíndrico. Os volumes e massas específicas dos líquidos são: 0,50 L, 2,6 g/cm³; 0,25 L, 1,0 g/cm³; 0,40 L, 0,80 g/cm³. Qual é a força total exercida pelos líquidos sobre o fundo do recipiente? Um litro = 1 L = 1000 cm³. (Ignore a contribuição da atmosfera.)

- 3 Uma janela de escritório 3,4 m de largura por 2,1 m de altura. Como resultado da passagem de uma tempestade, a pressão do ar do lado de fora do edifício cai para 0,96 atm, mas no interior do edifício permanece em 1,0 atm. Qual é o módulo da força que empurra a janela para fora por causa dessa diferença de pressão?
- 4 Você calibra os pneus do carro com 28 psi. Mais tarde, mede a pressão arterial, obtendo uma leitura de 12/8 em cm Hg. No SI, as pressões são expressas em pascal ou seus múltiplos, como o quilopascal (kPa). Quais são, em kPa, (a) a pressão dos pneus de seu carro e (b) sua pressão arterial?

•5 Um peixe mantém sua profundidade na água doce ajustando a quantidade de ar em ossos porosos ou em bolsas de ar para tornar sua massa específica média igual à da água. Suponha que, com as bolsas de ar vazias, um certo peixe tem uma massa específica de $1,08 \text{ g/cm}^3$. Para que fração de seu volume expandido o peixe deve inflar as bolsas de ar para tornar sua massa específica igual à da água?

•6 Um recipiente hermeticamente fechado e parcialmente evacuado tem uma tampa com uma área de 77 m^2 e massa desprezível. Se a força necessária para remover a tampa é 480 N e a pressão atmosférica é $1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$, qual é a pressão do ar no interior do recipiente?

••7 Em 1654, Otto von Guericke, o inventor da bomba de vácuo, fez uma demonstração para os nobres do Sacro Império Romano na qual duas juntas de oito cavalos não puderam separar dois hemisférios de cobre evacuados. (a) Supondo que os hemisférios tinham paredes finas

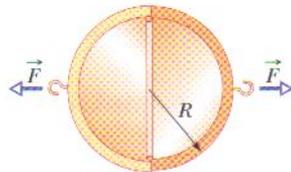


FIG. 14-31 Problema 7.

(e resistentes), de modo que R na Fig. 14-31 pode ser considerado tanto o raio interno como o raio externo, mostre que o módulo da força \vec{F} necessária para separar os hemisférios é dado por $F = \pi R^2 \Delta p$, onde Δp é a diferença entre as pressões do lado de fora e do lado de dentro da esfera. (b) Tomando R como 30 cm , a pressão interna como $0,10 \text{ atm}$ e a pressão externa como $1,00 \text{ atm}$, determine o módulo da força que as juntas de cavalos teriam que exercer para separar os hemisférios. (c) Explique por que uma única junta de cavalos poderia ter executado a mesma demonstração se um dos hemisférios estivesse preso em uma parede.

seção 14-4 Fluidos em Repouso

•8 Calcule a diferença hidrostática entre a pressão arterial no cérebro e no pé de uma pessoa com $1,83 \text{ m}$ de altura. A massa específica do sangue é $1,06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

•9 Com uma profundidade de $10,9 \text{ km}$, a fossa das Marianas, no oceano Pacífico, é o lugar mais profundo dos oceanos. Em 1960, Donald Walsh e Jacques Piccard chegaram à fossa das Marianas no batiscafo *Trieste*. Supondo que a água do mar tem uma massa específica uniforme de 1024 kg/m^3 , calcule a pressão hidrostática aproximada (em atmosferas) que o *Trieste* teve que suportar.

•10 A profundidade máxima $d_{\text{máx}}$ a que um mergulhador pode descer com um *snorkel* (tubo de respiração) é determinada pela massa específica da água e pelo fato de que os pulmões humanos não funcionam com uma diferença de pressão (entre o interior e o exterior da cavidade torácica) maior que $0,050 \text{ atm}$. Qual é a diferença entre o $d_{\text{máx}}$ da água doce e o da água do Mar Morto (a água natural mais salgada no mundo, com uma massa específica de $1,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)?

•11 Alguns membros da tripulação tentam escapar de um submarino avariado 100 m abaixo da superfície. Que força deve ser aplicada a uma escotilha de emergência, de $1,2 \text{ m}$ por $0,60 \text{ m}$, para abri-la para fora nessa profundidade? Suponha que a massa específica da água do oceano é 1024 kg/m^3 e que a pressão do ar no interior do submarino é $1,00 \text{ atm}$.

•12 O tubo de plástico da Fig. 14-32 tem uma seção reta de $5,00 \text{ cm}^2$. Introdz-se água no tubo até que o lado mais curto (de comprimento $d = 0,800 \text{ m}$) fique cheio. Em seguida, o lado menor é fechado e mais água é despejada no lado maior. Se a tampa do

lado menor é arrancada quando a força a que está submetida excede $9,80 \text{ N}$, que altura da coluna de água do lado maior deixa a tampa na iminência de ser arrancada?

•13 Que pressão manométrica uma máquina deve produzir para sugar lama com uma massa específica de 1800 kg/m^3 através de um tubo e fazê-la subir $1,5 \text{ m}$?

•14 *Embolia gasosa em viagens de avião.* Os mergulhadores são aconselhados a não viajar de avião nas primeiras 24 horas após um mergulho, porque o ar pressurizado usado durante o mergulho pode introduzir nitrogênio na corrente sanguínea. Uma redução súbita da pressão do ar (como a que acontece quando um avião decola) pode fazer com que o nitrogênio forme bolhas no sangue, que podem produzir embolias dolorosas ou mesmo fatais. Qual é a variação de pressão experimentada por um soldado da divisão de operações especiais que mergulha a 20 m de profundidade em um dia e salta de pára-quedas de uma altitude de $7,6 \text{ km}$ no dia seguinte? Suponha que a massa específica média do ar nessa faixa de altitudes seja $0,87 \text{ kg/m}^3$.

•15 *Girafa bebendo água.* Em uma girafa, com a cabeça $2,0 \text{ m}$ acima do coração e o coração $2,0 \text{ m}$ acima do solo, a pressão manométrica (hidrostática) do sangue na altura do coração é 250 torr . Suponha que a girafa está de pé e a massa específica do sangue é $1,06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Determine a pressão arterial (manométrica) em torr (a) no cérebro (a pressão deve ser suficiente para abastecer o cérebro com sangue) e (b) nos pés (a pressão deve ser compensada por uma pele esticada, que se comporta como uma meia elástica). (c) Se a girafa baixasse a cabeça bruscamente para beber água, sem afastar as pernas, qual seria o aumento da pressão arterial no cérebro? (Este aumento provavelmente causaria a morte da girafa.)

•16 Na Fig. 14-33, um tubo aberto, de comprimento $L = 1,8 \text{ m}$ e seção reta $A = 4,6 \text{ cm}^2$, penetra na tampa de um barril cilíndrico de diâmetro $D = 1,2 \text{ m}$ e altura $H = 1,8 \text{ m}$. O barril e o tubo estão cheios d'água (até o alto do tubo). Calcule a razão entre a força hidrostática que age sobre o fundo do barril e a força gravitacional que age sobre a água contida no barril. Por que a razão não é igual a $1,0$? (Não é necessário levar em conta a pressão atmosférica.)

•17 *Pressão arterial do argentino-sauro.* (a) Se a cabeça deste saurópode gigantesco ficava a 21 m de altura e o coração a $9,0 \text{ m}$, que pressão manométrica (hidrostática) era necessária na altura do coração para que a pressão no cérebro fosse 80 torr (suficiente para abastecer o cérebro)? Suponha que a massa específica do sangue do argentino-sauro era $1,06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. (b) Qual era a pressão arterial (em torr) na altura dos pés do animal?

•18 *Seres humanos e elefantes fazendo snorkel.* Quando uma pessoa faz snorkel, os pulmões ficam ligados diretamente à atmosfera através do tubo de respiração e, portanto, estão à pressão atmosférica. Qual é a diferença Δp , em atmosferas, entre a pressão interna e a pressão da água sobre o corpo do mergulhador se o comprimento do tubo de respiração é (a) 20 cm (situação



FIG. 14-32 Problemas 12 e 75.

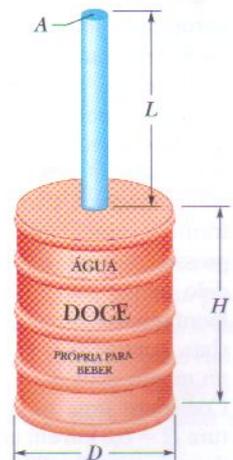


FIG. 14-33 Problema 16.

normal) e (b) 4,0 m (situação provavelmente fatal)? No segundo caso, a diferença de pressão faz os vasos sanguíneos das paredes dos pulmões se romperem, enchendo os pulmões de sangue. Como mostra a Fig. 14-34, um elefante pode usar a tromba como tubo de respiração e nadar com os pulmões 4,0 m abaixo da superfície da água porque a membrana que envolve seus pulmões contém tecido conectivo que envolve e protege os vasos sanguíneos, impedindo que se rompam.

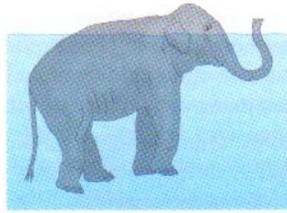


FIG. 14-34 Problema 18.

••19 Dois recipientes cilíndricos iguais, com as bases no mesmo nível, contêm um líquido de massa específica $1,30 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. A área de cada base é $4,00 \text{ cm}^2$, mas em um dos recipientes a altura do líquido é $0,854 \text{ m}$ e no outro é $1,560 \text{ m}$. Determine o trabalho realizado pela força gravitacional para igualar os níveis quando os recipientes são ligados por um tubo.

••20 *Perda de consciência dos pilotos de caça.* Quando um piloto faz uma curva muito fechada em um avião de caça moderno a pressão do sangue na altura do cérebro diminui, e o sangue deixa de abastecer o cérebro. Se o coração mantém a pressão manométrica (hidrostática) da aorta em 120 torr quando o piloto sofre uma aceleração centrípeta horizontal de $4g$, qual é a pressão sanguínea no cérebro (em torr), situado a 30 cm de distância do coração no sentido do centro da curva? A falta de sangue no cérebro pode fazer com que o piloto passe a enxergar em preto e branco e o campo visual se estreite, um fenômeno conhecido como “visão de túnel”. Caso persista, o piloto pode sofrer a chamada *g-LOC (g-induced loss of consciousness, perda de consciência induzida por g)*. A massa específica do sangue é $1,06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

••21 Na análise de certos fenômenos geológicos é muitas vezes apropriado supor que a pressão em um dado nível de compensação horizontal, muito abaixo da superfície, é a mesma em uma vasta região e é igual à pressão produzida pelo peso das rochas que se encontram acima desse nível. Assim, a pressão no nível de compensação é dada pela mesma fórmula usada para calcular a pressão de um fluido. Esse modelo exige, por exemplo, que as montanhas tenham raízes de rochas continentais que penetram no manto mais denso (Fig. 14-35). Considere uma montanha de altura $H = 6,0 \text{ km}$ em um continente de espessura $T = 32 \text{ km}$. As rochas continentais têm uma massa específica $2,9 \text{ g/cm}^3$ e o manto que fica abaixo destas rochas tem uma massa específica de $3,3 \text{ g/cm}^3$. Calcule a profundidade D da raiz. (Sugestão: Iguale as pressões nos pontos a e b ; a profundidade y do nível de compensação se cancela.)

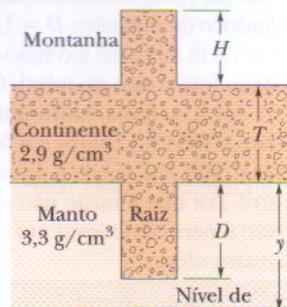


FIG. 14-35 Problema 21.

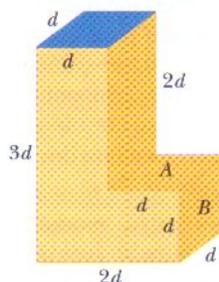


FIG. 14-36 Problema 22.

••22 O tanque em forma de L mostrado na Fig. 14-36 está cheio d'água e é aberto na parte de cima. Se $d = 5,0 \text{ m}$, qual é a força exercida pela água (a) na face A e (b) na face B?

••23 Um grande aquário de $5,00 \text{ m}$ de altura está cheio de água doce até uma altura de $2,00 \text{ m}$. Uma das paredes do aquário é feita de plástico e tem $8,00 \text{ m}$ de largura. De quanto aumenta a força exercida sobre esta parede se a altura da água é aumentada para $4,00 \text{ m}$?

•••24 Na Fig. 14-37 a água atinge uma altura $D = 35,0 \text{ m}$ atrás da face vertical de uma represa com $W = 314 \text{ m}$ de largura. Determine (a) a força horizontal que está submetida a represa por causa da pressão manométrica da água e (b) o torque produzido por essa força em relação a uma reta que passa por O e é paralela à face plana da represa. (c) Determine o braço de alavanca deste torque.

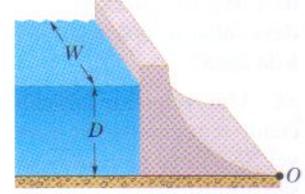


FIG. 14-37 Problema 24.

seção 14-5 Medindo a Pressão

•25 A coluna de um barômetro de mercúrio (como o da Fig. 14-5a) tem uma altura $h = 740,35 \text{ mm}$. A temperatura é $-5,0^\circ\text{C}$, na qual a massa específica do mercúrio é $\rho = 1,3608 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$. A aceleração de queda livre no local onde se encontra o barômetro é $g = 9,7835 \text{ m/s}^2$. Qual é a pressão atmosférica medida pelo barômetro em pascal e em torr (que é uma unidade muito usada para as leituras dos barômetros)?

•26 Para sugar limonada, com uma massa específica de 1000 kg/m^3 , usando um canudo para fazer o líquido subir $4,0 \text{ cm}$, que pressão manométrica mínima (em atmosferas) deve ser produzida pelos pulmões?

••27 Qual seria a altura da atmosfera se a massa específica do ar (a) fosse uniforme e (b) diminuísse linearmente até zero com a altura? Suponha que ao nível do mar a pressão do ar é $1,0 \text{ atm}$ e a massa específica do ar é $1,3 \text{ kg/m}^3$.

seção 14-6 O Princípio de Pascal

•28 Um êmbolo com uma seção reta a é usado em uma prensa hidráulica para exercer uma pequena força de módulo f sobre um líquido que está em contato, através de um tubo de ligação, com um êmbolo maior de seção reta A (Fig. 14-38). (a) Qual é o módulo F da força que deve ser aplicada ao êmbolo maior para que o sistema fique em equilíbrio? (b) Se os diâmetros dos êmbolos são $3,80 \text{ cm}$ e $53,0 \text{ cm}$, qual é o módulo da força que deve ser aplicada ao êmbolo menor para equilibrar uma força de $20,0 \text{ kN}$ aplicada ao êmbolo maior?

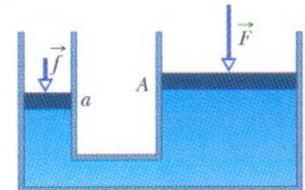


FIG. 14-38 Problema 28.

••29 Na Fig. 14-39, uma mola de constante elástica $3,00 \times 10^4 \text{ N/m}$ liga uma viga rígida ao êmbolo de saída de um macaco hidráulico. Um recipiente vazio de massa desprezível está sobre o êmbolo de entrada. O êmbolo de entrada tem uma área A_e e o êmbolo de saída tem uma área $18,0A_e$. Inicialmente a mola está relaxada. Quantos quilogramas de areia devem ser despejados (lentamente) no recipiente para que a mola sofra uma compressão de $5,00 \text{ cm}$?

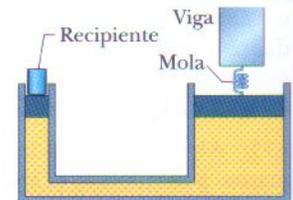


FIG. 14-39 Problema 29.

seção 14-7 O Princípio de Arquimedes

•30 Na Fig. 14-40, um cubo de aresta $L = 0,600 \text{ m}$ e 450 kg de massa é suspenso por uma corda em um tanque aberto que con-

tém um líquido de massa específica 1030 kg/m^3 . Determine (a) o módulo da força total exercida sobre a face superior do cubo pelo líquido e pela atmosfera, supondo que a pressão atmosférica é de $1,00 \text{ atm}$, (b) o módulo da força total exercida sobre a face inferior do cubo e (c) a tensão da corda. (d) Calcule o módulo da força de empuxo a que o cubo está submetido usando o princípio de Arquimedes. Que relação existe entre todas essas grandezas?

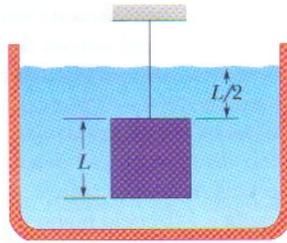


FIG. 14-40 Problema 30.

•31 Uma âncora de ferro de massa específica 7870 kg/m^3 parece ser 200 N mais leve na água que no ar. (a) Qual é o volume da âncora? (b) Quanto ela pesa no ar?

•32 Um barco que flutua em água doce desloca um volume de água que pesa $35,6 \text{ kN}$. (a) Qual é o peso da água que este barco desloca quando flutua em água salgada de massa específica $1,10 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$? (b) Qual é a diferença entre o volume de água doce e o volume de água salgada deslocados?

•33 Três crianças, todas pesando 356 N , fazem uma jangada com toras de madeira de $0,30 \text{ m}$ de diâmetro e $1,80 \text{ m}$ de comprimento. Quantas toras são necessárias para mantê-las flutuando em água doce? Suponha que a massa específica da madeira é 800 kg/m^3 .

•34 Um objeto de $5,00 \text{ kg}$ é liberado a partir do repouso quando está totalmente imerso em um líquido. O líquido deslocado pelo objeto tem uma massa de $3,00 \text{ kg}$. Que distância e em que sentido o objeto se move em $0,200 \text{ s}$, supondo que se desloca livremente e que a força de arrasto exercida pelo líquido é desprezível?

•35 Um bloco de madeira flutua em água doce com dois terços do volume V submersos e em óleo com $0,90V$ submersos. Determine a massa específica (a) da madeira e (b) do óleo.

•36 Um flutuador tem a forma de um cilindro reto, com $0,500 \text{ m}$ de altura e $4,00 \text{ m}^2$ de área das bases; sua massa específica é $0,400$ vezes a massa específica da água doce. Inicialmente o flutuador é mantido totalmente imerso em água doce, com a face superior na superfície da água. Em seguida é liberado e sobe gradualmente até começar a flutuar. Qual é o trabalho realizado pelo empuxo sobre o flutuador durante a subida?

•37 Uma esfera oca de raio interno $8,0 \text{ cm}$ e raio externo $9,0 \text{ cm}$ flutua com metade do volume submerso em um líquido de massa específica 800 kg/m^3 . (a) Qual é a massa da esfera? (b) Calcule a massa específica do material de que é feita a esfera.

•38 *Jacarés traiçoeiros.* Os jacarés costumam esperar pela presa flutuando com apenas o alto da cabeça exposto, para não serem vistos. Um meio de que dispõem para afundar mais ou menos é controlar o tamanho dos pulmões. Outro é engolir pedras (*gastrólitos*), que passam a residir no estômago. A Fig. 14-41 mostra um modelo muito simplificado de jacaré, com uma massa de 130 kg , que flutua com a cabeça parcialmente exposta. O alto da cabeça tem uma área de $0,20 \text{ m}^2$. Se o jacaré engolir pedras com uma massa total de $1,0\%$ da massa do corpo (um valor típico), de quanto afundará?

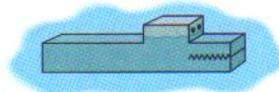


FIG. 14-41 Problema 38.

•39 Que fração do volume de um *iceberg* (massa específica 917 kg/m^3) é visível se o *iceberg* flutua (a) no mar (água salgada, massa específica 1024 kg/m^3) e (b) em um rio (água doce, massa

específica 1000 kg/m^3)? (Quando a água congela para formar gelo, o sal é deixado de lado. Assim, a água que resulta do degelo de um *iceberg* pode ser usada para beber.)

•40 Uma pequena esfera totalmente imersa em um líquido é liberada a partir do repouso, e sua energia cinética é medida depois que se desloca $4,0 \text{ cm}$ no líquido. A Fig. 14-42 mostra os resultados depois de muitos líquidos terem sido usados: a energia cinética K é plotada no gráfico em função da massa específica do líquido, ρ_{liq} , e a escala do eixo vertical é definida por $K_s = 1,60 \text{ J}$. Quais são (a) a massa específica e (b) o volume da bola?

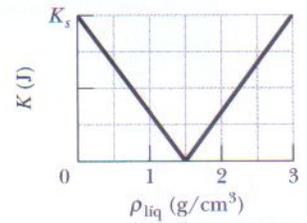
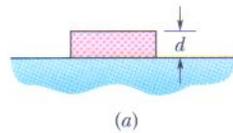


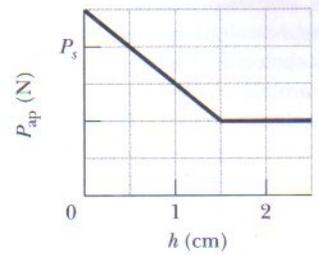
FIG. 14-42 Problema 40.

•41 Uma esfera de ferro oca flutua quase totalmente submersa em água. O diâmetro externo é $60,0 \text{ cm}$ e a massa específica do ferro é $7,87 \text{ g/cm}^3$. Determine o diâmetro interno.

•42 Na Fig. 14-43a, um bloco retangular é gradualmente empurrado para dentro de um líquido. O bloco tem uma altura d ; a área das faces superior e inferior é $A = 5,67 \text{ cm}^2$. A Fig. 14-43b mostra o peso aparente P_{ap} do bloco em função da profundidade h da face inferior. A escala do eixo vertical é definida por $P_s = 0,20 \text{ N}$. Qual é a massa específica do líquido?



(a)



(b)

FIG. 14-43 Problema 42.

•43 Uma peça de ferro contendo um certo número de cavidades pesa 6000 N no ar e 4000 N na água. Qual é o volume total de cavidades? A massa específica do ferro é $7,87 \text{ g/cm}^3$.

•44 Deixa-se cair uma pequena bola a partir do repouso em uma profundidade de $0,600 \text{ m}$ abaixo da superfície em uma piscina com água. Se a massa específica da bola é $0,300$ vezes a da água e se a força de arrasto que a água exerce sobre a bola é desprezível, que altura acima da superfície da água a bola atinge ao emergir? (Despreze a transferência de energia para as ondas e respingos produzidos pela bola ao emergir.)

•45 O volume de ar no compartimento de passageiros de um automóvel de 1800 kg é $5,00 \text{ m}^3$. O volume do motor e das rodas dianteiras é $0,750 \text{ m}^3$ e o volume das rodas traseiras, tanque de gasolina e porta-malas é $0,800 \text{ m}^3$; a água não pode penetrar nessas duas regiões. O carro cai em um lago. (a) A princípio, não entra água no compartimento de passageiros. Que volume do carro, em metros cúbicos, fica abaixo da superfície da água com o carro flutuando (Fig. 14-44)? (b) Quando a água penetra lentamente, o carro afunda. Quantos metros cúbicos de água estão dentro do carro quando ele desaparece abaixo da superfície da água? (O carro, com uma carga pesada no porta-malas, permanece na horizontal.)

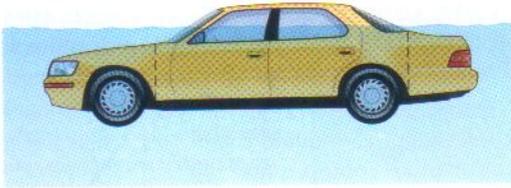


FIG. 14-44 Problema 45.

••46 Um bloco de madeira tem uma massa de 3,67 kg e uma massa específica de 600 kg/m^3 . Ele deve ser carregado de chumbo ($1,14 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$) para flutuar na água com 0,900 de seu volume submerso. Que massa de chumbo é necessária se o chumbo for colocado (a) no alto do bloco e (b) na base do bloco?

••47 Quando os paleontólogos encontram um fóssil de dinossauro razoavelmente completo podem determinar a massa e o peso do dinossauro vivo usando um modelo em escala esculpido em plástico e baseado nas dimensões dos ossos do fóssil. A escala do modelo é de 1 para 20, ou seja, ele tem $1/20$ do comprimento real, as áreas são $(1/20)^2$ das áreas reais e os volumes são $(1/20)^3$ dos volumes reais.

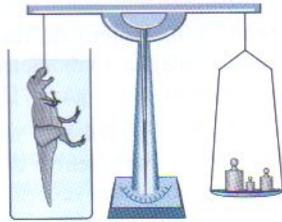


FIG. 14-45 Problema 47.

Primeiro, pendura-se o modelo em um dos braços de uma balança e colocam-se pesos no outro braço até que o equilíbrio seja estabelecido. Em seguida, o modelo é totalmente imerso em água e removem-se pesos do outro braço até que o equilíbrio seja restabelecido (Fig. 14-45). Para um modelo de um certo fóssil de *T. rex*, 637,76 g tiveram que ser removidos para restabelecer o equilíbrio. Qual era o volume (a) do modelo e (b) do *T. rex* original? (c) Se a massa específica do *T. rex* era aproximadamente igual à da água, qual era a sua massa?

•••48 A Fig. 14-46 mostra uma bola de ferro suspensa por uma corda de massa desprezível presa em um cilindro que flutua, parcialmente submerso, com as bases paralelas à superfície da água. O cilindro tem uma altura de 6,00 cm, uma área das bases de $12,0 \text{ cm}^2$, uma massa específica de $0,30 \text{ g/cm}^3$ e 2,00 cm de sua altura estão acima da superfície da água. Qual é o raio da bola de ferro?

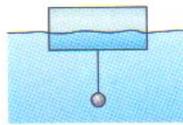


FIG. 14-46 Problema 48.

seção 14-9 A Equação de Continuidade

•49 Uma mangueira de jardim com diâmetro interno de 1,9 cm está ligada a um borrifador (estacionário) que consiste apenas em um recipiente com 24 furos de 0,13 cm de diâmetro. Se a água circula na mangueira com uma velocidade de 0,91 m/s, com que velocidade deixa os furos do borrifador?

•50 Dois riachos se unem para formar um rio. Um dos riachos tem uma largura de 8,2 m, uma profundidade de 3,4 m e a velocidade da água é 2,3 m/s. O outro riacho tem 6,8 m de largura, 3,2 m de profundidade e a velocidade da água é 2,6 m/s. Se o rio tem uma largura de 10,5 m e a velocidade da água é 2,9 m/s, qual é a profundidade do rio?

•51 *Efeito canal.* A Fig. 14-47 mostra uma canal onde se encontra uma barcaça ancorada com $d = 30 \text{ m}$ de largura e $b = 12 \text{ m}$ de calado. O canal tem uma largura $D = 55 \text{ m}$, uma profundidade $H = 14 \text{ m}$ e nele circula água com uma velocidade $v_1 = 1,5 \text{ m/s}$. Suponha que a vazão em torno da barcaça é uniforme. Quando a

água passa pela proa da barcaça sofre uma queda brusca de nível conhecida como efeito canal. Se a queda é de $h = 0,80 \text{ m}$, qual é a velocidade da água ao passar ao lado da barcaça (a) pelo plano vertical indicado pela reta tracejada a e (b) pelo plano vertical indicado pela reta tracejada b ? A erosão causada pelo aumento da velocidade é um problema que preocupa os engenheiros hidráulicos.

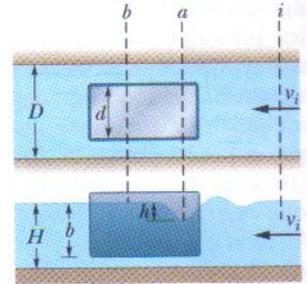


FIG. 14-47 Problema 51.

•52 A Fig. 14-48 mostra dois segmentos de uma antiga tubulação que atravessa uma colina; as distâncias são $d_A = d_B = 30 \text{ m}$ e $D = 110 \text{ m}$. O raio do cano do lado de fora da colina é 2,00 cm; o raio do cano no interior da colina, porém, não é mais conhecido. Para determiná-lo os engenheiros hidráulicos verificaram inicialmente que a velocidade da água nos segmentos à esquerda e à direita da colina era 2,50 m/s. Em seguida, introduziram um corante na água no ponto A e observaram que levava 88,8 s para chegar ao ponto B. Qual é o raio médio do cano no interior da colina?

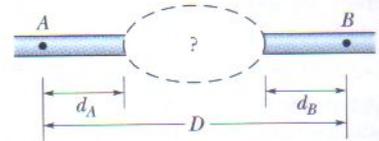


FIG. 14-48 Problema 52.

••53 A água de um porão inundado é bombeada com uma velocidade de 5,0 m/s através de uma mangueira com 1,0 cm de raio. A mangueira passa por uma janela 3,0 m acima do nível da água. Qual é a potência da bomba?

••54 A água que sai de um cano de 1,9 cm (diâmetro interno) passa por três canos de 1,3 cm. (a) Se as vazões nos três canos menores são 26, 19 e 11 L/min, qual é a vazão no tubo de 1,9 cm? (b) Qual é a razão entre a velocidade da água no cano de 1,9 cm e a velocidade no cano em que a vazão é 26 L/min?

seção 14-10 A Equação de Bernoulli

•55 A água se move com uma velocidade de 5,0 m/s em um cano com uma seção reta de $4,0 \text{ cm}^2$. A água desce gradualmente 10 m enquanto a seção reta aumenta para $8,0 \text{ cm}^2$. (a) Qual é a velocidade da água depois da descida? (b) Se a pressão antes da descida é $1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$, qual é a pressão depois da subida?

•56 A entrada da tubulação da Fig. 14-49 tem uma seção reta de $0,74 \text{ m}^2$ e a velocidade da água é 0,40 m/s. Na saída, a uma distância $D = 180 \text{ m}$ abaixo da entrada, a seção reta é menor que a da entrada e a velocidade da água é 9,5 m/s. Qual é a diferença de pressão entre a entrada e a saída?

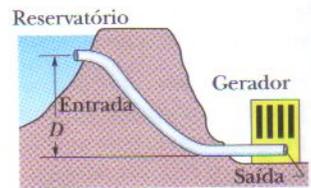


FIG. 14-49 Problema 56.

•57 Um cano com um diâmetro interno de 2,5 cm transporta água para o porão de uma casa a uma velocidade de 0,90 m/s com uma pressão de 170 kPa. Se o cano se estreita para 1,2 cm e sobe para o segundo piso, 7,6 m acima do ponto de entrada, quais são (a) a velocidade e (b) a pressão da água no segundo piso?

•58 Os torpedos são às vezes testados em tubos horizontais por onde escoa água, da mesma forma como os aviões são testados em túneis de vento. Considere um tubo circular com um diâme-

tro interno de 25,0 cm e um torpedo alinhado com o eixo maior do tubo. O torpedo tem 5,00 cm de diâmetro e deve ser testado com a água passando por ele a 2,50 m/s. (a) Com que velocidade a água deve passar na parte do tubo que não está obstruída pelo torpedo? (b) Qual é a diferença de pressão entre a partes obstruída e a parte não obstruída do tubo?

•59 Um tanque cilíndrico de grande diâmetro está cheio de água até uma profundidade $D = 0,30$ m. Um furo de seção reta $A = 6,5$ cm² no fundo do tanque permite a drenagem da água. (a) Qual é a velocidade de escoamento da água, em metros cúbicos por segundo? (b) A que distância abaixo do fundo do tanque a seção reta do jorro é igual a metade da área do furo?

•60 Dois tanques, 1 e 2, ambos com uma grande abertura no alto, contêm líquidos diferentes. Um pequeno furo é feito no lado de cada tanque à mesma distância h abaixo da superfície do líquido, mas o furo do tanque 1 tem metade da seção reta do furo do tanque 2. (a) Qual é a razão ρ_1/ρ_2 entre as massas específicas dos líquidos se a vazão mássica é a mesma para os dois furos? (b) Qual é a razão R_{V1}/R_{V2} entre as vazões dos dois tanques? (c) Em um certo instante, o líquido do tanque 1 está 12,0 cm acima do furo. A que altura acima do furo o líquido do tanque 2 deve estar nesse instante para que os tanques tenham que ter vazões iguais?

•61 Qual o trabalho realizado pela pressão para fazer passar 1,4 m³ de água por um cano com um diâmetro interno de 13 mm se a diferença de pressão entre as extremidades do cano é 1,0 atm?

•62 Na Fig. 14-50, água doce atravessa um cano horizontal e sai para a atmosfera com uma velocidade $v_1 = 15$ m/s. Os diâmetros dos segmentos esquerdo e direito do cano são 5,0 cm e 3,0 cm. (a) Que volume de água escoou para a atmosfera em um período de 10 min? Quais são (b) a velocidade v_2 e (c) a pressão manométrica no segmento esquerdo do tubo?

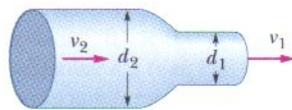


FIG. 14-50 Problema 62.

•63 Na Fig. 14-51, a água doce atrás de uma represa tem uma profundidade $D = 15$ m. Um cano horizontal de 4,0 cm de diâmetro atravessa a represa a uma profundidade $d = 6,0$ m. Uma tampa fecha a abertura do cano. (a) Determine o módulo da força de atrito entre a tampa e a parede do tubo. (b) A tampa é retirada. Qual é o volume de água que sai do cano em 3,0 h?

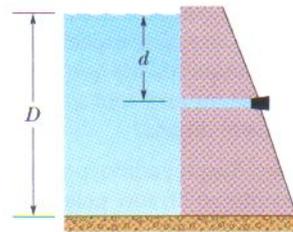


FIG. 14-51 Problema 63.

•64 Água doce escoou horizontalmente do segmento 1 de uma tubulação, com uma seção reta A_1 , para o segmento 2, com uma seção reta A_2 . A Fig. 14-52 mostra um gráfico da diferença de pressão $p_2 - p_1$ em função do inverso do quadrado A_1^{-2} da área que seria esperada para uma vazão de certo valor se o escoamento fosse laminar em todas as circunstâncias. A escala do eixo vertical é definida por $\Delta p_s = 300$ kN/m². Nas condições da figura, quais são os valores (a) de A_2 e (b) da vazão?

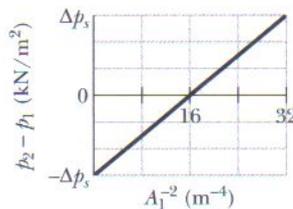


FIG. 14-52 Problema 64.

•65 A Fig. 14-53 mostra um jorro d'água saindo por um furo a uma distância $h = 10$ cm da superfície de tanque que contém

$H = 40$ cm de água. (a) A que distância x a água atinge o solo? (b) A que profundidade deve ser feito um segundo furo para que o valor de x seja o mesmo? (c) A que profundidade deve ser feito um furo para maximizar o valor de x ?

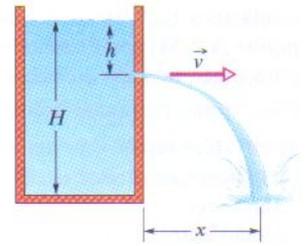


FIG. 14-53 Problema 65.

•66 Na Fig. 14-54 a água escoou em regime laminar no segmento esquerdo de uma tubulação (raio $r_1 = 2,00R$), atravessa o segmento seção central (raio R) e atravessa o segmento direito (raio $r_3 = 3,00R$). A velocidade da água no segmento central é 0,500 m/s. Qual é o trabalho total realizado sobre 0,400 m³ de água quando ela passa do segmento esquerdo para o segmento direito?

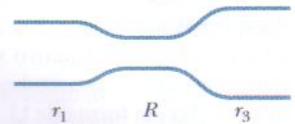


FIG. 14-54 Problema 66.

•67 Um medidor venturi é usado para medir a velocidade de um fluido em um cano. O medidor é ligado entre dois segmentos do cano (Fig. 14-55); a seção reta A na entrada e na saída do medidor é igual à seção reta do cano. Entre a entrada e a saída do medidor o fluido escoou com velocidade V e depois passa com velocidade v por uma "garganta" estreita de seção reta a . Um manômetro liga a parte mais larga do medidor à parte mais estreita. A variação da velocidade do fluido é acompanhada por uma variação Δp da pressão do fluido, que produz uma diferença h na altura do líquido nos dois lados do manômetro. (A diferença Δp corresponde à pressão na garganta menos a pressão no cano.) (a) Aplicando a equação de Bernoulli e a equação de continuidade aos pontos 1 e 2 na Fig. 14-55, mostre que

$$V = \sqrt{\frac{2a^2 \Delta p}{\rho(a^2 - A^2)}}$$

onde ρ é a massa específica do fluido. (b) Suponha que o fluido é água doce, que a seção reta é 64 cm² no cano e 32 cm² na garganta e que a pressão é 55 kPa no cano e 41 kPa na garganta. Qual é a vazão de água em metros cúbicos por segundo?

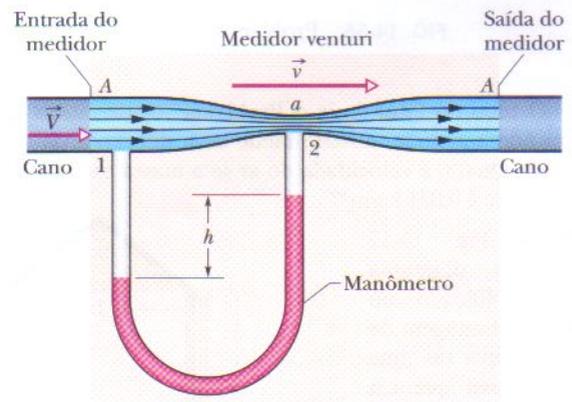


FIG. 14-55 Problemas 67 e 68.

•68 Considere o medidor venturi do Problema 67 e da Fig. 14-51 sem o manômetro. Suponha que $A = 5a$ e que a pressão p_1 no ponto A é 2,0 atm. Calcule o valor (a) da velocidade V no ponto A e (b) da velocidade v no ponto a para que a pressão p_2 no ponto

a seja zero. (c) Calcule a vazão correspondente se o diâmetro no ponto A é 5,0 cm. O fenômeno que ocorre em a quando p_2 cai para perto de zero é conhecido como cavitação; a água evapora para formar pequenas bolhas.

••69 Um líquido de massa específica 900 kg/m³ escoam em um tubo horizontal com seção reta de $1,90 \times 10^{-2}$ m² na região A e uma seção reta de $9,50 \times 10^{-2}$ m² na região B . A diferença de pressão entre as duas regiões é $7,20 \times 10^3$ Pa. Quais são (a) a vazão e (b) a vazão mássica?

••70 O tubo de Pitot (Fig. 14-56) é usado para medir a velocidade do ar nos aviões. Ele é formado por um tubo externo com pequenos furos B (quatro são mostrados na figura) que permitem a entrada de ar no tubo; este tubo está ligado a um dos lados de um tubo em forma de U. O outro lado do tubo em forma de U está ligado ao furo A na frente do medidor, que aponta no sentido do movimento do avião. Em A o ar fica estagnado, de modo que $v_A = 0$. Em B , porém, a velocidade do ar é presumivelmente igual à velocidade v do ar em relação ao avião. (a) Use a equação de Bernoulli para mostrar que

$$v = \sqrt{\frac{2\rho g h}{\rho_{\text{ar}}}}$$

onde ρ é a massa específica do líquido contido no tubo em U e h é a diferença entre os níveis do líquido no tubo. (b) Suponha que o tubo contém álcool e que a diferença de nível h é 26,0 cm. Qual é a velocidade do avião em relação ao ar? A massa específica do ar é 1,03 kg/m³ e a do álcool é 810 kg/m³.

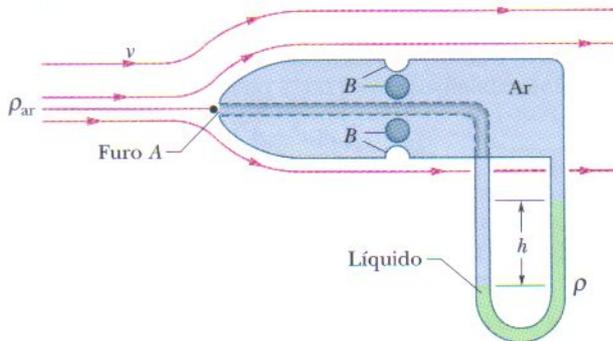


FIG. 14-56 Problemas 70 e 71.

••71 O tubo de Pitot (veja o Problema 70) de um avião que está voando a grande altitude mede uma diferença de pressão de 180 Pa. Qual é a velocidade do ar se a massa específica do ar nessa altitude é 0,031 kg/m³?

••72 A Fig. 14-57 mostra um diagrama muito simplificado do sistema de drenagem de água da chuva de uma casa. A chuva que cai no telhado inclinado escorre para as calhas da borda do telhado e desce por canos verticais (apenas um é mostrado na figura) para um cano principal M abaixo do

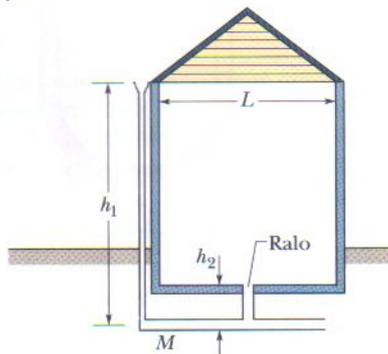


FIG. 14-57 Problema 72.

porão, que leva a água para um cano ainda maior, situado no subsolo. Na Fig. 14-57 um ralo no porão também está ligado ao cano M . Suponha que as seguintes condições são verdadeiras:

1. os canos verticais têm uma altura $h_1 = 11$ m,
2. o ralo do porão fica a uma altura $h_2 = 1,2$ do cano M ,
3. o cano M tem um raio de 3,0 cm,
4. a casa tem $L = 60$ m de fachada e $P = 30$ m de profundidade,
5. toda a água que cai no telhado passa pelo cano M ,
6. a velocidade inicial da água nos canos verticais é desprezível,
7. a velocidade do vento é desprezível (a chuva cai verticalmente).

Para que índice de precipitação, em centímetros por hora, a água do cano M chega à altura do ralo, ameaçando inundar o porão?

Problemas Adicionais

73 Uma bola de vidro com 2,00 cm de raio repousa no fundo de um copo de leite. A massa específica do leite é 1,03 g/cm³, e o módulo da força normal que o fundo do corpo exerce sobre a bola é $9,48 \times 10^{-2}$ N. Qual é a massa da bola?

74 Quando tossimos, o ar é expelido em alta velocidade pela traquéia e brônquios superiores e remove o excesso de muco que está prejudicando a respiração. Esta alta velocidade é produzida da seguinte forma: depois que inspiramos uma grande quantidade de ar, a glote (abertura estreita da laringe) se fecha, os pulmões se contraem, aumentando a pressão do ar, a traquéia e os brônquios superiores se estreitam e a glote se abre bruscamente, deixando escapar o ar. Suponha que, durante a expulsão, a vazão seja $7,0 \times 10^{-3}$ m/s. Que múltiplo da velocidade do som ($v_s = 343$ m/s) é a velocidade do ar na traquéia se o diâmetro da traquéia (a) permanece com o valor normal de 14 mm e (b) diminui para 5,2 mm?

75 A Fig. 14-32 mostra um tubo em U modificado: o lado direito é mais curto do que o esquerdo. A extremidade do lado direito está $d = 10,0$ cm acima da bancada do laboratório. O raio do tubo é 1,50 cm. Despeja-se água (lentamente) no lado esquerdo até que comece a transbordar do lado direito. Em seguida, um líquido de massa específica 0,80 g/cm³ é despejado lentamente no lado esquerdo até que sua altura nesse lado seja 8,0 cm (o líquido não se mistura com a água). Que quantidade de água transborda do lado direito?

76 Surpreendido por uma avalanche, um esquiador é totalmente soterrado pela neve, cuja massa específica é 96 kg/m³. Suponha que a massa específica média do esquiador, com seus trajes e equipamentos, seja de 1020 kg/m³. Que fração da força gravitacional que age sobre o esquiador é compensada pelo empuxo da neve?

77 A Fig. 14-58 mostra um sifão, que é um tubo usado para transferir líquidos de um recipiente para outro. O tubo ABC deve estar inicialmente cheio, mas se esta condição é satisfeita o líquido escoam pelo tubo até que a superfície do líquido no recipiente esteja no mesmo nível que a extremidade A do tubo. O líquido tem uma massa específica de 1000 kg/m³ e viscosidade desprezível. As distâncias mostradas na figura são $h_1 = 25$ cm, $d = 12$ cm e $h_2 = 40$ cm.

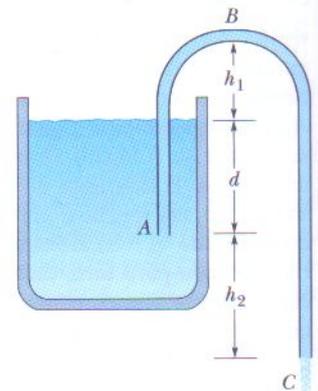


FIG. 14-58 Problema 77.

(a) Com que velocidade o líquido sai do tubo no ponto C ? (b) Se a pressão atmosférica é $1,0 \times 10^5$ Pa, qual é a pressão do líquido em B , o ponto mais alto do tubo? (c) Teoricamente, até que altura máxima h_1 esse sifão pode fazer a água subir?

78 Suponha que seu corpo tenha uma massa específica uniforme 0,95 vez a da água. (a) Se você flutua em uma piscina, que fração do volume de seu corpo está acima da superfície da água?

Areia movediça é o fluido produzido quando a água se mistura com a areia, separando os grãos e eliminando o atrito que os impede de se mover uns em relação aos outros. Poços de areia movediça podem se formar quando a água das montanhas escorre para os vales e se infiltra em bolsões de areia. (b) Se você está flutuando em um poço profundo de areia movediça com uma massa específica 1,6 vez a da água, que fração do seu corpo fica acima da superfície da areia movediça? (c) Em particular, você ainda é capaz de respirar?

79 Se uma bolha de água mineral com gás sobe com uma aceleração de $0,225 \text{ m/s}^2$ e tem um raio de $0,500 \text{ mm}$, qual é a sua massa? Suponha que a força de arrasto que o líquido exerce sobre a bolha seja desprezível.

80 Qual é a aceleração de um balão de ar quente se a razão entre a massa específica do ar fora do balão e a massa específica do ar dentro do balão é 1,39? Despreze a massa do balão e da cesta.

81 Uma lata tem um volume total de 1200 cm^3 e uma massa de 130 g . Quantos gramas de bolinhas de chumbo com uma massa específica de $11,4 \text{ g/cm}^3$ ela pode carregar sem afundar na água?

82 Um tubo em U aberto nas duas extremidades contém mercúrio. Quando $11,2 \text{ cm}$ de água são despejados no lado direito do tubo, de quanto o mercúrio sobe no lado esquerdo em relação ao nível inicial?

83 Um objeto está pendurado em uma balança de mola. A balança indica 30 N no ar, 20 N quando o objeto está imerso em água e 24 N quando o objeto está imerso em outro líquido de massa específica desconhecida. Qual é a massa específica deste outro líquido?

84 Em um experimento, um bloco retangular de altura h é colocado para flutuar em quatro líquidos separados. No primeiro líquido, que é a água, ele flutua totalmente submerso. Nos líquidos A , B e C ele flutua com alturas $h/2$, $2h/3$ e $h/4$ acima da superfície do líquido, respectivamente. Qual é a densidade (massa específica em relação à da água) do líquido (a) A , (b) B e (c) C ?

85 Cerca de um terço do corpo de uma pessoa que flutua no Mar Morto está acima da linha da água. Supondo que a massa específica do corpo humano é $0,98 \text{ g/cm}^3$, determine a massa específica da água do Mar Morto. (Por que ela é tão maior do que $1,0 \text{ g/cm}^3$?)