



Andoni Canela/Age Fotostock America, Inc.

*Os ecos podem ser encantadores em ambientes bucólicos e desagradáveis nos auditórios, mas costumam ser fiéis à fonte sonora. O eco de um bater de palmas, por exemplo, é quase sempre o som de um bater de palmas. Perto da escadaria da foto, porém, que pertence a uma pirâmide situada nas ruínas maias de Chichen Itza, no México, o eco de um bater de palmas é uma nota musical cuja freqüência diminui com o tempo.*

**O que produz um eco musical nas escadas de uma pirâmide dos maias?**

A resposta está neste capítulo.



**FIG. 17-1** Esta tartaruga-cabeçuda está sendo examinada com ultra-som (que possui uma frequência acima de nossa faixa de audição); uma imagem do interior do animal está sendo mostrada em um monitor à direita da foto. (Mauro Fermariello/SPL/Photo Researchers)

## 17-1 O QUE É FÍSICA?

A física das ondas sonoras está presente nos artigos científicos de muitas especialidades. Vamos dar apenas alguns exemplos. Os fisiologistas querem saber como a fala é produzida, como corrigir os defeitos de dicção, como reduzir a perda da audição e até mesmo por que uma pessoa ronca. Os engenheiros acústicos procuram melhorar a acústica das cadeiras e salas de concertos, reduzir o nível de ruído perto de rodovias e obras públicas e reproduzir sons em sistemas de alto-falantes com o máximo de fidelidade. Os engenheiros aeronáuticos estudam as ondas de choque produzidas pelos caças supersônicos e o ruído dos jatos comerciais nas proximidades dos aeroportos. Os engenheiros biomédicos procuram descobrir o que os ruídos produzidos pelo coração e pelos pulmões significam em termos da saúde do paciente. Os paleontólogos tentam associar os ossos dos dinossauros ao modo como emitiam sons. Os engenheiros militares tentam descobrir se é possível localizar um atirador de tocaia pelo som dos seus disparos e, do lado mais ameno, os biólogos estudam o ronronar dos gatos.

Para começar nossa discussão da física do som, devemos responder à pergunta: “O que são as ondas sonoras?”

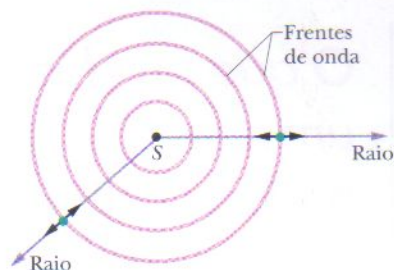
## 17-2 Ondas Sonoras

Como vimos no Capítulo 16, as ondas mecânicas são ondas que necessitam de um meio material para se propagar. Existem dois tipos de ondas mecânicas: as *ondas transversais*, nas quais as oscilações são perpendiculares à direção de propagação, e as *ondas longitudinais*, em que as oscilações acontecem na direção de propagação da onda.

Neste livro, uma **onda sonora** é definida genericamente como qualquer onda longitudinal. As equipes de prospecção usam essas ondas para sondar a crosta terrestre em busca de petróleo. Os navios possuem equipamentos de localização através do som (sonar) para detectar obstáculos submersos. Os submarinos usam ondas sonoras para emboscar outros submarinos ouvindo os ruídos produzidos pelo sistema de propulsão. A Fig. 17-1 mostra como ondas sonoras podem ser usadas para visualizar os tecidos moles dos seres vivos. Neste capítulo, vamos nos concentrar nas ondas sonoras que se propagam no ar e podem ser ouvidas pelas pessoas.

A Fig. 17-2 ilustra várias idéias que serão usadas em nossas discussões. O ponto *S* representa uma pequena fonte sonora, chamada *fonte pontual*, que emite ondas sonoras em todas as direções. As *frentes de onda* e os *raios* indicam a direção de propagação e o espalhamento das ondas sonoras. **Frentes de onda** são superfícies nas quais as oscilações produzidas pelas ondas sonoras têm o mesmo valor; essas superfícies são representadas por circunferências completas ou parciais em um desenho bidimensional de uma fonte pontual. **Raios** são retas perpendiculares às frentes de onda que indicam a direção de propagação das frentes de onda. As setas duplas sobrepostas aos raios da Fig. 17-2 indicam que as oscilações longitudinais do ar são paralelas aos raios.

Nas proximidades de uma fonte pontual como a da Fig. 17-2 as frentes de onda são esféricas e se espalham nas três dimensões; ondas desse tipo são chamadas de *ondas esféricas*. À medida que as frentes de onda se expandem e seu raio aumenta sua curvatura diminui. Muito longe da fonte as frentes de onda são aproximadamente planas (ou retas, em desenhos bidimensionais); ondas desse tipo são chamadas de *ondas planas*.



**FIG. 17-2** Uma onda sonora se propaga a partir de uma fonte pontual *S* em um meio tridimensional. As frentes de onda formam esferas com centro em *S*; os raios são perpendiculares às frentes de onda. As setas de duas cabeças mostram que os elementos do meio oscilam paralelamente aos raios.

## 17-3 A Velocidade do Som

A velocidade de qualquer onda mecânica, transversal ou longitudinal, depende tanto das propriedades inerciais do meio (para armazenar energia cinética) como das propriedades elásticas (para armazenar energia potencial). Assim, podemos ge-

neralizar a Eq. 16-26, que fornece a velocidade de uma onda transversal em uma corda, escrevendo

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \sqrt{\frac{\text{propriedade elástica}}{\text{propriedade inercial}}}, \quad (17-1)$$

onde (para ondas transversais)  $\tau$  é a tensão da corda e  $\mu$  é a massa específica linear da corda. Se o meio de propagação é o ar e a onda é longitudinal, podemos supor que a propriedade inercial, correspondente a  $\mu$ , é a massa específica  $\rho$  do ar. O que corresponde à propriedade elástica?

Em uma corda esticada, a energia potencial está associada à deformação periódica dos elementos da corda quando a onda passa por eles. Quando uma onda sonora se propaga no ar a energia potencial está associada à compressão e à expansão de pequenos elementos de volume do ar. A propriedade que determina o quanto um elemento de um meio muda de volume quando é submetido a uma pressão (força por unidade de área) é o **módulo de elasticidade volumétrico**  $B$ , definido (pela Eq. 12-25) como

$$B = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V} \quad (\text{definição de módulo de elasticidade volumétrico}). \quad (17-2)$$

Aqui  $\Delta V/V$  é a variação relativa de volume produzida por uma variação de pressão  $\Delta p$ . Como vimos na Seção 14-3, a unidade de pressão no SI é o newton por metro quadrado, que recebe um nome especial, o *pascal* (Pa). De acordo com a Eq. 17-2, a unidade de  $B$  também é o pascal. Os sinais de  $\Delta p$  e  $\Delta V$  são sempre opostos: Quando aumentamos a pressão sobre um elemento (ou seja,  $\Delta p$  é positivo), o volume diminui ( $\Delta V$  é negativo). Incluímos um sinal negativo na Eq. 17-2 para que  $B$  seja um número positivo. Substituindo  $\tau$  por  $B$  e  $\mu$  por  $\rho$  na Eq. 17-1, obtemos

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (\text{velocidade do som}) \quad (17-3)$$

como a velocidade do som em um meio de módulo de elasticidade volumétrico  $B$  e massa específica  $\rho$ . A Tabela 17-1 mostra a velocidade do som em vários meios.

A massa específica da água é quase 1000 vezes maior que a do ar. Se esse fosse o único fator importante, esperaríamos, de acordo com a Eq. 17-3, que a velocidade do som na água fosse muito menor que a velocidade do som no ar. Entretanto, a Tabela 17-1 mostra o contrário. Concluímos (novamente a partir da Eq. 17-3) que o módulo de elasticidade volumétrico da água é mais de 1000 vezes maior que o do ar. Este é, realmente, o caso. A água é muito mais incompressível do que o ar, o que (veja a Eq. 17-2) é outra forma de dizer que seu módulo de elasticidade volumétrico é muito maior.

### Demonstração Formal da Eq. 17-3

Vamos agora demonstrar a Eq. 17-3 aplicando diretamente as leis de Newton. Considere um pulso isolado de compressão do ar que se propaga da direita para a esquerda, com velocidade  $v$ , em um tubo como o da Fig. 16-2. Vamos escolher um referencial que se move com a mesma velocidade que o pulso. A Fig. 17-3a mostra a situação do ponto de vista deste referencial. O pulso permanece estacionário e o ar passa por ele com velocidade  $v$ , movendo-se da esquerda para a direita.

Seja  $p$  a pressão do ar não perturbado e  $p + \Delta p$  a pressão na região do pulso, onde  $\Delta p$  é positivo devido à compressão. Considere um elemento de ar com espessura  $\Delta x$  e seção reta  $A$ , movendo-se em direção ao pulso com velocidade  $v$ . Quando esse elemento de ar penetra no pulso a borda dianteira encontra uma região de maior pressão, que reduz a velocidade do elemento para  $v + \Delta v$ , onde  $\Delta v$  é um número negativo. Essa redução de velocidade termina quando a borda traseira do elemento penetra no pulso, o que exige um intervalo de tempo dado por

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v}. \quad (17-4)$$

TABELA 17-1

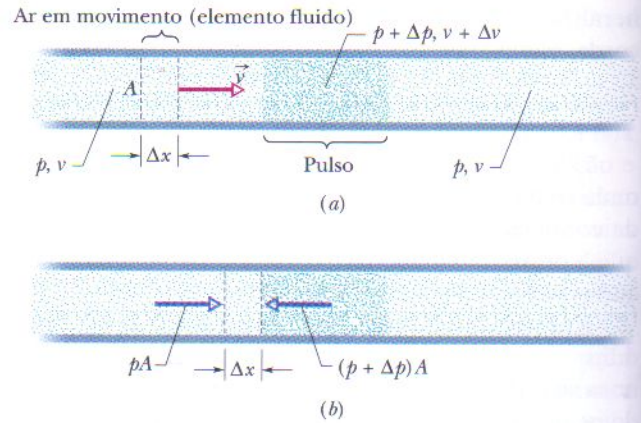
#### A Velocidade do Som<sup>a</sup>

Meio	Velocidade (m/s)
<i>Gases</i>	
Ar (0°C)	331
Ar (20°C)	343
Hélio	965
Hidrogênio	1284
<i>Líquidos</i>	
Água (0°C)	1402
Água (20°C)	1482
Água salgada <sup>b</sup>	1522
<i>Sólidos</i>	
Aço	5941
Alumínio	6420
Granito	6000

<sup>a</sup>A 0°C e 1 atm de pressão, a menos que haja uma indicação em contrário.

<sup>b</sup>A 20°C e com 3,5% de salinidade.

**FIG. 17-3** Um pulso de compressão se propaga da direita para a esquerda em um tubo longo cheio de ar. O referencial da figura foi escolhido de tal forma que o pulso permanece em repouso e o ar se move da esquerda para a direita. (a) Um elemento de ar de largura  $\Delta x$  se move em direção ao pulso com velocidade  $v$ . (b) A borda dianteira do elemento penetra no pulso. São mostradas as forças (associadas à pressão do ar) que agem sobre as bordas dianteira e traseira.



Vamos aplicar a segunda lei de Newton ao elemento. Durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ , a força média exercida sobre a borda traseira do elemento é  $pA$ , dirigida para a direita, e a força média exercida sobre a face dianteira é  $(p + \Delta p)A$ , dirigida para a esquerda (Fig. 17-3b). Assim, a força resultante média exercida sobre o elemento durante o intervalo  $\Delta t$  é

$$\begin{aligned} F &= pA - (p + \Delta p)A \\ &= -\Delta p A \quad (\text{força resultante}). \end{aligned} \quad (17-5)$$

O sinal negativo indica que a força resultante que age sobre o elemento de ar aponta para a esquerda na Fig. 17-3b. O volume do elemento é  $A\Delta x$ ; e assim, com a ajuda da Eq. 17-4, podemos escrever a massa como

$$\Delta m = \rho \Delta V = \rho A \Delta x = \rho A v \Delta t \quad (\text{massa}). \quad (17-6)$$

A aceleração média do elemento durante o intervalo  $\Delta t$  é

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (\text{aceleração}). \quad (17-7)$$

Assim, de acordo com a segunda lei de Newton ( $F = ma$ ) e as Eqs. 17-5, 17-6 e 17-7, temos:

$$-\Delta p A = (\rho A v \Delta t) \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

que pode ser escrita na forma

$$\rho v^2 = -\frac{\Delta p}{\Delta v/v}. \quad (17-8)$$

O ar que ocupa um volume  $V (= Av\Delta t)$  fora do pulso sofre uma redução de volume  $\Delta V (= A\Delta v\Delta t)$  ao penetrar no pulso. Assim,

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{A \Delta v \Delta t}{Av \Delta t} = \frac{\Delta v}{v}. \quad (17-9)$$

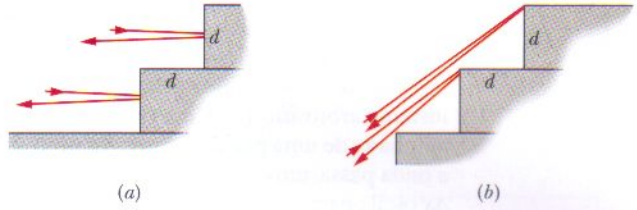
Substituindo a Eq. 17-9 e a Eq. 17-2 na Eq. 17-8, temos:

$$\rho v^2 = -\frac{\Delta p}{\Delta v/v} = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V} = B.$$

Explicitando  $v$ , obtemos a Eq. 17-3 para a velocidade do ar para a direita na Fig. 17-3 e, portanto, a velocidade do pulso para a esquerda.

**Exemplo 17-1**

Quando um pulso sonoro, como o som de um bater de palmas, é produzido perto da escadaria da pirâmide dos maias que aparece na fotografia de abertura deste capítulo as ondas sonoras são refletidas pelos degraus, primeiro pelos mais próximos (mais baixos) (Fig. 17-4a) e depois pelos mais afastados (mais altos) (Fig. 17-4b). Os degraus têm  $d = 0,263$  m de largura e altura e a velocidade do som é 343 m/s. A trajetória das ondas sonoras até os degraus mais baixos pode ser tomada como sendo aproximadamente horizontal. A trajetória até os degraus mais altos faz um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  com a horizontal. Com que frequência  $f_{\text{base}}$  os ecos produzidos pela reflexão dos pulsos nos degraus próximos da base da pirâmide chegam ao ouvinte? Com que frequência  $f_{\text{alto}}$  os ecos produzidos pela reflexão dos pulsos nos degraus próximos do alto da pirâmide chegam ao ouvinte, um pouco mais tarde?



**FIG. 17-4** As ondas sonoras são refletidas (a) nos degraus mais baixos e (b) nos degraus mais altos.

**IDÉIAS-CHAVE**

(1) A frequência  $f$  com a qual os pulsos voltam ao ouvinte é o inverso do intervalo de tempo  $\Delta t$  entre pulsos sucessivos. (2) O intervalo de tempo  $\Delta t$  necessário para que o som percorra uma certa distância  $L$  está relacionado à velocidade do som através da equação  $v = L/\Delta t$ .

**Cálculos:** Perto da base da pirâmide (Fig. 17-4a) a onda sonora refletida por um degrau percorre uma distância  $L = 2d$  maior que a onda sonora refletida pelo degrau imediatamente abaixo. (A onda sonora precisa atravessar duas vezes a largura de um degrau.) Assim, as chegadas dos ecos dos pulsos ao ouvinte estão separadas por um intervalo de tempo

$$\begin{aligned}\Delta t_{\text{base}} &= \frac{L}{v} = \frac{2d}{v} \\ &= \frac{2(0,263 \text{ m})}{343 \text{ m/s}} = 1,533 \times 10^{-3} \text{ s.}\end{aligned}\quad (17-10)$$

A frequência  $f_{\text{base}}$  com a qual os pulsos chegam ao ouvinte é

$$\begin{aligned}f_{\text{base}} &= \frac{1}{\Delta t_{\text{base}}} \\ &= \frac{1}{1,533 \times 10^{-3} \text{ s}} = 652 \text{ Hz.}\end{aligned}\quad (\text{Resposta}) \quad (17-11)$$

O intervalo de tempo  $\Delta t_{\text{base}}$  é curto demais para que o ouvinte perceba os pulsos separadamente. Em vez disso, o cérebro interpreta o som como uma onda senoidal de frequência  $f_{\text{base}}$  e o ouvinte tem a impressão de que está ouvindo uma nota musical de frequência 652 Hz.

Perto do alto da pirâmide (Fig. 17-4b) o percurso inclinado das ondas sonoras faz com que a onda sonora refletida por um degrau percorra uma distância  $L = 2\sqrt{2}d$  maior que a onda sonora refletida pelo degrau imediatamente abaixo. (A onda sonora precisa atravessar duas vezes a hipotenusa de um triângulo retângulo cujos catetos são iguais à largura de um degrau.) Assim, nesse caso o intervalo de tempo entre a chegada dos pulsos é dado por

$$\begin{aligned}\Delta t_{\text{alto}} &= \frac{L}{v} = \frac{2\sqrt{2}d}{v} \\ &= \frac{2\sqrt{2}(0,263 \text{ m})}{343 \text{ m/s}} = 2,168 \times 10^{-3} \text{ s.}\end{aligned}\quad (17-12)$$

e a frequência percebida pelo ouvinte é

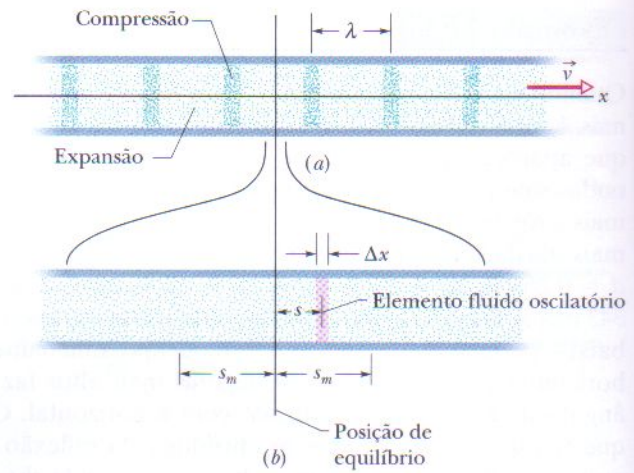
$$\begin{aligned}f_{\text{alto}} &= \frac{1}{\Delta t_{\text{alto}}} \\ &= \frac{1}{2,168 \times 10^{-3} \text{ s}} = 461 \text{ Hz.}\end{aligned}\quad (\text{Resposta})$$

Assim, um bater de palmas perto da escadaria produz um eco que começa com uma frequência de 652 Hz e termina com uma frequência de 461 Hz. Este tipo de eco musical está presente em muitas escadas e também em cercas de jardim.

**17-4 | Ondas Sonoras Progressivas**

Vamos agora examinar os deslocamentos e variações de pressão associados a uma onda sonora senoidal que se propaga no ar. A Fig. 17-5a mostra uma onda se propagando para a direita em um tubo longo cheio de ar. Como vimos no Capítulo 16, uma onda desse tipo pode ser produzida movendo-se senoidalmente um êmbolo na extremidade esquerda do tubo (como na Fig. 16-2). O movimento do êmbolo para a direita desloca o elemento de ar mais próximo e comprime esse ar; o movimento do êmbolo para a esquerda permite que o elemento de ar se desloque de volta para a esquerda e que a pressão diminua. Como cada elemento de ar afeta o elemento que

**FIG. 17-5** (a) Uma onda sonora que se propaga com velocidade  $v$  em um tubo longo cheio de ar é composta por uma série de expansões e compressões periódicas do ar que se deslocam ao longo do tubo. A onda é mostrada em um instante arbitrário. (b) Uma vista horizontal ampliada de uma pequena parte do tubo. Quando a onda passa, um elemento de ar de espessura  $\Delta x$  oscila para a esquerda e para a direita em movimento harmônico simples em torno da posição de equilíbrio. No instante mostrado em (b) o elemento se encontra deslocado de uma distância  $s$  para a direita da posição de equilíbrio. O deslocamento máximo, para a direita ou para a esquerda, é  $s_m$ .



(a)  $s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t)$

Amplitude do deslocamento:  $s_m$

Termo oscilatório:  $\cos(kx - \omega t)$

(b)  $\Delta p(x, t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t)$

Amplitude da pressão:  $\Delta p_m$

Variação de pressão:  $\sin(kx - \omega t)$

**FIG. 17-6** (a) A função deslocamento e (b) a função variação de pressão de uma onda sonora progressiva são um produto de dois fatores: uma amplitude e um termo oscilatório.

está ao lado, os movimentos do ar para a direita e para a esquerda e as variações de pressão se propagam ao longo do tubo como uma onda sonora.

Considere o elemento de ar de espessura  $\Delta x$  da Fig. 17-5b. Quando a onda atravessa essa parte do tubo o elemento de ar oscila para a esquerda e para a direita em movimento harmônico simples em torno da posição de equilíbrio. Assim, as oscilações dos elementos de ar produzidas pela onda sonora progressiva são semelhantes às oscilações dos elementos de uma corda produzidas por uma onda transversal, exceto pelo fato de que a oscilação dos elementos de ar é *longitudinal*, e não *transversal*. Como os elementos da corda oscilam paralelamente ao eixo  $y$ , escrevemos os deslocamentos na forma  $y(x, t)$ . Por analogia, como os elementos de ar oscilam paralelamente ao eixo  $x$ , poderíamos escrever os deslocamentos na forma  $x(x, t)$ ; entretanto, para evitar confusão da função  $x$  com a variável  $x$  vamos usar a notação  $s(x, t)$ .

Para mostrar que os deslocamentos  $s(x, t)$  são funções senoidais de  $x$  e de  $t$ , é possível usar uma função seno ou uma função co-seno. Neste capítulo vamos usar uma função co-seno, escrevendo

$$s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t). \tag{17-13}$$

A Fig. 17-6a identifica as várias partes desta equação. O fator  $s_m$  é a amplitude do deslocamento, ou seja, o deslocamento máximo do elemento de ar em qualquer sentido a partir da posição de equilíbrio (veja a Fig. 17-5b). O número de onda  $k$ , a frequência angular  $\omega$ , a frequência  $f$ , o comprimento de onda  $\lambda$ , a velocidade  $v$  e o período  $T$  de uma onda sonora (longitudinal) são definidos do mesmo modo e obedecem às mesmas relações que para uma onda transversal, exceto pelo fato de que agora  $\lambda$  é a distância (na direção de propagação) para a qual o padrão de compressões e expansões associado à onda começa a se repetir (veja a Fig. 17-5a). (Estamos supondo que  $s_m$  é muito menor do que  $\lambda$ .)

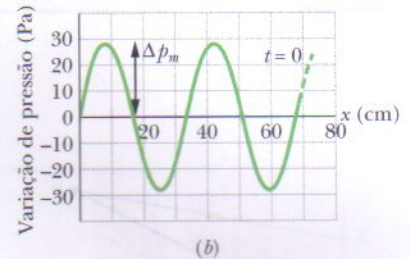
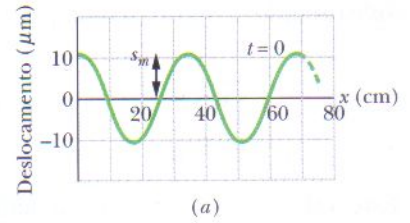
Quando a onda se propaga, a pressão do ar em qualquer posição  $x$  da Fig. 17-5a varia senoidalmente, como será demonstrado a seguir. Para descrever essa variação, escrevemos

$$\Delta p(x, t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t). \tag{17-14}$$

A Fig. 17-6b identifica as várias partes desta equação. Um valor negativo de  $\Delta p$  na Eq. 17-14 corresponde a uma expansão do ar; um valor positivo, a uma compressão. O fator  $\Delta p_m$  é a **amplitude da pressão**, ou seja, o máximo aumento ou diminuição de pressão associado à onda;  $\Delta p_m$  é normalmente muito menor que a pressão  $p$  na ausência da onda. Como vamos demonstrar, a amplitude da pressão  $\Delta p_m$  está relacionada à amplitude do deslocamento  $s_m$  da Eq. 17-13 através da equação

$$\Delta p_m = (v\rho\omega)s_m. \tag{17-15}$$

A Fig. 17-7 mostra os gráficos das Eqs. 17-13 e 17-14 no instante  $t = 0$ ; com o passar do tempo, as duas curvas se movem para a direita ao longo dos eixos horizontais. Note que o deslocamento e a variação de pressão estão defasados de  $\pi/2$  rad ( $90^\circ$ ). Assim, por exemplo, a variação de pressão  $\Delta p$  em qualquer ponto da onda é nula no instante em que o deslocamento é máximo.



**FIG. 17-7** (a) Um gráfico da função deslocamento (Eq. 17-13) para  $t = 0$ . (b) Um gráfico semelhante da função variação de pressão (Eq. 17-14). Os dois gráficos são para uma onda sonora de 1000 Hz cuja amplitude de pressão está no limiar da dor; veja o Exemplo 17-2.

**TESTE 1** Quando o elemento de ar oscilante da Fig. 17-5b está passando pelo ponto de deslocamento nulo (ponto de equilíbrio), a pressão do elemento está começando a aumentar ou começando a diminuir?

### Demonstração das Eqs. 17-14 e 17-15

A Fig. 17-5b mostra um elemento de ar oscilante de seção reta  $A$  e espessura  $\Delta x$ , com o centro deslocado de sua posição de equilíbrio de uma distância  $s$ . De acordo com a Eq. 17-2, podemos escrever, para a variação de pressão do elemento deslocado,

$$\Delta p = -B \frac{\Delta V}{V}. \quad (17-16)$$

A grandeza  $V$  da Eq. 17-16 é o volume do elemento, dado por

$$V = A \Delta x. \quad (17-17)$$

A grandeza  $\Delta V$  da Eq. 17-16 é a variação de volume que ocorre quando o elemento é deslocado. Essa variação de volume acontece porque os deslocamentos das duas extremidades do elemento não são exatamente iguais, diferindo de um valor  $\Delta s$ . Assim, podemos escrever a variação de volume como

$$\Delta V = A \Delta s. \quad (17-18)$$

Substituindo as Eqs. 17-17 e 17-18 na Eq. 17-16 e passando ao limite diferencial, obtemos

$$\Delta p = -B \frac{\Delta s}{\Delta x} = -B \frac{\partial s}{\partial x}. \quad (17-19)$$

O símbolo  $\partial$  mostra que a derivada da Eq. 17-19 é uma *derivada parcial*, que nos diz como  $s$  varia com  $x$  quando o tempo  $t$  é mantido constante. De acordo com a Eq. 17-13, tratando  $t$  como uma constante temos, portanto,

$$\frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [s_m \cos(kx - \omega t)] = -ks_m \sin(kx - \omega t).$$

Substituindo este resultado para a derivada parcial na Eq. 17-19, obtemos

$$\Delta p = Bks_m \sin(kx - \omega t).$$

Fazendo  $\Delta p_m = Bks_m$ , obtemos a Eq. 17-14, que queríamos demonstrar.

Usando a Eq. 17-3, podemos agora escrever

$$\Delta p_m = (Bk)s_m = (v^2 \rho k)s_m.$$

A Eq. 17-15, que também queríamos demonstrar, é obtida usando a Eq. 16-13 para substituir  $k$  por  $\omega/v$ .

### Exemplo 17-2

A amplitude máxima de pressão  $\Delta p_m$  que o ouvido humano pode suportar em sons muito altos é da ordem de 28 Pa (muito menor, portanto, que a pressão normal do ar, aproximadamente  $10^5$  Pa). Qual é a amplitude do deslocamento  $s_m$  correspondente, supondo que a massa específica do ar é  $\rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$ , a frequência do som é 1000 Hz e a velocidade do som é 343 m/s?

#### IDÉIA-CHAVE

A amplitude do deslocamento  $s_m$  de uma onda sonora está relacionada à amplitude da pressão  $\Delta p_m$  da onda através da Eq. 17-15.

**Cálculos:** Explicitando  $s_m$  na Eq. 17-15, obtemos

$$s_m = \frac{\Delta p_m}{v\rho\omega} = \frac{\Delta p_m}{v\rho(2\pi f)}.$$

Substituindo os valores conhecidos, temos:

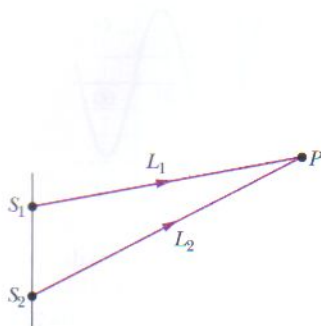
$$s_m = \frac{28Pa}{(343 \text{ m/s})(1,21 \text{ kg/m}^3)(2\pi)(1000 \text{ Hz})}$$

$$= 1,1 \times 10^{-5} \text{ m} = 11 \text{ }\mu\text{m}. \quad (\text{Resposta})$$

Este valor corresponde a um sétimo da espessura desta página. Obviamente, mesmo para o som mais alto que o

ouvido é capaz de tolerar a amplitude do deslocamento é muito pequena.

A amplitude da pressão  $\Delta p_m$  para o som *mais fraco* de 1000 Hz que o ouvido humano pode detectar é  $2,8 \times 10^{-5}$  Pa. Procedendo como antes, obtemos  $s_m = 1,1 \times 10^{-11}$  m ou 11 pm, que corresponde a um décimo do raio de um átomo típico. O ouvido é, realmente, um detector muito sensível de ondas sonoras.



**FIG. 17-8** Duas fontes pontuais,  $S_1$  e  $S_2$ , emitem ondas sonoras esféricas em fase. Os raios mostram que as ondas passam por um ponto comum  $P$ .

## 17-5 | Interferência

Como as ondas transversais, as ondas sonoras podem sofrer interferência. Vamos considerar, em particular, a interferência entre duas ondas sonoras iguais que se propagam no mesmo sentido. A Fig. 17-8 mostra como é possível produzir essa interferência: duas fontes pontuais  $S_1$  e  $S_2$  emitem ondas sonoras que estão em fase e têm o mesmo comprimento de onda  $\lambda$ . Em casos como esse dizemos que as fontes estão em fase, ou seja, as ondas deixam as fontes com o mesmo deslocamento de fase. Estamos interessados nas ondas que passam pelo ponto  $P$  da Fig. 17-8. Supomos que a distância até o ponto  $P$  é muito maior que a distância entre as fontes, de modo que podemos supor que as ondas são aproximadamente paralelas ao chegarem ao ponto  $P$ .

Se as ondas percorressem distâncias iguais para chegar ao ponto  $P$ , estariam em fase nesse ponto. Como no caso das ondas transversais, isso significa que elas sofreriam interferência totalmente construtiva. Entretanto, na Fig. 17-8 o caminho  $L_2$  percorrido pela onda gerada pela fonte  $S_2$  é maior do que o caminho  $L_1$  percorrido pela onda gerada pela fonte  $S_1$ . A diferença de percurso significa que as ondas podem não estar em fase no ponto  $P$ . Em outras palavras, a diferença de fase  $\phi$  no ponto  $P$  depende da **diferença de percurso**  $\Delta L = |L_2 - L_1|$ .

Para relacionar a diferença de fase  $\phi$  à diferença de percurso  $\Delta L$  lembramos (da Seção 16-4) que uma diferença de fase de  $2\pi$  rad corresponde a um comprimento de onda. Assim, podemos escrever a relação

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{\Delta L}{\lambda}, \quad (17-20)$$

que nos dá

$$\phi = \frac{\Delta L}{\lambda} 2\pi. \quad (17-21)$$

A interferência totalmente construtiva acontece se  $\phi$  é zero,  $2\pi$  ou qualquer múltiplo inteiro de  $2\pi$ . Podemos escrever essa condição na forma

$$\phi = m(2\pi), \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{interferência totalmente construtiva}). \quad (17-22)$$

De acordo com a Eq. 17-21, isso acontece quando a razão  $\Delta L/\lambda$  é

$$\frac{\Delta L}{\lambda} = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{interferência totalmente construtiva}). \quad (17-23)$$

Assim, por exemplo, se a diferença de percurso  $\Delta L = |L_2 - L_1|$  da Fig. 17-8 é igual a  $2\lambda$ ,  $\Delta L/\lambda = 2$  e as ondas sofrem interferência totalmente construtiva no ponto  $P$ . A interferência é totalmente construtiva porque a onda proveniente de  $S_2$  está deslocada em fase de  $2\lambda$  em relação à onda proveniente de  $S_1$ , o que coloca as duas ondas *exatamente em fase* no ponto  $P$ .

A interferência totalmente destrutiva acontece se  $\phi$  é um múltiplo ímpar de  $\pi$ , condição que podemos escrever como

$$\phi = (2m + 1)\pi, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{interferência totalmente destrutiva}). \quad (17-24)$$



De acordo com a Eq. 17-21, isso acontece quando a razão  $\Delta L/\lambda$  é

$$\frac{\Delta L}{\lambda} = 0,5; 1,5; 2,5; \dots \quad (\text{interferência totalmente destrutiva}). \quad (17-25)$$

Assim, por exemplo, se a diferença de percurso  $\Delta L = |L_2 - L_1|$  da Fig. 17-8 é igual a  $2,5\lambda$ ,  $\Delta L/\lambda = 2,5$  e as ondas sofrem interferência totalmente destrutiva no ponto  $P$ . A interferência é totalmente destrutiva porque a onda proveniente de  $S_2$  está deslocada em fase de  $2,5\lambda$  em relação à onda proveniente de  $S_1$ , o que coloca as duas ondas *com fases opostas* no ponto  $P$ .

Naturalmente, duas ondas podem produzir uma interferência intermediária. Se  $\Delta L/\lambda = 1,2$ , por exemplo, a interferência nem é totalmente construtiva nem totalmente destrutiva, mas está mais próximo de ser interferência totalmente construtiva ( $\Delta L/\lambda = 1,0$ ) do que interferência totalmente destrutiva ( $\Delta L/\lambda = 1,5$ ).

### Exemplo 17-3 Aumente sua capacidade

Na Fig. 17-9a, duas fontes pontuais  $S_1$  e  $S_2$ , que estão em fase e separadas por uma distância  $D = 1,5\lambda$ , emitem ondas sonoras iguais de comprimento de onda  $\lambda$ .

(a) Qual é a diferença de percurso das ondas de  $S_1$  e  $S_2$  no ponto  $P_1$ , que está sobre a mediatriz do segmento de reta que liga as duas fontes, a uma distância das fontes maior que  $D$ ? Que tipo de interferência ocorre em  $P_1$ ?

**Raciocínio:** Como as duas ondas percorrem distâncias iguais para chegar a  $P_1$ , a diferença de percurso é

$$\Delta L = 0. \quad (\text{Resposta})$$

De acordo com a Eq. 17-23, isso significa que as ondas sofrem interferência totalmente construtiva em  $P_1$ .

(b) Quais são a diferença de percurso e o tipo de interferência no ponto  $P_2$  na Fig. 17-9a?

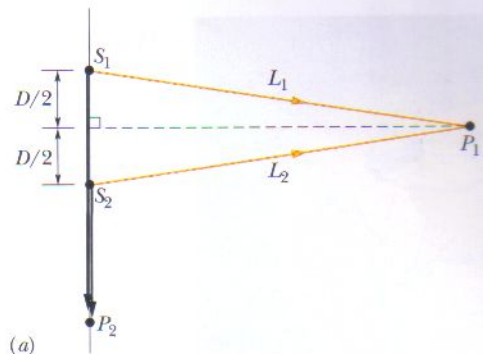
**Raciocínio:** A onda produzida por  $S_1$  percorre uma distância adicional  $D (= 1,5\lambda)$  para chegar a  $P_2$ . Assim, a diferença de percurso é

$$\Delta L = 1,5\lambda. \quad (\text{Resposta})$$

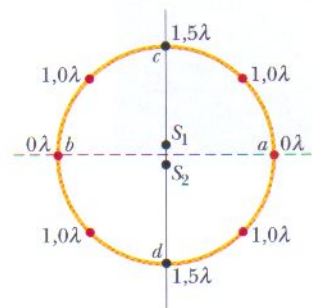
De acordo com a Eq. 17-25, isso significa que as ondas estão com fases opostas em  $P_2$  e interferem de forma totalmente destrutiva nesse ponto.

(c) A Fig. 17-9b mostra uma circunferência de raio muito maior que  $D$  cujo centro está no ponto médio entre  $S_1$  e  $S_2$ . Qual é o número de pontos  $N$  dessa circunferência nos quais a interferência é totalmente construtiva?

**Raciocínio:** Imagine que, partindo do ponto  $a$ , nos deslocamos no sentido horário ao longo da circunferência até o ponto  $d$ . Nesse percurso a diferença de percurso  $\Delta L$  aumenta continuamente. Como foi visto no item (a), a diferença de percurso no ponto  $a$  é  $\Delta L = 1,5\lambda$ . Como foi visto no item (b),  $\Delta L = 1,5\lambda$  no ponto  $d$ . Assim, deve existir um ponto entre  $a$  e  $d$  ao longo da circunferência no qual  $\Delta L = \lambda$ , como mostra a Fig. 17-9b. De acordo com a Eq. 17-23, uma interferência totalmente construtiva ocorre nesse ponto. Além disso, não existe outro ponto ao



(a)



(b)

**FIG. 17-9** (a) Duas fontes pontuais  $S_1$  e  $S_2$ , separadas por uma distância  $D$ , emitem ondas sonoras esféricas em fase. As ondas percorrem distâncias iguais para chegar ao ponto  $P_1$ . O ponto  $P_2$  está sobre a linha reta que passa por  $S_1$  e  $S_2$ . (b) A diferença de percurso (em termos do comprimento de onda) entre as ondas produzidas por  $S_1$  e  $S_2$ , em oito pontos sobre uma grande circunferência que envolve as fontes.

longo do percurso de  $a$  a  $d$  no qual ocorre interferência totalmente construtiva, já que 1 é o único número inteiro entre 0 e 1,5.

Podemos agora usar a simetria para localizar os outros pontos de interferência totalmente construtiva no resto da circunferência. A simetria em relação à reta  $cd$  nos dá o ponto  $b$ , no qual  $\Delta L = 0\lambda$ . Existem mais três pontos para os quais  $\Delta L = \lambda$ . No total, temos

$$N = 6. \quad (\text{Resposta})$$

## 17-6 | Intensidade e Nível Sonoro

Se você já tentou dormir enquanto alguém ouvia música a todo volume, sabe muito bem que existe algo no som além da frequência, comprimento de onda e velocidade. Há também a intensidade. A **intensidade**  $I$  de uma onda sonora em uma superfície é a taxa média por unidade de área com a qual a energia contida na onda atravessa a superfície ou é absorvida pela superfície. Matematicamente, temos:

$$I = \frac{P}{A}, \quad (17-26)$$

onde  $P$  é a taxa de variação com o tempo da transferência de energia (potência) da onda sonora e  $A$  é a área da superfície que intercepta o som. Como vamos mostrar daqui a pouco, a intensidade  $I$  está relacionada à amplitude do deslocamento  $s_m$  da onda sonora através da equação

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 s_m^2. \quad (17-27)$$

### Varição da Intensidade com a Distância

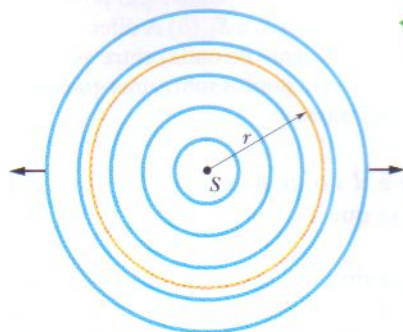
Em geral, a intensidade do som varia com a distância de uma fonte real de uma forma bastante complexa. Algumas fontes reais, como os alto-falantes, podem emitir o som apenas em certas direções, e o ambiente normalmente produz ecos (ondas sonoras refletidas) que se superpõem às ondas sonoras originais. Em algumas situações, porém, podemos ignorar os ecos e supor que a fonte sonora é uma fonte pontual e *isotrópica*, ou seja, que emite o som com a mesma intensidade em todas as direções. As frentes de onda que existem em torno de uma fonte pontual isotrópica  $S$  em um dado instante são mostradas na Fig. 17-10.

Vamos supor que a energia mecânica das ondas sonoras é conservada enquanto elas se espalham a partir de uma fonte pontual isotrópica. Vamos também construir uma esfera imaginária de raio  $r$  com o centro na fonte, como mostra na Fig. 17-10. Toda a energia emitida pela fonte passa pela superfície da esfera. Assim, a taxa com a qual a energia das ondas sonoras atravessa a superfície é igual à taxa com a qual a energia é emitida pela fonte (ou seja, a potência  $P_s$  da fonte). De acordo com a Eq. 17-26, a intensidade  $I$  da onda sonora na superfície da esfera é dada por

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2}, \quad (17-28)$$

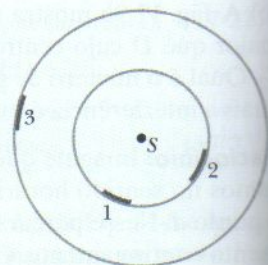
onde  $4\pi r^2$  é a área da esfera. A Eq. 17-28 nos diz que a intensidade do som emitido por uma fonte pontual isotrópica diminui com o quadrado da distância  $r$  da fonte.

O som pode fazer um copo de vidro oscilar. Se o som produzir uma onda estacionária e se a intensidade do som for elevada, o vidro pode quebrar. (Ben Rose/The Image Bank/Getty Images)



**FIG. 17-10** Uma fonte pontual  $S$  emite ondas sonoras com a mesma intensidade em todas as direções. As ondas atravessam uma esfera imaginária de raio  $r$  com centro em  $S$ .

**TESTE 2** A figura mostra três pequenas áreas 1, 2 e 3 na superfície de duas esferas imaginárias, cujo centro está em uma fonte sonora pontual isotrópica  $S$ . As taxas com as quais a energia das ondas sonoras atravessa as três áreas são iguais. Ordene as áreas de acordo (a) com a intensidade do som na área e (b) com a área, em ordem decrescente.



### A Escala de Decibéis

Como vimos no Exemplo 17-2, a amplitude do deslocamento no interior do ouvido humano varia cerca de  $10^{-5}$  m, para o som mais alto tolerável, a cerca de  $10^{-11}$  m, para o som mais fraco detectável — uma razão de  $10^6$ . Como, de acordo com a Eq.

17-27, a intensidade de um som varia com o *quadrado* da amplitude, a razão entre as intensidades nesses dois limites do sistema auditivo humano é  $10^{12}$ . Isso significa que os seres humanos podem ouvir em uma enorme faixa de intensidades.

Para lidar com um intervalo tão grande de valores, recorreremos aos logaritmos. Considere a relação

$$y = \log x,$$

onde  $x$  e  $y$  são variáveis. Uma propriedade desta equação é que se  $x$  é *multiplicado* por 10,  $y$  aumenta de 1 unidade. Para mostrar que isso é verdade, escrevemos

$$y' = \log(10x) = \log 10 + \log x = 1 + y.$$

Da mesma forma, quando multiplicamos  $x$  por  $10^{12}$   $y$  aumenta apenas de 12 unidades.

Assim, em vez de falarmos da intensidade  $I$  de uma onda sonora, é muito mais conveniente falarmos do **nível sonoro**  $\beta$ , definido como

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0}. \quad (17-29)$$

onde dB é a abreviação de **decibel**, a unidade de nível sonoro, um nome escolhido em homenagem a Alexander Graham Bell\*.  $I_0$  na Eq. 17-29 é uma intensidade de referência ( $= 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ), cujo valor foi escolhido porque está próximo do limite inferior da faixa de audição humana. Para  $I = I_0$ , a Eq. 17-29 fornece  $\beta = 10 \log 1 = 0$ , de modo que a intensidade de referência corresponde a zero decibel. O valor de  $\beta$  aumenta em 10 dB toda vez que a intensidade sonora aumenta de uma ordem de grandeza (um fator de 10). Assim,  $\beta = 40$  corresponde a uma intensidade  $10^4$  maior que a intensidade de referência. A Tabela 17-2 mostra os níveis sonoros em alguns ambientes.

### Demonstração da Eq. 17-27

Considere, na Fig. 17-5a, uma fatia fina de ar de espessura  $dx$ , área  $A$  e massa  $dm$ , oscilando para a frente e para trás enquanto a onda sonora da Eq. 17-13 passa por ela. A energia cinética  $dK$  da fatia de ar é

$$dK = \frac{1}{2} dm v_s^2, \quad (17-30)$$

onde  $v_s$  não é a velocidade da onda, mas a velocidade de oscilação do elemento de ar, obtida da Eq. 17-13 como

$$v_s = \frac{\partial s}{\partial t} = -\omega s_m \text{ sen}(kx - \omega t).$$

Usando esta relação e fazendo  $dm = \rho A dx$ , podemos escrever a Eq. 17-30 na forma

$$dK = \frac{1}{2} (\rho A dx) (-\omega s_m)^2 \text{ sen}^2(kx - \omega t). \quad (17-31)$$

Dividindo a Eq. 17-31 por  $dt$ , obtemos a taxa com a qual a energia cinética se desloca com a onda. Como vimos no Capítulo 16 para ondas transversais,  $dx/dt$  é a velocidade  $v$  da onda, de modo que

$$\frac{dK}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v \omega^2 s_m^2 \text{ sen}^2(kx - \omega t). \quad (17-32)$$

A taxa *média* com a qual a energia cinética é transportada é

$$\begin{aligned} \left( \frac{dK}{dt} \right)_{\text{méd}} &= \frac{1}{2} \rho A v \omega^2 s_m^2 [\text{sen}^2(kx - \omega t)]_{\text{méd}} \\ &= \frac{1}{4} \rho A v \omega^2 s_m^2. \end{aligned} \quad (17-33)$$

TABELA 17-2

#### Alguns Níveis Sonoros (dB)

Limiar de audição	0
Farfalar de folhas	10
Conversa	60
Show de rock	110
Limiar da dor	120
Turbina a jato	130

\*Na verdade, a unidade de volume sonoro é o bel (B), e o decibel é um submúltiplo ( $1 \text{ dB} = 0,1 \text{ B}$ ), mas o decibel é muito mais usado na prática que o bel. (N.T.)

Para obter essa equação, usamos o fato de que o valor médio do quadrado de uma função seno (ou co-seno) para uma oscilação completa é  $1/2$ .

Supomos que a energia *potencial* é transportada pela onda com a mesma taxa média. A intensidade  $I$  da onda, que é a taxa média por unidade de área com a qual a energia nas duas formas é transmitida pela onda, é, portanto, de acordo com a Eq. 17-33,

$$I = \frac{2(dK/dt)_{\text{méd}}}{A} = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 s_m^2,$$

que é a Eq. 17-27, a equação que queríamos demonstrar.

### Exemplo 17-4

Uma centelha elétrica tem a forma de um segmento de reta de comprimento  $L = 10 \text{ m}$  e emite um pulso sonoro que se propaga radialmente. (Dizemos que a centelha é uma *fonte linear* de som.) A potência da emissão é  $P_s = 1,6 \times 10^4 \text{ W}$ .

(a) Qual é a intensidade  $I$  do som a uma distância  $r = 12 \text{ m}$  da centelha?

#### IDÉIAS-CHAVE

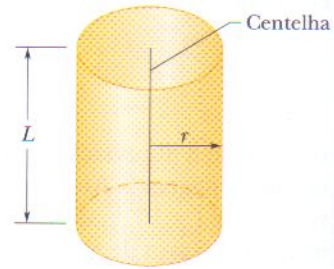
(a) Vamos construir um cilindro imaginário de raio  $r = 12 \text{ m}$  e comprimento  $L = 10 \text{ m}$  (aberto nas duas extremidades) em torno da centelha, como mostra a Fig. 17-11. A intensidade  $I$  na superfície do cilíndrico é dada pela razão  $P/A$ , onde  $P$  é a taxa com a qual a energia sonora atravessa a superfície e  $A$  é a área da superfície. (2) Supomos que o princípio da conservação da energia se aplica à energia sonora. Isso significa que a taxa  $P$  com a qual a energia passa pela superfície do cilindro é igual à taxa  $P_s$  com a qual a energia é emitida pela fonte.

**Cálculos:** Juntando essas idéias e notando que a área da superfície cilíndrica é  $A = 2\pi rL$ , temos

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P_s}{2\pi rL}. \quad (17-34)$$

Isso nos diz que a intensidade do som produzido por uma fonte sonora linear diminui com a distância  $r$  (e não com o quadrado da distância  $r$ , como no caso de fonte pontual). Substituindo os valores conhecidos, obtemos

**FIG. 17-11** Uma centelha na forma de um segmento de reta de comprimento  $L$  emite ondas sonoras radiais. As ondas atravessam um cilindro imaginário  $r$  e comprimento  $L$  cujo eixo coincide com a centelha.



$$I = \frac{1,6 \times 10^4 \text{ W}}{2\pi(12 \text{ m})(10 \text{ m})} = 21,2 \text{ W/m}^2 \approx 21 \text{ W/m}^2. \quad (\text{Resposta})$$

(b) Com que taxa  $P_d$  a energia sonora é interceptada por um detector acústico de área  $A_d = 2,0 \text{ cm}^2$ , apontado para a centelha e situado a uma distância  $r = 12 \text{ m}$  da centelha?

**Cálculos:** Sabemos que a intensidade do som no detector é a razão entre a taxa de transferência de energia  $P_d$  nesse local e a área  $A_d$  do detector:

$$I = \frac{P_d}{A_d}. \quad (17-35)$$

Podemos imaginar que o detector está na superfície cilíndrica do item (a). Nesse caso, a intensidade sonora no detector é igual à intensidade  $I (= 21,2 \text{ W/m}^2)$  na superfície cilíndrica. Explicando  $P_d$  na Eq. 17-35, temos:

$$P_d = (21,2 \text{ W/m}^2)(2,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 4,2 \text{ mW}. \quad (\text{Resposta})$$

### Exemplo 17-5

Muitos músicos veteranos de rock sofrem de perda aguda da audição por causa dos altos níveis sonoros a que são submetidos durante anos tocando música perto de alto-falantes ou ouvindo música em fones de ouvido. Alguns, como Ted Nugent, perderam totalmente a audição em um ouvido. Outros, como Peter Dinklage, do The Who, ouvem sons inexistentes (tinido). Recentemente vários músicos de rock, como Lars Ulrich, da banda Metallica (Fig. 17-12), começaram a usar proteções especiais nos ouvidos durante as apresentações. Se um protetor de ouvido dimi-

nui o nível sonoro em 20 dB, qual é a razão entre a intensidade final  $I_f$  e a intensidade inicial  $I_i$ ?

#### IDÉIA-CHAVE

Tanto para a onda final como a para a inicial o nível sonoro  $\beta$  está relacionado à intensidade através da definição de nível sonoro na Eq. 17-29.

**Cálculos:** Para a onda final, temos:

$$\beta_f = (10 \text{ dB}) \log \frac{I_f}{I_0},$$

e para a onda inicial, temos:

$$\beta_i = (10 \text{ dB}) \log \frac{I_i}{I_0}.$$

A diferença entre os níveis sonoros é

$$\beta_f - \beta_i = (10 \text{ dB}) \left( \log \frac{I_f}{I_0} - \log \frac{I_i}{I_0} \right). \quad (17-36)$$

Usando a identidade

$$\log \frac{a}{b} - \log \frac{c}{d} = \log \frac{ad}{bc},$$

podemos escrever a Eq. 17-36 na forma

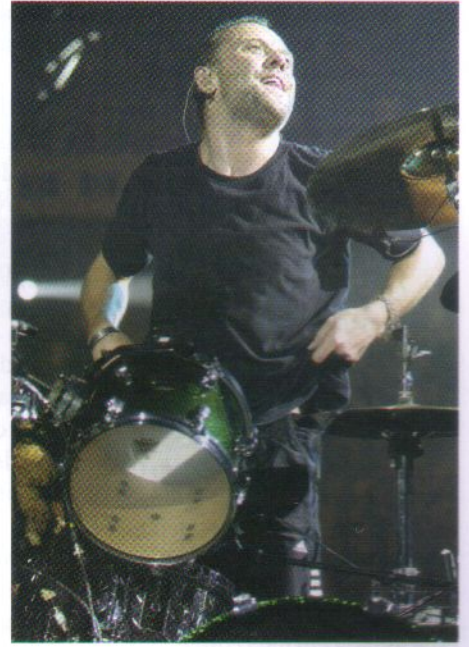
$$\beta_f - \beta_i = (10 \text{ dB}) \log \frac{I_f}{I_i}. \quad (17-37)$$

Reagrupando os termos e substituindo a redução do nível sonoro  $\beta_f - \beta_i$  por  $-20 \text{ dB}$ , obtemos

$$\log \frac{I_f}{I_i} = \frac{\beta_f - \beta_i}{10 \text{ dB}} = \frac{-20 \text{ dB}}{10 \text{ dB}} = -2,0.$$

Em seguida, tomamos o antilogaritmo de ambos os membros desta equação. (Embora o antilogaritmo de  $-2,0$ , que é  $10^{-2,0}$ , possa ser calculado mentalmente, você pode utilizar uma calculadora digitando  $10^{-2,0}$  ou usando a tecla  $10^x$ .) O resultado é o seguinte:

**FIG. 17-12** Lars Ulrich, da banda Metallica, é um dos que apóiam a organização HEAR (Hearing Education and Awareness for Rockers), que alerta para os danos que altos níveis sonoros podem causar à audição. (Tim Mosenfelder/Getty Images News and Sport Services)



$$\frac{I_f}{I_i} = \log^{-1}(-2,0) = 0,010. \quad (\text{Resposta})$$

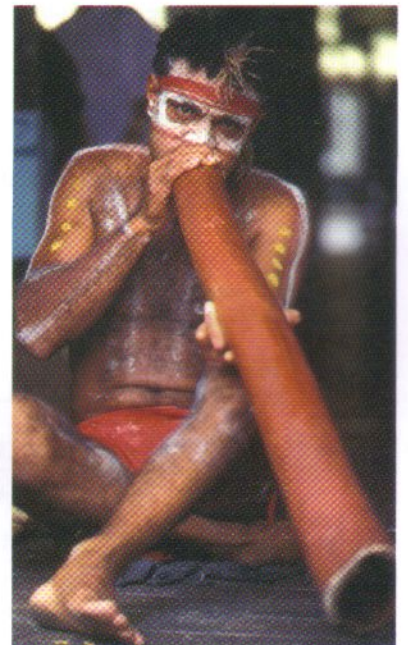
Assim, o protetor de ouvido reduz a intensidade das ondas sonoras para 0,010 da intensidade inicial, o que corresponde a uma redução de duas ordens de grandeza.

## 17-7 | Fontes de Sons Musicais

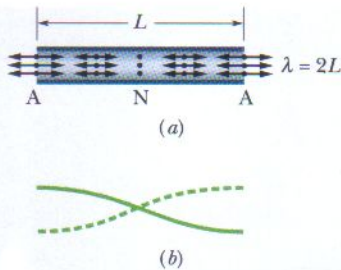
Os sons musicais podem ser produzidos pelas oscilações de cordas (violão, piano, violino), membranas (tímpano, tambor), colunas de ar (flauta, oboé, tubos de órgão e o *digeridu* da Fig. 17-13), blocos de madeira ou barras de aço (marimba, xilofone) e muitos outros corpos. Na maioria dos instrumentos as oscilações envolvem mais de uma peça.

Como vimos no Capítulo 16, é possível produzir ondas estacionárias em uma corda mantida fixa nas duas extremidades porque as ondas que se propagam na corda são refletidas em cada extremidade. Para certos valores do comprimento de onda, a combinação das ondas que se propagam em sentidos opostos produz uma onda estacionária (ou modo de oscilação). Os comprimentos de onda para os quais isso acontece correspondem às *freqüências de ressonância* da corda. A vantagem de produzir ondas estacionárias é que, nessas condições, a corda passa a oscilar com grande amplitude, movimentando periodicamente o ar ao redor e produzindo assim uma onda sonora audível com a mesma freqüência que as oscilações da corda. Essa forma de produção de som é de óbvia importância para, digamos, um violonista.

Podemos usar um método semelhante para produzir ondas sonoras estacionárias em um tubo cheio de ar. Quando as ondas se propagam no interior de um tubo são refletidas nas extremidades. (A reflexão ocorre mesmo que uma extremidade esteja aberta, embora, nesse caso, a reflexão não seja tão completa.) Para certos comprimentos de onda das ondas sonoras, a superposição das ondas que se propagam no tubo em sentidos opostos produz uma onda estacionária. Os comprimentos de onda para os quais isso acontece correspondem às *freqüências de ressonância* do tubo. A vantagem de produzir ondas estacionárias é que, nessas condições, o ar no interior do tubo passa a oscilar com grande amplitude, movimentando periodicamente o ar ao redor e produzindo assim uma onda sonora audível com a mesma freqüência que



**FIG. 17-13** A coluna de ar no interior de um *digeridu* (um “tubo”) oscila quando o instrumento é tocado. (Alamy Images)



**FIG. 17-14** (a) O padrão de deslocamento mais simples para uma onda sonora (longitudinal) estacionária em um tubo com as duas extremidades abertas possui um antinó (A) em cada extremidade e um nó (N) no ponto médio do tubo. (Os deslocamentos longitudinais, representados pelas setas duplas, estão muito exagerados.) (b) O padrão correspondente para uma onda elástica (transversal) estacionária em uma corda.

as oscilações do ar no tubo. Essa forma de produção de som é de óbvia importância para, digamos, um organista.

Muitos outros aspectos das ondas sonoras estacionárias são semelhantes aos de ondas em cordas: a extremidade fechada de um tubo é como a extremidade fixa de uma corda, pois tem que haver um nó (deslocamento nulo) nesse local, e a extremidade aberta de um tubo é como a extremidade de uma corda presa a um anel que se move livremente, como na Fig. 16-21b, pois deve existir um antinó nesse local. (Na verdade, o antinó associado à extremidade aberta de um tubo está localizado ligeiramente para fora da extremidade, mas isso é irrelevante para nossa discussão.)

A Fig. 17-14a mostra a onda estacionária mais simples que pode ser produzida em um tubo com as duas extremidades abertas. Existe um antinó em cada extremidade e um nó no ponto médio do tubo. Um modo mais simples de representar essa onda sonora longitudinal estacionária é mostrado na Fig. 17-14b, na qual ela foi desenhada como se fosse uma onda estacionária em uma corda (neste caso, a coordenada perpendicular à direção de propagação da onda representa a variação de pressão em cada ponto, em vez do deslocamento da corda).

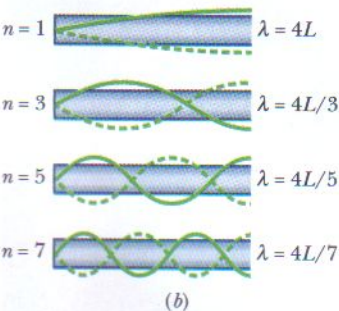
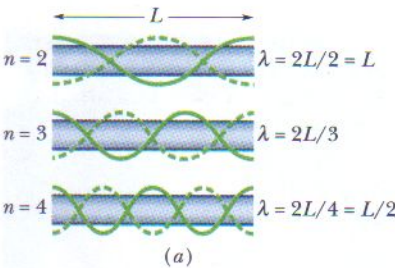
A onda estacionária da Fig. 17-14a é chamada de *modo fundamental* ou *primeiro harmônico*. Para produzi-lo as ondas sonoras em um tubo de comprimento  $L$  devem ter um comprimento de onda tal que  $\lambda = 2L$ . A Fig. 17-15a mostra várias outras ondas sonoras estacionárias que podem ser produzidas em um tubo com as duas extremidades abertas. No caso do *segundo harmônico*, o comprimento das ondas sonoras é  $\lambda = L$ , no caso do *terceiro harmônico* é  $\lambda = 2L/3$ , e assim por diante.

No caso geral, as frequências de ressonância de um tubo de comprimento  $L$  com as duas extremidades abertas correspondem a comprimentos de onda dados por

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots, \quad (17-38)$$

onde  $n$  é o *número harmônico*. Chamando de  $v$  a velocidade do som, podemos escrever as frequências de ressonância de um tubo aberto nas duas extremidades como

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L}, \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{tubo, duas extremidades abertas}). \quad (17-39)$$



**FIG. 17-15** Ondas estacionárias em tubos, representadas por curvas de pressão em função da posição. (a) Com as duas extremidades do tubo abertas qualquer harmônico pode ser produzido no tubo. (b) Com apenas uma extremidade aberta, apenas os harmônicos ímpares podem ser produzidos.

A Fig. 17-15b mostra algumas ondas sonoras estacionárias que podem ser produzidas em um tubo com apenas uma das extremidades abertas. Nesse caso existe um antinó na extremidade aberta e um nó na extremidade fechada. O modo mais simples é aquele no qual  $\lambda = 4L$ . No segundo modo mais simples,  $\lambda = 4L/3$ , e assim por diante.

No caso geral as frequências de ressonância de um tubo de comprimento  $L$  com uma extremidade aberta e a outra fechada correspondem a comprimentos de onda dados por

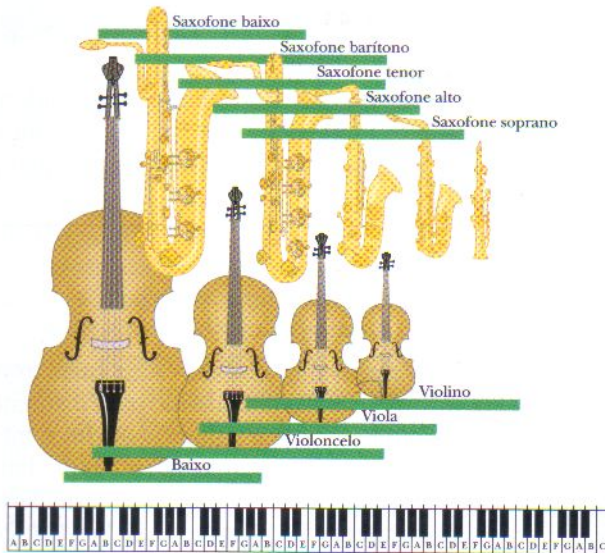
$$\lambda = \frac{4L}{n}, \quad \text{para } n = 1, 3, 5, \dots, \quad (17-40)$$

onde o número harmônico  $n$  é um *número ímpar*. As frequências de ressonância são dadas por

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{4L}, \quad \text{para } n = 1, 3, 5, \dots \quad (\text{tubo, uma extremidade aberta}). \quad (17-41)$$

Observe que apenas os harmônicos ímpares podem existir em um tubo com uma das extremidades abertas. Assim, por exemplo, o segundo harmônico, com  $n = 2$ , não pode ser produzido em um tubo desse tipo. Observe também que em um tubo desse tipo uma expressão como “o terceiro harmônico” ainda se refere ao modo cujo número harmônico é 3, e não ao terceiro harmônico possível.

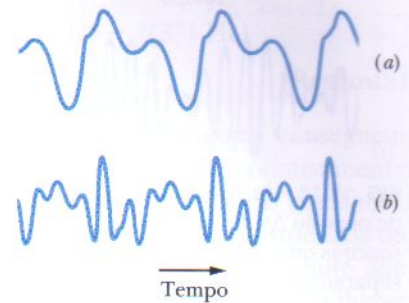
O comprimento de um instrumento musical está ligado à faixa de frequências que o instrumento foi projetado para cobrir; comprimentos menores estão associados a frequências mais altas. A Fig. 17-16, por exemplo, mostra as famílias do saxo-



**FIG. 17-16** As famílias do saxofone e do violino, mostrando a relação entre o comprimento do instrumento e a faixa de frequências. A faixa de frequências de cada instrumento é indicada por uma barra horizontal em uma escala de frequência sugerida pelo teclado da figura; as frequências aumentam da esquerda para a direita.

fone e do violino, com as faixas de frequências sugeridas pelo teclado de um piano. Observe que para cada instrumento existe uma superposição com os vizinhos de frequências mais altas e de frequências mais baixas.

Em qualquer sistema oscilatório que produz um som musical, seja ele uma corda de violino ou o ar em um tubo de órgão, o modo fundamental e um ou mais harmônicos superiores costumam ser gerados simultaneamente. Assim, são escutados juntos, ou seja, superpostos para formar uma onda resultante. Quando diferentes instrumentos tocam a mesma nota produzem a mesma frequência fundamental, mas os harmônicos superiores têm intensidades diferentes. Assim, por exemplo, o quarto harmônico do dó médio pode ser forte em um instrumento e fraco ou mesmo ausente em outro instrumento. É por isso que os instrumentos produzem sons diferentes, mesmo quando tocam a mesma nota. Esse é o caso das duas ondas resultantes mostradas na Fig. 17-17, que foram produzidas por diferentes instrumentos tocando a mesma nota musical.



**FIG. 17-17** As formas de onda produzidas (a) por uma flauta e (b) por um oboé quando a mesma nota é tocada, com a mesma frequência fundamental.

**TESTE 3** O tubo  $A$ , de comprimento  $L$ , e o tubo  $B$ , de comprimento  $2L$ , têm as duas extremidades abertas. Que harmônico do tubo  $B$  tem a mesma frequência que o modo fundamental do tubo  $A$ ?

### Exemplo 17-6

Ruídos de fundo de baixa intensidade em uma sala produzem ondas estacionárias em um tubo de papelão de comprimento  $L = 67,0$  cm com as duas extremidades abertas. Suponha que a velocidade do som no ar dentro do tubo é  $343$  m/s.

(a) Qual a frequência do som produzido pelo tubo?

#### IDÉIA-CHAVE

Com as duas extremidades do tubo abertas temos uma situação simétrica na qual a onda estacionária possui um antinó em cada extremidade do tubo. A onda estacionária do modo fundamental é a da Fig. 17-14b.

**Cálculo:** A frequência é dada pela Eq. 17-39, com  $n = 1$ :

$$f = \frac{nv}{2L} = \frac{(1)(343 \text{ m/s})}{2(0,670 \text{ m})} = 256 \text{ Hz.} \quad (\text{Resposta})$$

Se os ruídos de fundo produzirem um harmônico de ordem superior, como, por exemplo, o segundo harmônico, serão produzidas outras frequências que são múltiplos *inteiros* de  $256$  Hz.

(b) Se você encostar o ouvido em uma das extremidades do tubo, que frequência fundamental ouvirá?

#### IDÉIA-CHAVE

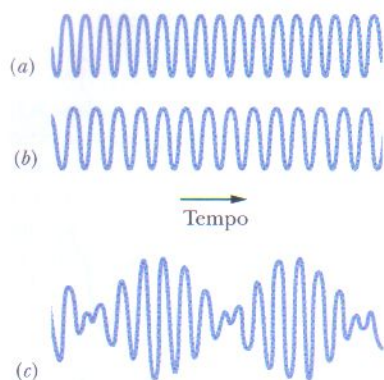
Com o seu ouvido fechando uma das extremidades do tubo temos uma situação assimétrica: ainda

existe um antinó na extremidade aberta, mas passa a haver um nó na outra extremidade, que está fechada. Nesse caso, a onda estacionária mais simples é a representada no alto na Fig. 17-15b.

**Cálculo:** A frequência é dada pela Eq. 17-41, com  $n = 1$  para o modo fundamental:

$$f = \frac{nv}{4L} = \frac{(1)(343 \text{ m/s})}{4(0,670 \text{ m})} = 128 \text{ Hz.} \quad (\text{Resposta})$$

Se os ruídos de fundo produzirem harmônicos superiores, eles serão múltiplos ímpares de 128 Hz. Isso significa que a frequência de 256 Hz (que é um múltiplo par) não pode ocorrer.



**FIG. 17-18** (a, b) As variações de pressão  $\Delta p$  de duas ondas sonoras quando são detectadas separadamente. As frequências das ondas são muito próximas. (c) A variação de pressão resultante quando as duas ondas são detectadas simultaneamente.

## 17-8 | Batimentos

Quando escutamos, com uma diferença de alguns minutos, dois sons cujas frequências são muito próximas, 552 e 564 Hz, digamos, temos dificuldade para distingui-los. Quando os dois sons chegam aos nossos ouvidos simultaneamente ouvimos um som cuja frequência é 558 Hz, a *média* das duas frequências, mas percebemos também uma grande variação na intensidade do som; ela aumenta e diminui alternadamente, produzindo um **batimento** que se repete com uma frequência de 12 Hz, a *diferença* entre as duas frequências originais. A Fig. 17-18 ilustra esse fenômeno.

Suponha que as variações de pressão em um certo local, produzidas por duas ondas sonoras de mesma amplitude  $s_m$ , sejam

$$s_1 = s_m \cos \omega_1 t \quad \text{e} \quad s_2 = s_m \cos \omega_2 t, \quad (17-42)$$

onde  $\omega_1 > \omega_2$ . De acordo com o princípio de superposição, a variação de pressão total é dada por

$$s = s_1 + s_2 = s_m (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t).$$

Usando a identidade trigonométrica (veja o Apêndice E),

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left[ \frac{1}{2}(\alpha - \beta) \right] \cos \left[ \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \right]$$

podemos escrever a variação de pressão total na forma

$$s = 2s_m \cos \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t \right] \cos \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t \right]. \quad (17-43)$$

Definindo

$$\omega' = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2) \quad \text{e} \quad \omega = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2), \quad (17-44)$$

podemos escrever a Eq. 17-43 na forma

$$s(t) = [2s_m \cos \omega' t] \cos \omega t. \quad (17-45)$$

Vamos supor que as frequências angulares  $\omega_1$  e  $\omega_2$  das ondas que se combinam são quase iguais, o que significa que  $\omega \gg \omega'$  na Eq. 17-44. Nesse caso podemos considerar a Eq. 17-45 como uma função co-seno cuja frequência angular é  $\omega$  e cuja amplitude (que não é constante, mas varia com uma frequência angular  $\omega'$ ) é o valor absoluto do fator entre colchetes.

Um máximo de amplitude ocorre sempre que  $\cos \omega' t$  na Eq. 17-45 é igual a 1 ou  $-1$ , o que acontece duas vezes em cada repetição da função co-seno. Como  $\cos \omega' t$  tem uma frequência angular  $\omega'$ , a frequência angular  $\omega_{\text{bat}}$  com a qual ocorre o batimento é  $\omega_{\text{bat}} = 2\omega'$ . Assim, com a ajuda da Eq. 17-44 podemos escrever

$$\omega_{\text{bat}} = 2\omega' = (2)\left(\frac{1}{2}\right)(\omega_1 - \omega_2) = \omega_1 - \omega_2.$$

Como  $\omega = 2\pi f$ , esta equação também pode ser escrita na forma

$$f_{\text{bat}} = f_1 - f_2 \quad (\text{frequência de batimento}). \quad (17-46)$$

Os músicos usam o fenômeno de batimento para afinar seus instrumentos. O som de um instrumento é comparado com uma frequência-padrão (como, por exemplo, uma nota chamada “lá de concerto” tocada pelo primeiro oboé), e ajustado até que o batimento desapareça. Em Viena, o lá de concerto (440 Hz) é fornecido por telefone aos muitos músicos residentes na cidade.



**Exemplo 17-7**

Quando um pingüim imperador volta para casa depois de sair à procura de alimento, como consegue encontrar a companheira no meio de milhares de pingüins reunidos para se proteger do rigoroso inverno da Antártica? Não é pela visão, já que todos os pingüins são muito parecidos, mesmo para um pingüim.

A resposta está no modo como os pingüins emitem sons. A maioria dos pássaros emite sons usando apenas um dos lados do seu órgão vocal, chamado *siringe*. Os pingüins imperadores, porém, emitem sons usando simultaneamente os dois lados da siringe. Cada lado produz ondas acústicas estacionárias na garganta e na boca do pássaro, como em um tubo com as duas extremidades abertas. Suponha que a frequência do primeiro harmônico produzido pelo lado *A* da siringe é  $f_{A1} = 432$  Hz e que a frequência do primeiro harmônico produzido pela extremidade *B* é  $f_{B1} = 371$  Hz. Qual é a frequência de batimento entre as duas frequências do primeiro harmônico e entre as duas frequências do segundo harmônico?

Como as ondas estacionárias no pingüim correspondem a um tubo com as duas extremidades abertas, as frequências de ressonância são dadas pela Eq. 17-39 ( $f = nv/2L$ ), onde  $L$  é o comprimento (desconhecido) do tubo. A frequência do primeiro harmônico é  $f_1 = v/2L$  e a frequência do segundo harmônico é  $f_2 = 2v/2L$ . Comparando as duas frequências, vemos que, seja qual for o valor de  $L$ ,

$$f_2 = 2f_1.$$

Para o pingüim, o segundo harmônico do lado *A* tem uma frequência  $f_{A2} = 2f_{A1}$ , e o segundo harmônico do lado *B* tem uma frequência  $f_{B2} = 2f_{B1}$ . Usando a Eq. 17-46 com as frequências  $f_{A2}$  e  $f_{B2}$ , descobrimos que a frequência de batimento correspondente é

$$\begin{aligned} f_{\text{bat},2} &= f_{A2} - f_{B2} = 2f_{A1} - 2f_{B1} \\ &= 2(432 \text{ Hz}) - 2(371 \text{ Hz}) \\ &= 122 \text{ Hz}. \end{aligned}$$

(Resposta)

Os experimentos mostram que os pingüins conseguem perceber essas frequências de batimento relativamente elevadas (o mesmo não se pode dizer dos seres humanos). Assim, o chamado de um pingüim possui uma variedade de harmônicos e frequências de batimento que permite que sua voz seja identificada mesmo entre as vozes de milhares de outros pingüins.

**IDÉIA-CHAVE**

De acordo com a Eq. 17-46 ( $f_{\text{bat}} = f_1 - f_2$ ), a frequência de batimento de duas frequências é a diferença entre elas.

**Cálculos:** Para as duas frequências de primeiro harmônico  $f_{A1}$  e  $f_{B1}$ , a frequência de batimento é

$$\begin{aligned} f_{\text{bat},1} &= f_{A1} - f_{B1} = 432 \text{ Hz} - 371 \text{ Hz} \\ &= 61 \text{ Hz}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

**17-9 | O Efeito Doppler**

Um carro de polícia está estacionado no acostamento de uma rodovia, com a sirene de 1000 Hz ligada. Se você também estiver parado no acostamento, ouvirá o som da sirene com a mesma frequência. Entretanto, se houver um movimento relativo entre você e o carro de polícia você ouvirá uma frequência diferente. Assim, por exemplo, se você estiver se *aproximando* do carro de polícia a 120 km/h ouvirá uma frequência *mais alta* (1096 Hz, um *aumento* de 96 Hz). Se estiver se *afastando* do carro de polícia com essa mesma velocidade ouvirá uma frequência *mais baixa* (904 Hz, uma *diminuição* de 96 Hz).

Essas variações de frequência relacionadas ao movimento são exemplos do **efeito Doppler**. Esse efeito foi proposto (embora não tenha sido perfeitamente analisado) em 1842 pelo físico austríaco Johann Christian Doppler. Foi estudado experimentalmente em 1845 por Buys Ballot, na Holanda, “usando uma locomotiva que puxava um vagão aberto com vários trompetistas”.

O efeito Doppler é observado não só nas ondas sonoras, mas também nas ondas eletromagnéticas, como as microondas, as ondas de rádio e a luz visível. No momento, porém, vamos considerar apenas o caso das ondas sonoras e usar como referencial a massa de ar onde essas ondas se propagam. Isso significa que a velocidade da fonte *S* de ondas sonoras e do detector *D* dessas ondas serão medidas *em relação ao ar*. (A não ser que seja dito o contrário, vamos supor que o ar está em repouso em relação ao solo, de modo que as velocidades também podem ser medidas em relação ao solo.) Vamos supor que *S* e *D* se aproximam ou se afastam um do outro em linha reta, com velocidades menores do que a velocidade do som.

Se o detector ou a fonte está se movendo, ou se ambos estão se movendo, a frequência emitida  $f$  e a frequência detectada  $f'$  são relacionadas através da equação

$$f' = f \frac{v \pm v_D}{v \pm v_S} \quad (\text{equação geral do efeito Doppler}), \quad (17-47)$$

onde  $v$  é a velocidade do som no ar,  $v_D$  é a velocidade do detector em relação ao ar e  $v_S$  é a velocidade da fonte em relação ao ar. A escolha do sinal positivo ou negativo é dada pela seguinte regra:

Quando o movimento do detector ou da fonte é no sentido de aproximá-los, o sinal da velocidade deve resultar em um aumento da frequência. Quando o movimento do detector ou da fonte é no sentido de afastá-los, o sinal da velocidade deve resultar em uma diminuição da frequência.

Para resumir, *aproximação* significa *aumento de frequência*; *afastamento* significa *diminuição de frequência*.

Aqui estão alguns exemplos de aplicação da regra. Se o detector está se movendo em direção à fonte use o sinal positivo no numerador da Eq. 17-47 para obter um aumento da frequência. Se o detector está se afastando da fonte use o sinal negativo no numerador para obter uma diminuição da frequência. Se o detector estiver parado substitua  $v_D$  por 0. Se a fonte estiver se movendo em direção ao detector use o sinal negativo no denominador da Eq. 17-47 para obter um aumento da frequência. Se a fonte estiver se afastando use o sinal positivo no denominador para obter uma diminuição da frequência. Se a fonte estiver parada substitua  $v_S$  por 0.

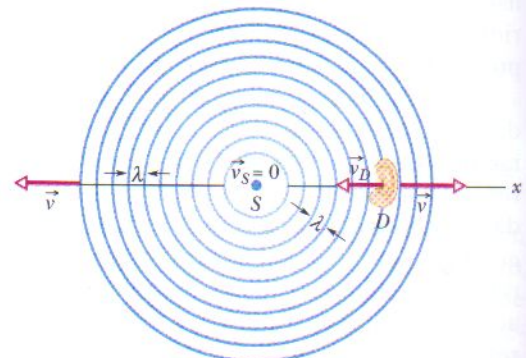
Vamos agora demonstrar equações para o efeito Doppler em duas situações particulares e, em seguida, demonstrar a Eq. 17-47 para o caso geral.

1. Quando o detector está se movendo em relação ao ar e a fonte está parada em relação ao ar o movimento altera a frequência com a qual o detector intercepta as frentes de onda e, portanto, a frequência da onda sonora detectada.
2. Quando a fonte está se movendo em relação ao ar e o detector está parado em relação ao ar o movimento altera o comprimento de onda da onda sonora e, portanto, a frequência detectada (lembre-se de que a frequência está relacionada ao comprimento de onda).

### Detector em Movimento, Fonte Parada

Na Fig. 17-19 um detector  $D$  (representado por uma orelha) está se movendo com velocidade  $v_D$  em direção a uma fonte estacionária  $S$  que emite ondas esféricas, de comprimento de onda  $\lambda$  e frequência  $f$ , que se propagam com a velocidade  $v$  do som no ar. As frentes de onda estão desenhadas com uma separação de um comprimento de onda. A frequência detectada pelo detector  $D$  é a taxa com a qual  $D$  intercepta as frentes de onda (ou comprimentos de onda individuais). Se  $D$  estivesse parado essa

**FIG. 17-19** Uma fonte sonora estacionária  $S$  emite frentes de onda esféricas, mostradas com uma separação de um comprimento de onda, que se expandem radialmente com velocidade  $v$ . Um detector  $D$ , representado por uma orelha, se move com velocidade  $v_D$  em direção à fonte. O detector mede uma frequência maior por causa do movimento.



taxa seria  $f$ , mas como  $D$  está se movendo em direção às frentes de onda a taxa de interceptação é maior e, portanto, a frequência detectada  $f'$  é maior do que  $f$ .

Vamos por um momento considerar a situação na qual  $D$  está estacionário (Fig. 17-20). No intervalo de tempo  $t$  as frentes de onda percorrem uma distância  $vt$  para a direita. O número de comprimentos de onda nessa distância  $vt$  é o número de comprimentos de onda interceptados por  $D$  no intervalo  $t$ ; esse número é  $vt/\lambda$ . A taxa com a qual  $D$  intercepta comprimentos de onda, que é a frequência  $f$  detectada por  $D$ , é

$$f' = \frac{vt/\lambda}{t} = \frac{v}{\lambda}. \quad (17-48)$$

Nessa situação, com  $D$  parado não existe efeito Doppler: a frequência detectada pelo detector  $D$  é a frequência emitida pela fonte  $S$ .

Agora vamos novamente considerar a situação na qual  $D$  se move no sentido oposto à velocidade das frentes de ondas (Fig. 17-21). No intervalo de tempo  $t$  as frentes de onda percorrem uma distância  $vt$  para a direita, como antes, mas agora  $D$  percorre uma distância  $v_D t$  para a esquerda. Assim, nesse intervalo  $t$  a distância percorrida pelas frentes de onda em relação a  $D$  é  $vt + v_D t$ . O número de frentes de onda nessa distância relativa  $vt + v_D t$  é o número de comprimentos de onda interceptados por  $D$  no intervalo  $t$  e é dado por  $(vt + v_D t)/\lambda$ . A taxa com a qual  $D$  intercepta comprimentos de onda nessa situação é a frequência  $f'$ , dada por

$$f' = \frac{(vt + v_D t)/\lambda}{t} = \frac{v + v_D}{\lambda}. \quad (17-49)$$

De acordo com a Eq. 17-48,  $\lambda = v/f$ . Assim, a Eq. 17-49 pode ser escrita na forma

$$f' = \frac{v + v_D}{v/f} = f \frac{v + v_D}{v}. \quad (17-50)$$

Observe que na Eq. 17-50  $f' > f$  a menos que  $v_D = 0$  (ou seja, a menos que o detector esteja parado).

Podemos usar um raciocínio semelhante para calcular a frequência detectada por  $D$  quando  $D$  está se afastando da fonte. Nesse caso, as frentes de onda se movem uma distância  $vt - v_D t$  em relação a  $D$  no intervalo  $t$ , e  $f'$  é dada por

$$f' = f \frac{v - v_D}{v}. \quad (17-51)$$

Na Eq. 17-51  $f' < f$ , a menos que  $v_D = 0$ . Podemos condensar as Eqs. 17-50 e 17-51 na equação

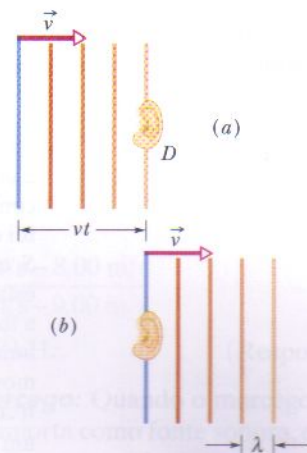
$$f' = f \frac{v \pm v_D}{v} \quad (\text{detector em movimento, fonte parada}). \quad (17-52)$$

### Fonte em Movimento, Detector Parado

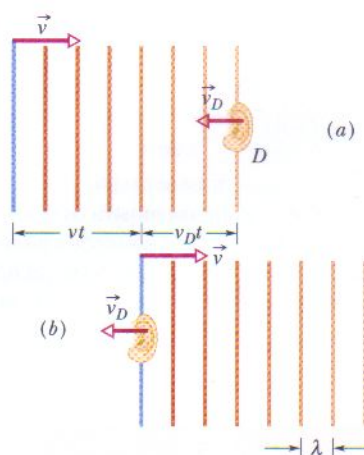
Suponha que o detector  $D$  está parado em relação à massa de ar e a fonte  $S$  está se movendo em direção a  $D$  com velocidade  $v_S$  (Fig. 17-22). O movimento de  $S$  altera o comprimento de onda das ondas sonoras que a fonte emite e, portanto, a frequência detectada por  $D$ .

Para compreendermos por que isso acontece, vamos chamar de  $T$  ( $= 1/f$ ) o intervalo de tempo entre a emissão de um par de frentes de onda sucessivas,  $O_1$  e  $O_2$ . Durante o intervalo  $T$  a frente de onda  $O_1$  percorre uma distância  $vT$  e a fonte percorre uma distância  $v_S T$ . No fim do intervalo  $T$  a frente de onda  $O_2$  é emitida. No lado para onde  $S$  está se movendo a distância entre  $O_1$  e  $O_2$ , que é o comprimento de onda  $\lambda'$  das ondas que se propagam nessa direção, é  $vT - v_S T$ . Se  $D$  detecta essas ondas, detecta uma frequência  $f'$  dada por

$$\begin{aligned} f' &= \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{vT - v_S T} = \frac{v}{v/f - v_S/f} \\ &= f \frac{v}{v - v_S}. \end{aligned} \quad (17-53)$$

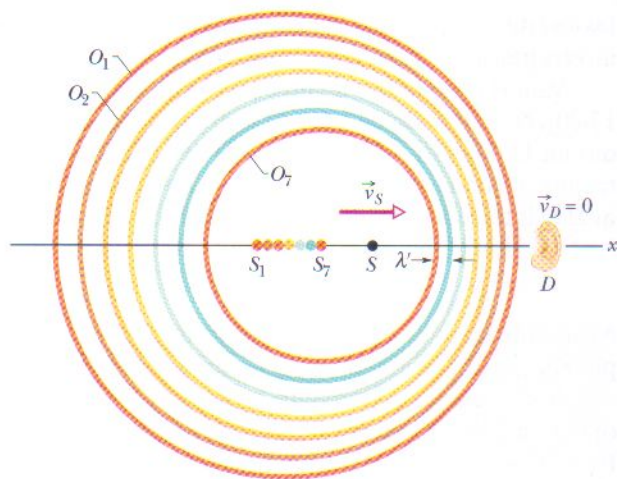


**FIG. 17-20** As frentes de onda da Fig. 17-19, supostas planas, (a) alcançam e (b) passam por um detector estacionário  $D$ ; elas percorrem uma distância  $vt$  para a direita no intervalo de tempo  $t$ .



**FIG. 17-21** Frentes de onda que se deslocam para a direita (a) alcançam e (b) passam pelo detector  $D$ , que se move no sentido oposto. No intervalo de tempo  $t$ , as frentes de onda percorrem uma distância  $vt$  para a direita e  $D$  percorre uma distância  $v_D t$  para a esquerda.

**FIG. 17-22** Um detector  $D$  está parado e uma fonte  $S$  se move em direção a ele com velocidade  $v_s$ . A frente de onda  $O_1$  foi emitida quando a fonte estava em  $S_1$  e a frente de onda  $O_7$  quando a fonte estava em  $S_7$ . No instante representado a fonte está em  $S$ . O detector percebe uma frequência maior porque a fonte em movimento, perseguindo suas próprias frentes de onda, emite uma onda com um comprimento de onda reduzido  $\lambda'$  na direção do movimento.



Na Eq. 17-53,  $f' > f$  a menos que  $v_s = 0$ .

No lado oposto, o comprimento de onda  $\lambda'$  das ondas é  $vT + v_sT$ . Se  $D$  detecta estas ondas, detecta a frequência  $f'$  dada por

$$f' = f \frac{v}{v + v_s} \tag{17-54}$$

Na Eq. 17-54  $f' < f$ , a menos que  $v_s = 0$ .

Podemos condensar as Eqs. 17-53 e 17-54 na equação

$$f' = f \frac{v}{v \pm v_s} \quad (\text{fonte em movimento, detector parado}). \tag{17-55}$$

### Equação Geral do Efeito Doppler

Podemos agora escrever a equação geral do efeito Doppler substituindo  $f'$  na Eq. 17-55 (a frequência da fonte) por  $f'$  da Eq. 17-52 (a frequência associada ao movimento do detector). O resultado é a Eq. 17-47, a equação geral do efeito Doppler.

Esta equação geral se aplica não só quando o detector e a fonte estão se movendo, mas também nas duas situações particulares que acabamos de discutir. Na situação em que o detector está se movendo e a fonte está parada, fazendo  $v_s = 0$  na Eq. 17-47, obtemos a Eq. 17-52, já demonstrada. Na situação em que a fonte está se movendo e o detector está parado, fazendo  $v_D = 0$  na Eq. 17-47, obtemos a Eq. 17-55, já demonstrada. Assim, a Eq. 17-47 é a equação a ser lembrada.

**TESTE 4** A figura mostra os sentidos de movimento de uma fonte sonora e de um detector para seis situações, no ar estacionário. Para cada situação a frequência detectada é maior que a frequência emitida, menor que a frequência emitida ou não é possível dar uma resposta sem conhecer as velocidades envolvidas?

	Fonte	Detector		Fonte	Detector
(a)	→	• Velocidade 0	(d)	←	←
(b)	←	• Velocidade 0	(e)	→	←
(c)	→	→	(f)	←	→

### Exemplo 17-8 Aumente sua capacidade

Os morcegos se orientam e localizam suas presas emitindo e detectando ondas ultra-sônicas, que são ondas sonoras com frequências tão altas que não podem ser percebidas pelos ouvidos humanos. Suponha que um morcego emite ultra-sons com uma frequência  $f_{mor,e} = 82,52 \text{ kHz}$  enquanto está voando com uma velocidade  $\vec{v}_{mor} = (9,00 \text{ m/s})\hat{i}$  em perseguição a uma mariposa que voa com velocidade

$\vec{v}_{mar} = (8,00 \text{ m/s})\hat{i}$ . Que frequência  $f_{mar,d}$  é detectada pela mariposa? Qual é a frequência  $f_{mor,d}$  detectada pelo morcego ao receber o eco da mariposa?

**IDÉIAS-CHAVE** A frequência é alterada pelo movimento relativo do morcego e da mariposa. Como os dois estão se

movendo no mesmo eixo, a variação de frequência é dada pela equação geral do efeito Doppler, Eq. 17-47. Um movimento de *aproximação* faz a frequência *aumentar*, e um movimento de *afastamento* faz a frequência *diminuir*.

**Detecção pela mariposa:** A equação geral do efeito Doppler é

$$f' = f \frac{v \pm v_D}{v \pm v_S}, \tag{17-56}$$

onde a frequência detectada  $f'$  na qual estamos interessados é a frequência  $f_{mar,d}$  detectada pela mariposa. Do lado direito da equação a frequência emitida  $f$  é a frequência de emissão do morcego,  $f_{mor,e} = 82,52$  kHz, a velocidade do som é  $v = 343$  m/s, a velocidade  $v_D$  do detector é a velocidade da mariposa,  $v_{mar} = 8,00$  m/s, e a velocidade  $v_S$  da fonte é a velocidade do morcego,  $v_{mor} = 9,00$  m/s.

Essas substituições na Eq. 17-56 são fáceis de fazer. Entretanto, é preciso tomar cuidado na escolha dos sinais. Uma boa estratégia é pensar em termos de *aproximação* e *afastamento*. Considere, por exemplo, a velocidade da mariposa (o detector) no numerador da Eq. 17-56. A mariposa está se movendo *para longe* do morcego, o que tende a diminuir a frequência detectada. Como a velocidade está no numerador, escolhemos o sinal negativo para respeitar a tendência (o numerador fica menor). Os passos desse raciocínio estão indicados na Tabela 17-3.

A velocidade do morcego aparece no denominador da Eq. 17-56. O morcego está se movendo *para perto* na mariposa, o que tende a aumentar a frequência detectada.

Como a velocidade está no denominador, escolhemos o sinal negativo para respeitar essa tendência (o denominador fica menor).

Com essas substituições e escolhas, temos:

$$\begin{aligned} f_{mar,d} &= f_{mor,e} \frac{v - v_{mar}}{v - v_{mor}} \\ &= (82,52 \text{ kHz}) \frac{343 \text{ m/s} - 8,00 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s} - 9,00 \text{ m/s}} \\ &= 82,767 \text{ kHz} \approx 82,8 \text{ kHz}. \end{aligned} \tag{Resposta}$$

**Detecção do eco pelo morcego:** Quando o morcego recebe o eco a mariposa se comporta como fonte sonora, emitindo sons com a frequência  $f_{mar,d}$  que acabamos de calcular. Assim, agora a mariposa é a fonte (que está se movendo *para longe* do detector) e o morcego é o detector (que está se movendo *para perto* da fonte). Os passos desse raciocínio estão indicados na Tabela 17-3. Para calcular a frequência  $f_{mor,d}$  detectada pelo morcego usamos a Eq. 17-56:

$$\begin{aligned} f_{mor,d} &= f_{mar,d} \frac{v + v_{mor}}{v + v_{mar}} \\ &= (82,767 \text{ kHz}) \frac{343 \text{ m/s} + 9,00 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s} + 8,00 \text{ m/s}} \\ &= 83,00 \text{ kHz} \approx 83,0 \text{ kHz}. \end{aligned} \tag{Resposta}$$

Algumas mariposas se defendem emitindo estalidos ultra-sônicos que interferem com o sistema de detecção dos morcegos.

**TABELA 17-3**

**Do Morcego para a Mariposa**

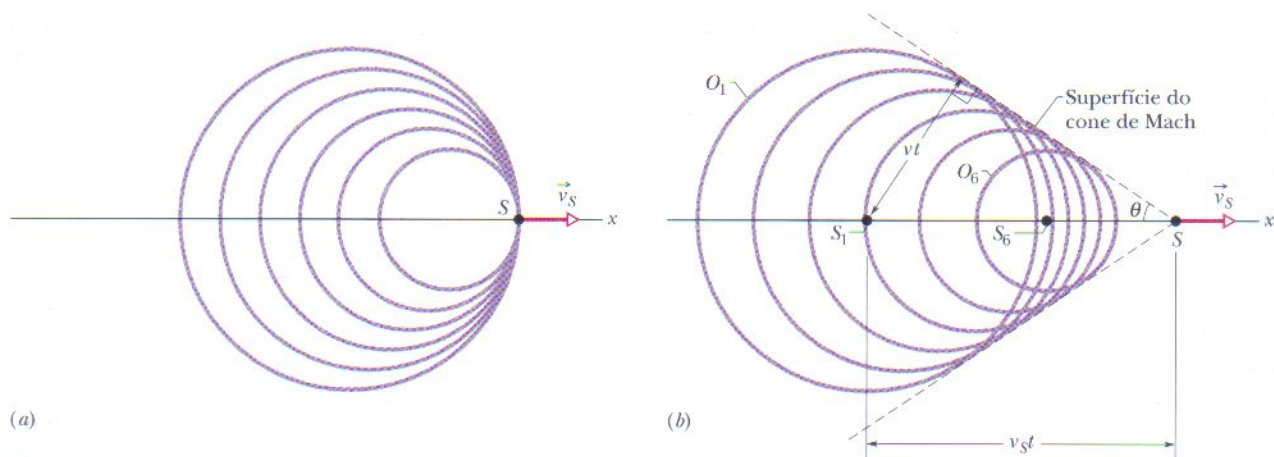
**Eco da Mariposa para o Morcego**

Detector	Fonte	Detector	Fonte
mariposa	morcego	morcego	mariposa
velocidade $v_D = v_{mar}$	velocidade $v_S = v_{mor}$	velocidade $v_D = v_{mor}$	velocidade $v_S = v_{mar}$
afastamento	aproximação	aproximação	afastamento
diminui	aumenta	aumento	diminui
numerador	denominador	numerador	denominador
negativo	negativo	positivo	positivo

## 17-10 | Velocidades Supersônicas, Ondas de Choque

Se uma fonte está se movendo em direção a um detector estacionário com uma velocidade igual à velocidade do som, ou seja, se  $v_S = v$ , as Eqs. 17-47 e 17-55 prevêem que a frequência detectada  $f'$  será infinita. Isso significa que a fonte está se movendo tão depressa que acompanha suas próprias frentes de onda, como mostra a Fig. 17-23a. O que acontece quando a velocidade da fonte é *maior* que a velocidade do som?

Nessas velocidades *supersônicas* as Eqs. 17-47 e 17-55 não são mais válidas. A Fig. 17-23b mostra as frentes de onda produzidas em várias posições da fonte. O raio de qualquer frente de onda dessa figura é  $vt$ , onde  $v$  é a velocidade do som e  $t$  é o tempo transcorrido depois que a fonte emitiu a frente de onda. Observe que as



**FIG. 17-23** (a) Uma fonte sonora  $S$  se move com uma velocidade  $v_s$  igual à velocidade do som  $v$ , portanto, com a mesma velocidade que as frentes de onda que produz. (b) Uma fonte  $S$  se move com uma velocidade  $v_s$  maior do que a velocidade do som  $v$ , portanto, mais depressa que as frentes de onda. Quando a fonte estava na posição  $S_1$  produziu a frente de onda  $O_1$ ; quando estava na posição  $S_6$  produziu a frente de onda  $O_6$ . Todas as frentes de ondas esféricas se expandem com a velocidade do som  $v$  e se superpõem na superfície de um cone chamado cone de Mach, formando uma onda de choque. A superfície do cone possui um semi-ângulo  $\theta$  e é tangente a todas as frentes de onda.

frentes de onda se combinam em uma envoltória em forma de V no desenho bidimensional da Fig. 17-23b. As frentes de onda na verdade se propagam em três dimensões e se combinam em uma envoltória em forma de cone chamada *cone de Mach*. Dizemos que existe uma *onda de choque* na superfície desse cone porque a superposição das frentes de onda causa uma elevação e uma queda abrupta da pressão do ar quando a superfície passa por um ponto qualquer. De acordo com a Fig. 17-23b, o semi-ângulo  $\theta$  do cone, chamado *ângulo do cone de Mach*, é dado por

$$\sin \theta = \frac{vt}{v_s t} = \frac{v}{v_s} \quad (\text{ângulo de cone de Mach}). \quad (17-57)$$

A razão  $v_s/v$  é chamada de *número de Mach*. Quando você ouve dizer que um certo avião voou a Mach 2,3 isso significa que a velocidade do avião era 2,3 vezes maior que a velocidade do som no ar que o avião estava atravessando. A onda de choque gerada por uma aeronave supersônica (Fig. 17-24) ou por um projétil produz um som semelhante ao de uma explosão, conhecido como *estrondo sônico*, no qual a pressão do ar primeiro aumenta bruscamente e depois diminui para valores menores que o normal antes voltar ao normal. Parte do som produzido pelo disparo de um



**FIG. 17-24** Ondas de choque produzidas pelas asas de um jato FA 18 da Marinha dos Estados Unidos. As ondas de choque são visíveis porque a redução brusca da pressão do ar fez com que moléculas de água se condensassem, formando uma nuvem. (Foto do guarda-marinha John Gay para a Marinha dos Estados Unidos)

rifle se deve ao estrondo sônico produzido pela bala. Um estrondo sônico também pode ser produzido agitando rapidamente um chicote comprido. Perto do fim do movimento a ponta está se movendo mais depressa que o som e produz um pequeno estrondo sônico: o *estalo* do chicote.

## REVISÃO E RESUMO

**Ondas Sonoras** Ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais que podem se propagar em sólidos, líquidos e gases. A velocidade  $v$  de uma onda sonora em um meio de **módulo de elasticidade volumétrico**  $B$  e massa específica  $\rho$  é

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (\text{velocidade do som}). \quad (17-3)$$

No ar a  $20^\circ\text{C}$ , a velocidade do som é igual a 343 m/s.

Uma onda sonora provoca um deslocamento longitudinal  $s$  de um elemento de massa em um meio que é dado por

$$s = s_m \cos(kx - \omega t), \quad (17-13)$$

onde  $s_m$  é a **amplitude do deslocamento** (deslocamento máximo) em relação ao equilíbrio,  $k = 2\pi/\lambda$  e  $\omega = 2\pi f$ , onde  $\lambda$  e  $f$  são o

comprimento de onda e a frequência da onda sonora. A onda sonora também provoca uma variação  $\Delta p$  da pressão do meio em relação à pressão de equilíbrio:

$$\Delta p = \Delta p_m \sin(kx - \omega t), \quad (17-14)$$

onde a **amplitude da pressão** é

$$\Delta p_m = (\nu \rho \omega) s_m. \quad (17-15)$$

**Interferência** A interferência de duas ondas sonoras de mesmo comprimento de onda que passam pelo mesmo ponto depende da diferença de fase  $\phi$  entre as ondas nesse ponto. Se as ondas sonoras foram emitidas em fase e se propagam aproximadamente na mesma direção,  $\phi$  é dado por

$$\phi = \frac{\Delta L}{\lambda} 2\pi, \quad (17-21)$$

onde  $\Delta L$  é a **diferença de percurso** (a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas para chegar ao ponto comum). A interferência totalmente construtiva acontece quando  $\phi$  é um múltiplo inteiro de  $2\pi$ ,

$$\phi = m(2\pi), \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (17-22)$$

ou seja, quando a razão entre  $\Delta L$  e o comprimento de onda  $\lambda$  é dada por

$$\frac{\Delta L}{\lambda} = 0, 1, 2, \dots \quad (17-23)$$

A interferência totalmente destrutiva acontece quando  $\phi$  é um múltiplo ímpar de  $\pi$ ,

$$\phi = (2m + 1)\pi, \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (17-24)$$

ou seja, quando a razão entre  $\Delta L$  e o comprimento de onda  $\lambda$  é dada por

$$\frac{\Delta L}{\lambda} = 0,5; 1,5; 2,5; \dots \quad (17-25)$$

**Intensidade Sonora** A **intensidade**  $I$  de uma onda sonora em uma superfície é a taxa média por unidade de área com a qual a energia contida na onda atravessa a superfície ou é absorvida pela superfície:

$$I = \frac{P}{A}, \quad (17-26)$$

onde  $P$  é a taxa de transferência de energia (potência) da onda sonora e  $A$  é a área da superfície que intercepta o som. A intensidade  $I$  está relacionada à amplitude  $s_m$  do deslocamento da onda sonora através da equação

$$I = \frac{1}{2} \rho \nu \omega^2 s_m^2. \quad (17-27)$$

A intensidade a uma distância  $r$  da fonte pontual que emite ondas sonoras de potência  $P_s$  é

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2}. \quad (17-28)$$

**Nível Sonoro em Decibéis** O **nível sonoro**  $\beta$  em decibéis (dB) é definido como

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0}, \quad (17-29)$$

onde  $I_0$  ( $= 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ) é um nível de intensidade de referência com o qual todas as intensidades são comparadas. Para cada aumento de um fator de 10 na intensidade, 10 dB são somados ao nível sonoro.

**Ondas Estacionárias em Tubos** Ondas sonoras estacionárias podem ser produzidas em tubos. No caso de um tubo aberto nas duas extremidades as frequências de ressonância são dadas por

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{n\nu}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (17-39)$$

onde  $\nu$  é a velocidade do som no ar do interior do tubo. No caso de um tubo fechado em uma das extremidades e aberto na outra, as frequências de ressonância são dadas por

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{n\nu}{4L}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (17-41)$$

**Batimentos** Os **batimentos** acontecem quando duas ondas de frequências ligeiramente diferentes,  $f_1$  e  $f_2$ , são detectadas simultaneamente. A frequência de batimento é dada por

$$f_{\text{bat}} = f_1 - f_2. \quad (17-46)$$

**O Efeito Doppler** O **efeito Doppler** é a mudança da frequência observada de uma onda quando a fonte ou o detector está se movendo em relação ao meio onde a onda está se propagando (como, por exemplo, o ar). No caso do som, a frequência observada  $f'$  está relacionada à frequência  $f$  da fonte através da equação

$$f' = f \frac{v \pm v_D}{v \pm v_S} \quad (\text{equação geral do efeito Doppler}), \quad (17-47)$$

onde  $v_D$  é a velocidade do detector em relação ao meio,  $v_S$  é a velocidade da fonte e  $v$  é a velocidade do som no meio. Os sinais são escolhidos para que  $f'$  tenda a ser **maior** para os movimentos de aproximação e **menor** para os movimentos de afastamento.

**Ondas de Choque** Se a velocidade de uma fonte em relação ao meio é maior que a velocidade do som no meio, a equação para o efeito Doppler deixa de ser válida. Nesse caso, surgem ondas de choque. O semi-ângulo  $\theta$  do cone de Mach é dado por

$$\sin \theta = \frac{v}{v_S} \quad (\text{ângulo do cone de Mach}). \quad (17-57)$$

## PERGUNTAS

1 Na Fig. 17-25, três tubos longos ( $A$ ,  $B$  e  $C$ ) estão cheios de gases submetidos a pressões diferentes. A razão entre o módulo de elasticidade volumétrico e a massa específica está indicada para cada gás em termos de um valor de referência  $B_0/\rho_0$ . Cada tubo possui um êm-

bolo na extremidade esquerda que pode produzir um pulso no tubo (como na Fig. 16-2). Os três pulsos são produzidos simultaneamente. Ordene os tubos de acordo com o tempo de chegada dos pulsos na extremidade direita aberta dos tubos, em ordem crescente.

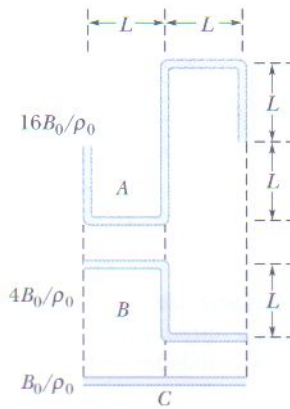


FIG. 17-25 Pergunta 1.

2 Na Fig. 17-26, duas fontes pontuais  $S_1$  e  $S_2$ , que estão em fase, emitem ondas sonoras iguais de comprimento de onda 2,0 m. Em termos de comprimentos de onda, qual é a diferença de fase entre as ondas que chegam ao ponto  $P$  se (a)  $L_1 = 38$  m e  $L_2 = 34$  m, (b)  $L_1 = 39$  m e  $L_2 = 36$  m? (c) Supondo que a distância entre as fontes é muito menor que  $L_1$  e  $L_2$ , que tipo de interferência ocorre em  $P$  nas situações (a) e (b)?

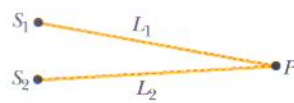


FIG. 17-26 Pergunta 2.

3 Em um primeiro experimento, uma onda sonora senoidal é produzida em um tubo longo de ar, transportando energia a uma taxa média  $P_{\text{méd},1}$ . Em um segundo experimento, duas ondas sonoras iguais à primeira são produzidas simultaneamente no tubo com uma diferença de fase  $\phi$  de 0; 0,2 ou 0,5 comprimento de onda. (a) Sem fazer cálculos no papel, ordene esses valores de  $\phi$  de acordo com a taxa média com a qual as ondas transportam energia, em ordem decrescente. (b) Para o primeiro valor de  $\phi$ , qual é a taxa média em termos de  $P_{\text{méd},1}$ ?

4 O tubo  $A$  tem comprimento  $L$  e uma extremidade aberta. O tubo  $B$  tem comprimento  $2L$  e as duas extremidades abertas. Quais harmônicos do tubo  $B$  têm frequências iguais às frequências de ressonância do tubo  $A$ ?

5 Quatro das seis frequências dos harmônicos abaixo de 1000 Hz de um certo tubo são 300, 600, 750 e 900 Hz. Quais são as duas frequências que estão faltando nesta lista?

6 O sexto harmônico é gerado em um tubo. (a) Quantas extremidades abertas o tubo possui (ele possui pelo menos uma)? (b) No ponto médio do tubo existe um nó, um antinó ou um estado intermediário?

7 Na Fig. 17-27, o tubo  $A$  é colocado para oscilar no terceiro harmônico por uma pequena fonte sonora interna. O som emitido na extremidade direita faz ressoar quatro tubos próximos, cada um com apenas uma extremidade aberta (eles não estão desenhados em escala). O tubo  $B$  oscila no modo fundamental, o

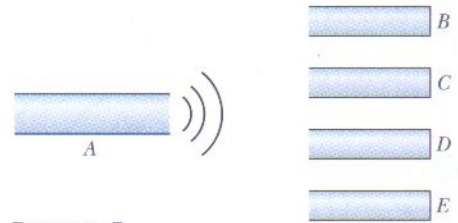


FIG. 17-27 Pergunta 7.

tubo  $C$  no segundo harmônico, o tubo  $D$  no terceiro harmônico e o tubo  $E$  no quarto harmônico. Sem executar cálculos, ordene os cinco tubos de acordo com seus comprimentos, em ordem decrescente. (Sugestão: Desenhe as ondas estacionárias em escala e, em seguida, desenhe os tubos em escala.)

8 A Fig. 17-28 mostra uma corda esticada de comprimento  $L$  e tubos  $a, b, c$  e  $d$  de comprimentos  $L, 2L, L/2$  e  $L/2$ , respectivamente. A tensão da corda é ajustada até que a velocidade das ondas na corda seja igual à velocidade do som no ar. O modo fundamental de oscilação é então produzido na corda. Em que tubo o som gerado pela corda produz ressonância e qual é o modo de oscilação correspondente?



FIG. 17-28 Pergunta 8.

9 A Fig. 17-29 mostra uma fonte  $S$  em movimento que emite sons com uma certa frequência e quatro detectores de som estacionários. Ordene os detectores de acordo com a frequência do som que detectam, da maior para a menor.

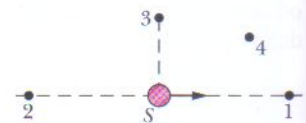


FIG. 17-29 Pergunta 9.

10 Uma pessoa fica na borda de três carrinhos, um de cada vez, segurando uma fonte que emite isotropicamente sons de uma certa frequência. A frequência que outra pessoa ouve a uma certa distância dos carrinhos varia com o tempo por causa da rotação dos carrinhos. A variação da frequência para os três carrinhos está plotada em função do tempo da Fig. 17-30. Ordene as curvas de acordo (a) com a velocidade linear  $v$  da fonte sonora, (b) com a velocidade angular  $\omega$  do carrissel e (c) com o raio  $r$  do carrissel, em ordem decrescente.

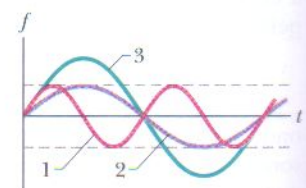


FIG. 17-30 Pergunta 10.

## 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.

Use os seguintes valores nos problemas, a menos que sejam fornecidos outros valores:

- velocidade do som no ar: 343 m/s
- massa específica do ar: 1,21 kg/m<sup>3</sup>

### seção 17-3 A Velocidade do Som

•1 Quando a porta da Capela do Mausoléu, em Hamilton, Escócia, é fechada, o último eco ouvido por uma pessoa que está atrás da porta, no interior da capela, ocorre 15 s depois. (a)



Se esse eco se devesse a uma única reflexão em uma parede em frente à porta, a que distância da porta estaria essa parede? (b) Como a parede, na verdade, está a 25,7 m de distância, a quantas reflexões (para a frente e para trás) corresponde o último eco?

•2 Uma coluna de soldados, marchando a 120 passos por minuto, segue o ritmo da batida de um tambor que é tocado na frente da coluna. Observa-se que os últimos soldados da coluna estão levantando o pé esquerdo quando os primeiros soldados estão levantando o pé direito. Qual é o comprimento aproximado da coluna?

•3 Dois espectadores de uma partida de futebol, no estádio de Montjuic, vêem e depois ouvem uma bola ser chutada no campo. O tempo de retardo para o espectador A é 0,23 s e para o espectador B é 0,12 s. As linhas de visada dos dois espectadores até o jogador que chutou a bola fazem um ângulo de 90°. A que distância do jogador estão (a) o espectador A e (b) o espectador B? (c) Qual é a distância entre os dois espectadores?

•4 Qual é o módulo de elasticidade volumétrico do oxigênio se 32 g de oxigênio ocupam 22,4 L e a velocidade do som no oxigênio é 317 m/s?

•5 Uma pedra é jogada em um poço. O som produzido pela pedra ao se chocar com a água é ouvido 3,00 s depois. Qual é a profundidade do poço?

•6 *O efeito chocolate quente.* Bata com uma colher na parte interna de uma xícara com água quente e preste atenção na frequência  $f_i$  do som. Acrescente uma colher de sopa de chocolate em pó ou café solúvel e repita o experimento enquanto mexe o líquido. A princípio, a nova frequência,  $f_s$ , é menor, porque pequenas bolhas de ar liberadas pelo pó diminuem o valor do módulo de elasticidade volumétrico da água. Quando as bolhas chegam à superfície da água e desaparecem a frequência volta ao valor original. Enquanto o efeito dura as bolhas não modificam apreciavelmente a massa específica nem o volume do líquido; limitam-se a alterar o valor de  $dV/dp$ , ou seja, a taxa de variação do volume do líquido causada pela variação de pressão associada às ondas sonoras. Se  $f_s/f_i = 0,333$ , qual é o valor da razão  $(dV/dp)_s/(dV/dp)_i$ ?

•7 Os terremotos geram ondas sonoras no interior da Terra. Ao contrário de um gás, a Terra pode transmitir tanto ondas sonoras transversais (S) como ondas sonoras longitudinais (P). A velocidade das ondas S é da ordem de 4,5 km/s e a das ondas P é da ordem de 8,0 km/s. Um sismógrafo registra as ondas P e S de um terremoto. As primeiras ondas P chegam 3,0 min antes das primeiras ondas S. Se as ondas se propagaram em linha reta, a que distância ocorreu o terremoto?

•8 Um homem bate com um martelo na ponta de uma barra delgada. A velocidade do som na barra é 15 vezes maior que a velocidade do som no ar. Uma mulher na outra extremidade, com o ouvido próximo da barra, escuta o som da pancada duas vezes, com um intervalo de 0,12 s; um som vem da barra e outro vem do ar em torno da barra. Se a velocidade do som no ar é 343 m/s, qual é o comprimento da barra?

**seção 17-4 Ondas Sonoras Progressivas**

•9 Um aparelho de ultra-som, com uma frequência de 4,50 MHz, é usado para examinar tumores em tecidos moles. (a) Qual é o comprimento de onda no ar das ondas sonoras produzidas pelo aparelho? (b) Se a velocidade do som no tecido é 1500 m/s, qual é o comprimento de onda no tecido das ondas produzidas pelo aparelho?

•10 A pressão de uma onda sonora progressiva é dada pela equação

$$\Delta p = (1,5 \text{ Pa}) \text{ sen } \pi[(0,900 \text{ m}^{-1})x - (315 \text{ s}^{-1})t].$$

Determine (a) a amplitude, (b) a frequência, (c) o comprimento de onda e (d) a velocidade da onda.

•11 Se a forma de uma onda sonora que se propaga no ar é

$$s(x, t) = (6,0 \text{ nm}) \cos(kx + (3000 \text{ rad/s})t + \phi),$$

quanto tempo uma molécula de ar no caminho onda leva para se mover entre os deslocamentos  $s = 2,0 \text{ nm}$  e  $s = -2,0 \text{ nm}$ ?

•12 *Ilusão causada pela água.*

Uma das informações usadas pelo cérebro humano para determinar a localização de uma fonte sonora é a diferença  $\Delta t$  entre o instante em que um som é detectado pelo ouvido mais próximo da fonte e o instante em que é detectado pelo outro ouvido. Suponha que a fonte está suficientemente distante para que as frentes de onda sejam praticamente planas e seja  $D$  a distância entre os ouvidos. (a) Se a direção da fonte faz um ângulo  $\theta$  com uma perpendicular ao plano do rosto (Fig. 17-31), qual é o valor de  $\Delta t$  em termos de  $D$  e da velocidade  $v$  do som no ar? (b) Se uma pessoa está debaixo d'água e a fonte está exatamente à direita, qual é o valor de  $\Delta t$  em termos de  $D$  e da velocidade  $v_a$  do som na água? (c) Com base na diferença  $\Delta t$ , o cérebro calcula erroneamente que a direção da fonte faz um ângulo  $\theta \neq 90^\circ$  com uma perpendicular ao plano do rosto. Determine o valor de  $\theta$  para água doce a 20 °C.

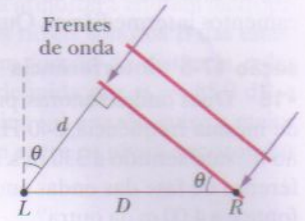


FIG. 17-31 Problema 12.

•13 O som de bater de palmas em um anfiteatro produz ondas que são espalhadas por degraus de largura  $w = 0,75 \text{ m}$  (Fig. 17-32). O som retorna ao palco como uma série regular de pulsos, que soa como uma nota musical. (a) Supondo que todos os raios na Fig. 17-32 são horizontais, determine a frequência com a qual os pulsos chegam ao palco (ou seja, a frequência da nota ouvida por alguém que se encontra no palco). (b) Se a largura  $w$  dos degraus fosse menor, a frequência seria maior ou menor?

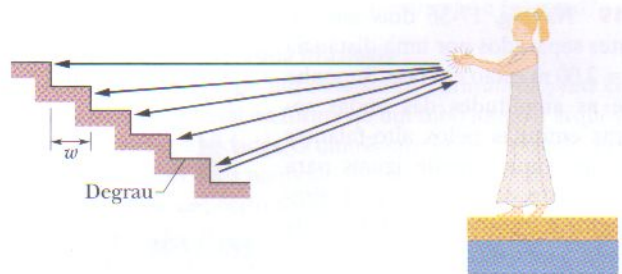


FIG. 17-32 Problema 13.

•14 A Fig. 17-33 mostra a leitura de um monitor de pressão montado em um ponto da trajetória de uma onda sonora de uma só frequência, propagando-se a 343 m/s em um ar de massa específica uniforme 1,21 kg/m³. A escala do eixo vertical é definida por  $\Delta p_s = 4,0 \text{ mPa}$ . Se a função deslocamento da onda é  $s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t)$ ,

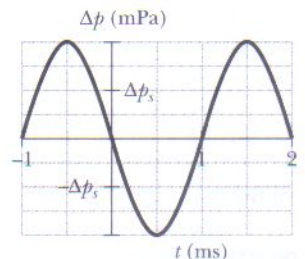


FIG. 17-33 Problema 14.

determine (a)  $s_m$ , (b)  $k$  e (c)  $\omega$ . Quando o ar é resfriado, a massa específica aumenta para  $1,35 \text{ kg/m}^3$  e a velocidade da onda sonora diminui para  $320 \text{ m/s}$ . A fonte emite uma onda com a mesma frequência e a mesma pressão que antes. Qual é o novo valor (d) de  $s_m$ , (e) de  $k$  e (f) de  $\omega$ ?

••15 Uma onda sonora da forma  $s = s_m \cos(kx - \omega t + \phi)$  se propaga a  $343 \text{ m/s}$  no ar em um tubo horizontal longo. Em um certo instante a molécula A do ar, situada no ponto  $x = 2,000 \text{ m}$ , está com o deslocamento máximo positivo de  $6,00 \text{ nm}$  e a molécula B, situada em  $x = 2,070 \text{ m}$ , está com um deslocamento positivo de  $2,00 \text{ nm}$ . Todas as moléculas entre A e B estão com deslocamentos intermediários. Qual é a frequência da onda?

**seção 17-5 Interferência**

•16 Duas ondas sonoras, produzidas por duas fontes diferentes de mesma frequência,  $540 \text{ Hz}$ , se propagam na mesma direção e no mesmo sentido a  $330 \text{ m/s}$ . As fontes estão em fase. Qual é a diferença de fase das ondas em um ponto que está a  $4,40 \text{ m}$  de uma fonte e a  $4,00 \text{ m}$  da outra?

••17 A Fig. 17-34 mostra duas fontes sonoras pontuais isotrópicas,  $S_1$  e  $S_2$ . As fontes, que emitem ondas em fase, de comprimento de onda  $\lambda = 0,50 \text{ m}$ , estão separadas por uma distância  $D = 1,75 \text{ m}$ . Se um detector é deslocado ao longo de uma grande circunferência cujo raio é o ponto médio entre as fontes, em quantos pontos as ondas chegam ao detector (a) exatamente em fase e (b) com fases opostas?

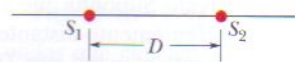


FIG. 17-34 Problemas 17 e 107.

••18 Na Fig. 17-35, um som com comprimento de onda de  $40,0 \text{ cm}$  se propaga para a direita um tubo que possui uma bifurcação. Ao chegar à bifurcação a onda se divide em duas partes. Uma parte se propaga em um tubo em forma de semicircunferência e a outra se propaga em um tubo retilíneo. As duas ondas se combinam mais adiante, interferindo mutuamente antes de chegarem a um detector. Qual é o menor raio  $r$  da semicircunferência para o qual a intensidade medida pelo detector é mínima?



FIG. 17-35 Problema 18.

••19 Na Fig. 17-36 dois alto-falantes separados por uma distância  $d_1 = 2,00 \text{ m}$  estão em fase. Suponha que as amplitudes das ondas sonoras emitidas pelos alto-falantes são aproximadamente iguais para um ouvinte que se encontra diretamente à frente do alto-falante da direita, a uma distância  $d_2 = 3,75 \text{ m}$ .

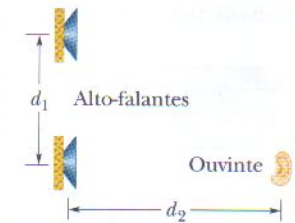


FIG. 17-36 Problema 19.

Considere toda a faixa de audição de um ser humano normal,  $20 \text{ Hz}$  a  $20 \text{ kHz}$ . (a) Qual é a menor frequência,  $f_{\text{mín},1}$ , para a qual a intensidade do som é mínima (interferência destrutiva) na posição do ouvinte? Por que número a frequência  $f_{\text{mín},1}$  deve ser multiplicada para se obter (b) a segunda menor frequência,  $f_{\text{mín},2}$ , para a qual a intensidade do som é mínima, e (c) a terceira menor frequência,  $f_{\text{mín},3}$ , para a qual a intensidade do som é mínima? (d) Qual é a menor frequência,  $f_{\text{máx},1}$ , para a qual a intensidade do som é máxima (interferência construtiva) na posição do ouvinte? Por qual número  $f_{\text{máx},1}$  deve ser multiplicada para se obter (e) a segunda menor frequência,  $f_{\text{máx},2}$ , para a qual a intensidade do som é máxima, e (c) a terceira menor frequência,  $f_{\text{máx},3}$ , para a qual a intensidade do som é máxima?

••20 Na Fig. 17-37 as ondas sonoras A e B, de mesmo comprimento de onda  $\lambda$ , estão inicialmente em fase e se propagam para a direita, como indicam os dois raios. A onda A é refletida por quatro superfícies, mas volta a se propagar na direção e no sentido original. O mesmo acontece com a onda B, mas depois de ser refletida por apenas duas superfícies. Suponha que a distância  $L$  da figura é um múltiplo do comprimento de onda  $\lambda$ :  $L = q\lambda$ . Qual é (a) o menor e (b) o segundo menor valor de  $q$  para o qual A e B estão em oposição de fase após as reflexões?

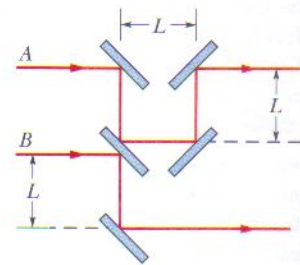


FIG. 17-37 Problema 20.

••21 Dois alto-falantes estão separados por uma distância de  $3,35 \text{ m}$  em um palco ao ar livre. Um ouvinte está a  $18,3 \text{ m}$  de um dos alto-falantes e a  $19,5 \text{ m}$  do outro. Durante o teste do som um gerador de sinais alimenta os dois alto-falantes em fase com um sinal de mesma amplitude e frequência. A frequência transmitida varia ao longo de toda a faixa audível ( $20 \text{ Hz}$  a  $20 \text{ kHz}$ ). (a) Qual é menor frequência,  $f_{\text{mín},1}$ , para a qual a intensidade do sinal é mínima (interferência destrutiva) na posição do ouvinte? Por que número  $f_{\text{mín},1}$  deve ser multiplicada para se obter (b) a segunda menor frequência,  $f_{\text{mín},2}$ , para a qual o sinal é mínimo, e (c) a terceira menor frequência,  $f_{\text{mín},3}$ , para a qual o sinal é mínimo? (d) Qual é menor frequência,  $f_{\text{máx},1}$ , para a qual o sinal é máximo (interferência construtiva) na posição do ouvinte? Por que número  $f_{\text{máx},1}$  deve ser multiplicada para se obter (e) a segunda menor frequência,  $f_{\text{máx},2}$  para a qual o sinal é máximo, e (c) a terceira menor frequência,  $f_{\text{máx},3}$  para a qual o sinal é máximo?

••22 A Fig. 17-38 mostra quatro fontes sonoras pontuais isotrópicas uniformemente espaçadas ao longo de um eixo  $x$ . As fontes emitem sons de mesmo comprimento de onda  $\lambda$  e mesma amplitude  $s_m$ , e estão em fase. Um ponto  $P$  é mostrado sobre o eixo  $x$ . Suponha que quando as ondas se propagam até  $P$  a amplitude se mantém praticamente constante. Que múltiplo de  $s_m$  corresponde à amplitude da onda resultante em  $P$  se a distância  $d$  mostrada na figura é (a)  $\lambda/4$ , (b)  $\lambda/2$  e (c)  $\lambda$ ?

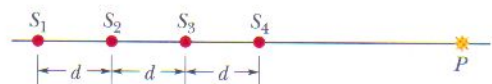


FIG. 17-38 Problema 22.

••23 A Fig. 17-39 mostra duas fontes pontuais  $S_1$  e  $S_2$  que emitem sons de comprimento de onda  $\lambda = 2,00 \text{ m}$ . As emissões são isotrópicas e em fase; a distância entre as fontes é  $d = 16,0 \text{ m}$ . Em qualquer ponto  $P$  sobre o eixo  $x$  as ondas produzidas por  $S_1$  e  $S_2$  interferem. Se  $P$  está muito distante ( $x \approx \infty$ ), qual é (a) a diferença de fase entre as ondas produzidas por  $S_1$  e  $S_2$  e (b) o tipo de interferência que elas produzem? Suponha que o ponto  $P$  é deslocado ao longo do eixo  $x$  em direção a  $S_1$ . (c) A diferença de fase entre as ondas aumenta ou diminui? A que distância  $x$  da origem as ondas possuem uma diferença de fase de (d)  $0,50\lambda$ , (e)  $1,00\lambda$  e (f)  $1,50\lambda$ ?

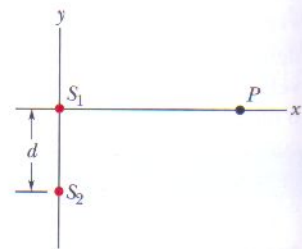


FIG. 17-39 Problema 23.

**seção 17-6 Intensidade e Nível Sonoro**

•24 Uma fonte pontual de 1,0 W emite ondas sonoras isotropicamente. Supondo que a energia da onda é conservada, determine a intensidade (a) a 1,0 m e (b) a 2,5 m da fonte.

•25 Uma fonte emite ondas sonoras isotropicamente. A intensidade das ondas a 2,50 m da fonte é  $1,91 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ . Supondo que a energia da onda é conservada, determine a potência da fonte.

•26 A diferença entre os níveis sonoros de dois sons é 1,00 dB. Qual é a razão entre a intensidade maior e a intensidade menor?

•27 Uma onda sonora com uma frequência de 300 Hz tem uma intensidade de  $1,00 \mu\text{W/m}^2$ . Qual é a amplitude das oscilações do ar causadas por esta onda?

•28 A fonte de uma onda sonora tem uma potência de  $1,00 \mu\text{W}$ . Se ela é uma fonte pontual, (a) qual é a intensidade a 3,00 m de distância e (b) qual é o nível sonoro em decibéis a essa distância?

•29 O nível sonoro de uma certa fonte sonora é aumentado em 30,0 dB. Por que fator é multiplicada (a) a intensidade do som e (b) a amplitude da pressão do ar?

•30 Uma discussão começa acalorada, com um nível sonoro de 70 dB, mas o nível cai para 50 dB quando os interlocutores se acalmam. Supondo que a frequência do som é 500 Hz, determine a intensidade (a) inicial e (b) final e a amplitude (c) inicial e (d) final das ondas sonoras.

•31 O macho da rã-touro, *Rana catesbeiana*, é conhecido pelos ruidosos gritos de acasalamento. O som não é emitido pela boca da rã, mas pelos tímpanos. Surpreendentemente, o mecanismo nada tem a ver com o papo inflado da rã. Se o som emitido possui uma frequência de 260 Hz e um nível sonoro de 85 dB (perto dos tímpanos), qual é a amplitude da oscilação dos tímpanos? A massa específica do ar é  $1,21 \text{ kg/m}^3$ .

•32 Os ouvidos de aproximadamente um terço das pessoas com audição normal emitem continuamente um som de baixa intensidade através do canal auditivo. Uma pessoa com essa *emissão otoacústica espontânea* raramente tem consciência do som, exceto talvez em um ambiente extremamente silencioso, mas às vezes a emissão é suficientemente intensa para ser percebida por outra pessoa. Em uma observação, a onda sonora tinha uma frequência de 1665 Hz e uma amplitude de pressão de  $1,13 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ . Quais eram (a) a amplitude dos deslocamentos e (b) a intensidade da onda emitida pelo ouvido?

•33 Ao “estalar” uma junta você alarga bruscamente a cavidade da articulação, aumentando o volume disponível para o fluido sinovial em seu interior e causando o aparecimento súbito de uma bolha de ar no fluido. A produção súbita da bolha, chamada de “cavitação”, produz um pulso sonoro: o som do estalo. Suponha que o som é transmitido uniformemente em todas as direções e que passa completamente do interior da articulação para o exterior. Se o pulso tem um nível sonoro de 62 dB no seu ouvido, estime a taxa com a qual a energia é produzida pela cavitação.

•34 *Conversas em festas.* Quanto maior o número de pessoas presentes em uma festa mais você precisa levantar a voz para ser ouvido, por causa do *ruído de fundo* dos outros participantes. Entretanto, depois que você está gritando a plenos pulmões a única forma de se fazer ouvir é aproximar-se do interlocutor, invadindo seu “espaço pessoal”. Modele a situação substituindo a pessoa que está falando por uma fonte sonora isotrópica de potência

fixa  $P$  e o ouvinte por um ponto  $Q$  que absorve parte das ondas sonoras. Os pontos  $P$  e  $Q$  estão separados inicialmente por uma distância  $r_i = 1,20 \text{ m}$ . Se o ruído de fundo aumenta de  $\Delta\beta = 5 \text{ dB}$ , o nível do som na posição do ouvinte também deve aumentar. Qual é a nova distância  $r_f$  necessária para que a conversa possa prosseguir?

•35 Uma fonte pontual emite 30,0 W de som isotropicamente. Um pequeno microfone intercepta o som em uma área de  $0,750 \text{ cm}^2$ , a 200 m de distância da fonte. Calcule (a) a intensidade sonora nessa posição e (b) a potência interceptada pelo microfone.

•36 Duas fontes sonoras  $A$  e  $B$  na atmosfera emitem isotropicamente com potência constante. Os níveis sonoros  $\beta$  das emissões estão plotados na Fig. 17-40 em função da distância  $r$  das fontes. A escala do eixo vertical é definida por  $\beta_1 = 85,0 \text{ dB}$  e  $\beta_2 = 65,0 \text{ dB}$ . Para  $r = 10 \text{ m}$ , determine (a) a razão entre a maior e a menor potência e (b) a diferença entre os níveis sonoros das emissões.

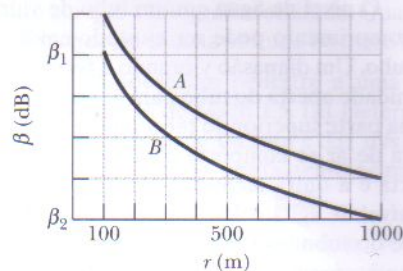


FIG. 17-40 Problema 36.

•37 Uma fonte produz uma onda sonora senoidal de frequência angular  $3000 \text{ rad/s}$  e amplitude  $12,0 \text{ nm}$  em um tubo com ar. O raio interno do tubo é  $2,00 \text{ cm}$ . (a) Qual é a taxa média com a qual a energia (soma das energias cinética e potencial) é transportada para a extremidade oposta do tubo? (b) Se, ao mesmo tempo, uma onda igual se propaga em um tubo vizinho idêntico, qual é a taxa média total com a qual a energia é transportada pelas ondas para a extremidade oposta dos tubos? Se, em vez disso, essas duas ondas são produzidas simultaneamente no *mesmo* tubo, qual é a taxa média total com que a energia é transportada quando a diferença de fase entre as ondas é (c) 0, (d)  $0,40\pi \text{ rad}$  e (e)  $\pi \text{ rad}$ ?

**seção 17-7 Fontes de Sons Musicais**

•38 A crista do crânio de um dinossauro *Parasaurolophus* continha uma passagem nasal na forma de um tubo longo e arqueado aberto nas duas extremidades. O dinossauro pode ter usado a passagem para produzir sons no modo fundamental do tubo. (a) Se a passagem nasal de um certo fóssil de *Parasaurolophus* tem 2,0 m de comprimento, que frequência era produzida? (b) Se esse dinossauro pudesse ser clonado (como em *Jurassic Park*), uma pessoa com uma capacidade auditiva na faixa de 60 Hz a 20 kHz poderia ouvir esse modo fundamental? O som seria de alta ou de baixa frequência? Crânios fósseis com passagens nasais mais curtas são atribuídos a *Parasaurolophus* fêmeas. (c) Isso torna a frequência fundamental da fêmea maior ou menor que a do macho?

•39 Uma corda de violino com 15,0 cm de comprimento e as duas extremidades fixas oscila no modo  $n = 1$ . A velocidade das ondas na corda é 250 m/s e a velocidade do som no ar é 348 m/s. Quais são (a) a frequência e (b) o comprimento de onda da onda sonora emitida?

•40 Uma onda sonora que se propaga em um meio fluido é refletida em uma barreira, o que leva à formação de uma onda esta-

cionária. A distância entre nós é 3,8 cm e a velocidade de propagação é 1500 m/s. Determine a frequência da onda sonora.

•41 No tubo *A*, a razão entre a frequência de um certo harmônico e a frequência do harmônico precedente é 1,2. No tubo *B*, a razão entre a frequência de um certo harmônico e a frequência do harmônico precedente é 1,4. Quantas extremidades abertas existem (a) no tubo *A* e (b) no tubo *B*?

•42 O tubo de órgão *A*, com as duas extremidades abertas, tem uma frequência fundamental de 300 Hz. O terceiro harmônico do tubo de órgão *B*, com uma extremidade aberta, tem a mesma frequência que o segundo harmônico do tubo *A*. Qual é o comprimento (a) do tubo *A* e (b) do tubo *B*?

•43 (a) Determine a velocidade das ondas em uma corda de violino de massa 800 mg e comprimento 22,0 cm se a frequência fundamental é 920 Hz. (b) Qual é a tensão da corda? Para o modo fundamental, qual é o comprimento de onda (c) das ondas na corda e (d) das ondas sonoras emitidas pela corda?

•44 O nível de água em um tubo de vidro vertical com 1,00 m de comprimento pode ser ajustado em qualquer posição dentro do tubo. Um diapasão vibrando a 686 Hz é mantido acima da extremidade aberta do tubo para gerar uma onda sonora estacionária na parte superior do tubo, onde existe ar. (Essa parte superior cheia de ar se comporta como um tubo com uma extremidade aberta e a outra fechada.) (a) Para quantas posições diferentes do nível de água o som do diapasão produz uma ressonância na parte do tubo cheia de ar? Quais são (b) a menor altura e (c) a segunda menor altura da água no tubo para as qual ocorre ressonância?

•45 Na Fig. 17-41, *S* é um pequeno alto-falante alimentado por um oscilador de áudio com uma frequência que varia de 1000 Hz a 2000 Hz, e *D* é um tubo cilíndrico com 45,7 cm de comprimento e as duas extremidades abertas. A velocidade do som no ar do interior do tubo é 344 m/s. (a) Para quantas frequências o som do alto-falante produz ressonância no tubo? Quais são (b) a menor e (c) a segunda menor frequência de ressonância?

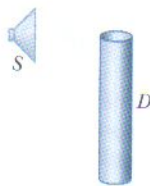


FIG. 17-41 Problema 45.

•46 Uma das frequências harmônicas do tubo *A*, que possui as duas extremidades abertas, é 325 Hz. A frequência harmônica seguinte é 390 Hz. (a) Qual é a frequência harmônica que se segue à frequência harmônica de 195 Hz? (b) Qual é o número desse harmônico?

Uma das frequências harmônicas do tubo *B*, com apenas uma das extremidades aberta, é 1080 Hz. A frequência harmônica seguinte é 1320 Hz. (c) Qual é a frequência harmônica que se segue à frequência harmônica de 600 Hz? (d) Qual é o número desse harmônico?

•47 Uma corda de violino de 30,0 cm de comprimento com uma massa específica linear de 0,650 g/m é colocada perto de um alto-falante alimentado por um oscilador de áudio de frequência variável. Observa-se que a corda entra em oscilação apenas nas frequências de 880 Hz e 1320 Hz, quando a frequência do oscilador de áudio varia no intervalo de 500 a 1500 Hz. Qual é a tensão da corda?

•48 Um tubo com 1,20 m de comprimento é fechado em uma extremidade. Uma corda esticada é colocada perto da extremidade aberta. A corda tem 0,330 m de comprimento e 9,60 g de massa, está fixa nas duas extremidades e oscila no modo fundamental. Devido à ressonância, ela faz a coluna de ar no tubo os-

cular na sua frequência fundamental. Determine (a) a frequência fundamental da coluna de ar e (b) a tensão da corda.

•49 Um poço com paredes verticais e água no fundo ressoa em 7,00 Hz e em nenhuma outra frequência mais baixa. (A parte do poço cheia de ar se comporta como um tubo com uma extremidade fechada e outra aberta.) O ar no interior do poço tem uma massa específica de 1,10 kg/m<sup>3</sup> e um módulo de elasticidade volumétrico de 1,33 × 10<sup>5</sup> Pa. A que profundidade está a superfície da água?

•50 O tubo *A*, que tem 1,20 m de comprimento e as duas extremidades abertas, oscila na terceira frequência harmônica. Está cheio de ar, para o qual a velocidade do som é 343 m/s. O tubo *B*, com uma das extremidades fechada, oscila na segunda frequência harmônica. A frequência de oscilação de *B* coincide com a de *A*. Um eixo *x* coincide com o eixo do tubo *B*, com *x* = 0 na extremidade fechada. (a) Quantos nós existem no eixo *x*? Quais são (b) o menor e (c) o segundo menor valor da coordenada *x* desses nós? (d) Qual é a frequência fundamental do tubo *B*?

### seção 17-8 Batimentos

•51 A corda lá de um violino está esticada demais. São ouvidos 4,00 batimentos por segundo quando a corda é tocada junto com um diapasão que oscila exatamente na frequência do lá de concerto (440 Hz). Qual é o período de oscilação da corda do violino?

•52 Um diapasão de frequência desconhecida produz 3,00 batimentos com um segundo diapasão-padrão com frequência de 384 Hz. A frequência de batimento diminui quando um pequeno pedaço de cera é colocado em um dos braços do primeiro diapasão. Qual é a frequência desse diapasão?

•53 Duas cordas de piano iguais têm uma frequência fundamental de 600 Hz quando são submetidas a uma mesma tensão. Que aumento relativo da tensão de uma das cordas faz com que haja 6,0 batimentos por segundo quando as duas cordas oscilam simultaneamente?

•54 Cinco diapasões oscilam com frequências próximas, mas diferentes. Quais são os números (a) máximo e (b) mínimo de frequências de batimento diferentes que podem ser produzidas tocando os diapasões aos pares, dependendo da diferença entre as frequências?

### seção 17-9 O Efeito Doppler

•55 Um guarda rodoviário persegue um carro que excedeu o limite de velocidade em um trecho reto de uma rodovia; os dois carros estão a 160 km/h. A sirene do carro de polícia produz um som com uma frequência de 500 Hz. Qual é o deslocamento Doppler da frequência ouvida pelo motorista infrator?

•56 Uma ambulância cuja sirene emite um som com uma frequência de 1600 Hz passa por um ciclista que está a 2,44 m/s. Depois de ser ultrapassado, o ciclista escuta uma frequência de 1590 Hz. Qual é a velocidade da ambulância?

•57 Um apito de 540 Hz se move em uma circunferência com 60,0 cm de raio com uma velocidade angular de 15,0 rad/s. Quais são as frequências (a) mais baixa e (b) mais alta escutadas por um ouvinte distante, em repouso em relação ao centro da circunferência?

•58 Um detector de movimento estacionário envia ondas sonoras de 0,150 MHz em direção a um caminhão que se aproxima com uma velocidade de 45,0 m/s. Qual é a frequência das ondas refletidas de volta para o detector?

••59 Um alarme acústico contra roubo utiliza uma fonte que emite ondas com uma frequência de 28,0 kHz. Qual é a frequência de batimento entre as ondas da fonte e as ondas refletidas em um intruso que caminha com uma velocidade média de 0,950 m/s afastando-se em linha reta do alarme?

••60 Uma fonte sonora *A* e uma superfície refletora *B* se movem uma em direção à outra. Em relação ao ar, a velocidade da fonte *A* é 29,9 m/s, a velocidade da superfície *B* é 65,8 m/s e a velocidade do som é 329 m/s. A fonte emite ondas com uma frequência de 1200 Hz no referencial da fonte. No referencial do refletor, quais são (a) a frequência e (b) o comprimento de onda das ondas sonoras? No referencial da fonte, quais são (c) a frequência e (d) o comprimento de onda das ondas sonoras refletidas de volta para a fonte?

••61 Na Fig. 17-42, um submarino francês e um submarino americano se movem um em direção ao outro durante manobras em águas paradas no Atlântico Norte. O submarino francês se move com velocidade  $v_F = 50,0$  km/h e o submarino americano com velocidade  $v_A = 70,0$  km/h. O submarino francês envia um sinal de sonar (onda sonora na água) de  $1,000 \times 10^3$  Hz. As ondas de sonar se propagam a 5470 km/h. (a) Qual é a frequência do sinal detectado pelo submarino americano? (b) Qual é a frequência do eco do submarino americano detectado pelo submarino francês?



FIG. 17-42 Problema 61.

••62 Um detector estacionário mede a frequência de uma fonte sonora que se aproxima em linha reta, passa pelo detector e se afasta, mantendo a velocidade constante. A frequência emitida pela fonte é *f*. A frequência detectada durante a aproximação é  $f'_{ap}$  e a frequência detectada durante o afastamento é  $f'_{af}$ . Se  $(f'_{ap} - f'_{af})/f = 0,500$ , qual é a razão  $v_D/v$  entre a velocidade da fonte e a velocidade do som?

••63 Um morcego está voando em uma caverna, orientando-se através de pulsos ultra-sônicos. A frequência dos sons emitidos pelo morcego é 39 000 Hz. O morcego se aproxima de uma parede plana da caverna com uma velocidade igual a 0,025 vez a velocidade do som no ar. Qual é a frequência com que o morcego ouve os sons refletidos pela parede da caverna?

••64 A Fig. 17-43 mostra quatro tubos de 1,0 m ou 2,0 m de comprimento e com uma ou as duas extremidades abertas. O terceiro harmônico é produzido em cada tubo, e



FIG. 17-43 Problema 64.

parte do som que escapa é captada pelo detector *D*, que se afasta dos tubos em linha reta. Em termos da velocidade do som *v*, que velocidade deve ter o detector para que a frequência do som proveniente (a) do tubo 1, (b) do tubo 2, (c) do tubo 3 e (d) do tubo 4 seja igual à frequência fundamental do tubo?

••65 Uma menina está sentada perto da janela aberta de um trem que viaja para leste com uma velocidade de 10,00 m/s. O tio da menina está parado na plataforma e observa o trem se afastar. O apito da locomotiva produz um som com uma frequência de

500,0 Hz. O ar está parado. (a) Que frequência o tio ouve? (b) Que frequência a menina ouve? (c) Um vento vindo do leste começa a soprar a 10,00 m/s. (c) Que frequência o tio passa a ouvir? (d) Que frequência a menina passa a ouvir?

••66 Dois trens viajam um em direção ao outro a 30,5 m/s em relação ao solo. Um dos trens faz soar um apito de 500 Hz. (a) Que frequência é ouvida no outro trem se o ar está parado? (b) Que frequência é ouvida no outro trem se o vento está soprando a 30,5 m/s no sentido contrário ao do trem que apitou? (c) Que frequência é ouvida se o sentido do vento se inverte?

••67 Uma sirene de 2000 Hz e um funcionário da defesa civil estão em repouso em relação ao solo. Que frequência o funcionário ouve se o vento está soprando a 12 m/s (a) da fonte para o funcionário e (b) do funcionário para a fonte?

seção 17-10 Velocidades Supersônicas, Ondas de Choque

•68 A onda de choque produzida pelo avião da Fig. 17-24 tinha um ângulo de aproximadamente 60°. O avião estava se movendo a 1350 km/h no momento em que a fotografia foi tirada. Qual era, aproximadamente, a velocidade do som na altitude do avião?

••69 Um avião a jato passa sobre um pedestre a uma altitude de 5000 m e a uma velocidade de Mach 1,5. (a) Determine o ângulo do cone de Mach (a velocidade do som é 331 m/s). (b) Quanto tempo após o avião ter passado diretamente acima do pedestre ele é atingido pela onda de choque?

••70 Um avião voa a 1,25 vez a velocidade do som. Seu estrondo sônico atinge um homem no solo 1,00 min depois de o avião ter passado exatamente por cima dele. Qual é a altitude do avião? Suponha que a velocidade do som é 330 m/s.

Problemas Adicionais

71 Na Fig. 17-44, um som de comprimento de onda 0,850 m é emitido isotropicamente por uma fonte pontual *S*. O raio de som 1 se propaga diretamente para o detector *D*, situado a uma distância  $L = 10,0$  m. O raio de som 2 chega a *D* após ser refletido em uma superfície plana. Essa reflexão ocorre sobre a mediatriz do segmento de reta *SD*, a uma distância *d* do raio 1. Suponha que a reflexão desloca a fase da onda sonora de  $0,500\lambda$ . Qual é o menor valor de *d* (diferente de zero) para o qual o som direto e o som refletido chegam a *D* (a) em oposição de fase e (b) em fase?

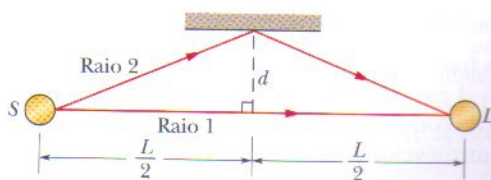


FIG. 17-44 Problema 71.

72 Um detector se aproxima em linha reta de uma fonte sonora estacionária, passa pela fonte e se afasta, mantendo a velocidade constante. A frequência emitida pela fonte é *f*. A frequência detectada durante a aproximação é  $f'_{ap}$  e a frequência detectada durante o afastamento é  $f'_{af}$ . Se  $(f'_{ap} - f'_{af})/f = 0,500$ , qual é a razão  $v_D/v$  entre a velocidade do detector e a velocidade do som?

73 Duas ondas sonoras com uma amplitude de 12 nm e um comprimento de onda de 35 cm se propagam no mesmo sentido em um tubo longo, com uma diferença de fase de  $\pi/3$  rad. Quais são (a) a amplitude e (b) o comprimento de onda da onda sonora que resulta da interferência das duas ondas? Se, em vez disso, as ondas sonoras se propagam em sentidos opostos no tubo, quais

são (c) a amplitude e (d) o comprimento de onda da onda resultante?

**74** Uma onda sonora senoidal se propaga a 343 m/s no ar no sentido positivo de um eixo  $x$ . Em um certo instante, a molécula  $A$  do ar está em seu deslocamento máximo no sentido negativo do eixo, enquanto a molécula  $B$  do ar está em sua posição de equilíbrio. A distância entre as duas moléculas é 15,0 cm e as moléculas entre  $A$  e  $B$  possuem deslocamentos intermediários no sentido negativo do eixo. (a) Qual é a frequência da onda sonora?

Em um arranjo semelhante, para uma onda sonora senoidal diferente, a molécula  $C$  do ar está em seu máximo deslocamento no sentido positivo do eixo, enquanto a molécula  $D$  do ar está em seu máximo deslocamento no sentido negativo. A distância entre essas moléculas é 15,0 cm e as moléculas entre  $C$  e  $D$  possuem deslocamentos intermediários. (b) Qual é a frequência da onda sonora?

**75** Na Fig. 17-45, as ondas sonoras  $A$  e  $B$ , de mesmo comprimento de onda  $\lambda$ , estão inicialmente em fase e se propagam para a direita, como indicam os dois raios. A onda  $A$  é refletida por quatro superfícies, mas volta a se propagar na direção e no sentido original. Que múltiplo do comprimento de onda  $\lambda$  é o menor valor da distância  $L$  da figura para o qual  $A$  e  $B$  estão em oposição de fase após as reflexões?

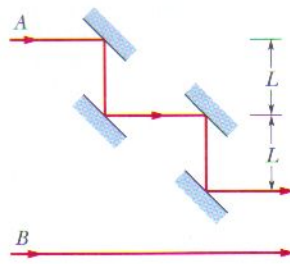


FIG. 17-45 Problema 75.

**76** Um trompetista em um vagão de trem em movimento se aproxima de segundo trompetista ao lado dos trilhos enquanto ambos tocam uma nota de 440 Hz. As ondas sonoras ouvidas por um observador estacionário entre os dois trompetistas têm uma frequência de batimento de 4,0 batimentos/s. Qual é a velocidade do vagão?

**77** Uma sirene que emite um som com uma frequência de 1000 Hz se afasta de você em direção a um rochedo com uma velocidade de 10 m/s. Considere a velocidade do som no ar como 330 m/s. (a) Qual é a frequência do som que você escuta vindo diretamente da sirene? (b) Qual é a frequência do som que você escuta refletido do rochedo? (c) Qual é a frequência de batimento entre os dois sons? Ela é perceptível (menor que 20 Hz)?

**78** Uma fonte sonora se move ao longo de um eixo  $x$ , entre os detectores  $A$  e  $B$ . O comprimento de onda do som detectado por  $A$  é 0,500 do comprimento do som detectado por  $B$ . Qual é a razão  $v_s/v$  entre a velocidade da fonte e a velocidade do som?

**79** Um sistema de alto-falantes emite sons isotropicamente com uma frequência de 2000 Hz e uma intensidade de 0,960 mW/m<sup>2</sup> a uma distância de 6,10 m. Suponha que não existem reflexões. (a) Qual é a intensidade a 30,0 m? A 6,10 m, quais são (b) a amplitude do deslocamento e (c) a amplitude de pressão do som?

**80** Em um certo ponto, duas ondas produzem variações de pressão dadas por  $\Delta p_1 = \Delta p_m \sin \omega t$  e  $\Delta p_2 = \Delta p_m \sin (\omega t - \phi)$ . Nesse ponto, qual é a razão  $\Delta p_r / \Delta p_m$ , onde  $\Delta p_r$  é a amplitude da pressão da onda resultante, se  $\phi$  é igual a (a) 0, (b)  $\pi/2$ , (c)  $\pi/3$  e (d)  $\pi/4$ ?

**81** A intensidade do som é 0,0080 W/m<sup>2</sup> a uma distância de 10 m de uma fonte sonora pontual isotrópica. (a) Qual é a potência da fonte? (b) Qual é a intensidade sonora a 5,0 m da fonte? (c) Qual é o nível sonoro a 10 m da fonte?

**82** A massa específica média da crosta da Terra 10 km abaixo dos continentes é 2,7 g/cm<sup>3</sup>. A velocidade de ondas sísmicas a essa profundidade, calculada a partir do tempo de percurso das ondas produzida por terremotos distantes, é 5,4 km/s. Use essa informação para determinar o módulo de elasticidade volumétrico da crosta terrestre a essa profundidade. Para fins de comparação, o módulo de elasticidade volumétrico do aço é aproximadamente  $16 \times 10^{10}$  Pa.

**83** Dois diapasões iguais oscilam a 440 Hz. Uma pessoa está situada em algum ponto da reta que liga os dois diapasões. Calcule a frequência de batimento ouvida por essa pessoa se (a) ela estiver parada e os dois diapasões se moverem no mesmo sentido ao longo da reta a 3,00 m/s e (b) os diapasões estiverem parados e o ouvinte se mover ao longo da reta a 3,00 m/s.

**84** É possível estimar a distância de um relâmpago contando o número de segundos que separam o clarão do trovão. Por que número inteiro é preciso dividir o número de segundos para obter a distância em quilômetros?

**85** (a) Se duas ondas sonoras, uma no ar e uma na água doce, têm a mesma frequência e a mesma intensidade, qual é a razão entre a amplitude da pressão da onda na água e a amplitude da pressão da onda no ar? Suponha que a água e o ar estão a 20°C. (Veja a Tabela 14-1.) (b) Se, em vez de terem a mesma intensidade, as ondas têm a mesma amplitude de pressão, qual é a razão entre as intensidades?

**86** Encontre a razão (entre a maior e a menor) (a) das intensidades, (b) das amplitudes de pressão e (c) das amplitudes dos deslocamentos das partículas para dois sons cujos níveis sonoros diferem de 37 dB.

**87** A Fig. 17-46 mostra um interferômetro acústico, usado para demonstrar a interferência de ondas sonoras. A fonte sonora  $F$  é um diafragma oscilante;  $D$  é um detector de ondas sonoras, como o ouvido ou um microfone; o tubo contém ar. O comprimento do tubo  $FBD$  pode variar, mas o do tubo  $FAD$  é fixo. Em  $D$ , a onda sonora que se propaga no tubo  $FBD$  interfere com a que se propaga no tubo  $FAD$ . Em um experimento, a intensidade sonora no detector  $D$  possui um valor mínimo de 100 unidades para uma certa posição do braço móvel e aumenta continuamente até um valor máximo de 900 unidades quando o braço é deslocado de 1,65 cm. Determine (a) a frequência do som emitido pela fonte e (b) a razão entre as amplitudes no ponto  $D$  da onda  $FAD$  e da onda  $FBD$ . (c) Como é possível que essas ondas tenham amplitudes diferentes, já que foram geradas pela mesma fonte?

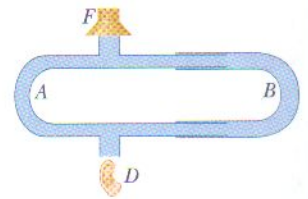


FIG. 17-46 Problema 87.

**88** Uma bala é disparada com uma velocidade de 685 m/s. Determine o ângulo entre o cone de choque e a trajetória da bala.

**89** O som produzido pelos cachalotes (Fig. 17-47a) lembra uma série de cliques. Na verdade, a baleia produz apenas um som na frente da cabeça para iniciar a série. Parte desse som passa para a água e se torna o primeiro clique da série. O restante do som se propaga para trás, atravessa o saco de espermacete (um depósito de gordura), é refletido no saco frontal (uma camada de ar) e passa novamente pelo saco de espermacete. Quando chega ao saco distal (outra camada de ar), na frente da cabeça, parte desse som escapa para a água para formar o segundo clique, enquanto o restante é refletido de volta para o saco de espermacete (e acaba formando outros cliques).

A Fig. 17-47b mostra o registro de uma série de cliques detectados por um hidrofone. O intervalo de tempo correspondente a 1 ms está indicado no gráfico. Supondo que a velocidade do som no saco de espermacete é 1372 m/s, determine o comprimento do saco de espermacete. Usando cálculos desse tipo, os cientistas marinhos estimam o comprimento de uma baleia a partir dos cliques que produz.

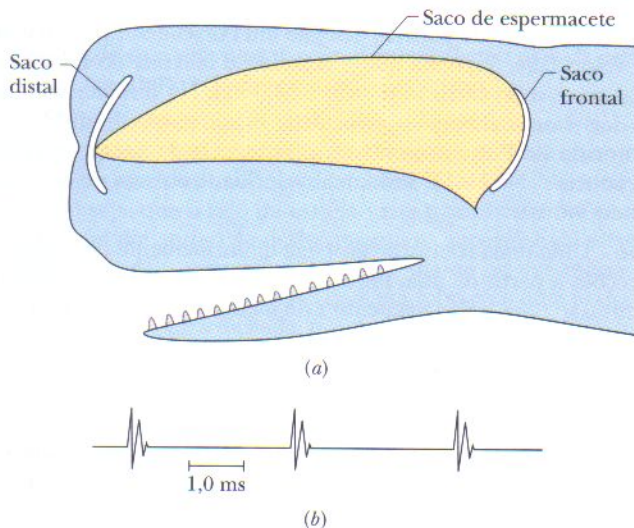


FIG. 17-47 Problema 89.

**90** Uma onda longitudinal senoidal contínua é produzida em uma mola espiral muito longa por uma fonte presa à mola. A onda se propaga no sentido negativo de um eixo  $x$ ; a frequência da fonte é 25 Hz; em qualquer instante, a distância entre pontos sucessivos de distensão máxima da mola é igual a 24 cm; o deslocamento longitudinal máximo de uma partícula da mola é 0,30 cm; a partícula situada em  $x = 0$  possui deslocamento nulo no instante  $t = 0$ . Se a onda é escrita na forma  $s(x, t) = s_m \cos(kx \pm \omega t)$ , determine (a)  $s_m$ , (b)  $k$ , (c)  $\omega$ , (d) a velocidade da onda e (e) o sinal que precede  $\omega$ .

**91** A uma distância de 10 km, uma corneta de 100 Hz, considerada uma fonte pontual isotrópica, mal pode ser ouvida. A que distância começa a causar dor?

**92** A velocidade do som em um certo metal é  $v_m$ . Uma das extremidades de um tubo longo feito com esse metal, de comprimento  $L$ , recebe uma pancada. Uma pessoa na outra extremidade ouve dois sons, um associado à onda que se propaga na parede do tubo e o outro associado à onda que se propaga no ar do interior do tubo. (a) Se  $v$  é a velocidade do som no ar, qual é o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre as chegadas dos dois sons ao ouvido da pessoa? (b) Se  $\Delta t = 1,00$  s e o metal é o aço, qual é o comprimento  $L$ ?

**93** Um tubo de 0,60 m de comprimento, fechado em uma extremidade, está cheio de um gás desconhecido. A frequência do terceiro harmônico do tubo é 750 Hz. (a) Qual é a velocidade do som no gás desconhecido? (b) Qual é a frequência fundamental do tubo quando está cheio do gás desconhecido?

**94** Quatro ondas sonoras são produzidas no mesmo tubo cheio de ar, no mesmo sentido:

$$s_1(x, t) = (9,00 \text{ nm}) \cos(2\pi x - 700\pi t)$$

$$s_2(x, t) = (9,00 \text{ nm}) \cos(2\pi x - 700\pi t + 0,7\pi)$$

$$s_3(x, t) = (9,00 \text{ nm}) \cos(2\pi x - 700\pi t + \pi)$$

$$s_4(x, t) = (9,00 \text{ nm}) \cos(2\pi x - 700\pi t + 1,7\pi)$$

Qual é a amplitude da onda resultante? (Sugestão: Use um diagrama fasorial para simplificar o problema.)

**95** Um segmento de reta  $AB$  liga duas fontes pontuais, separadas por uma distância de 5,00 m, que emitem ondas sonoras de 300 Hz de mesma amplitude e fases opostas. (a) Qual é a menor distância entre o ponto médio de  $AB$  e um ponto sobre  $AB$  no qual a interferência das ondas provoca a maior oscilação possível das moléculas de ar? Quais são (b) a segunda e (c) a terceira menor distância?

**96** Uma fonte pontual que está parada em um eixo  $x$  emite uma onda sonora senoidal com uma frequência de 686 Hz e uma velocidade de 343 m/s. A onda se propaga radialmente, fazendo as moléculas de ar oscilarem para perto e para longe da fonte. Defina uma frente de onda como uma linha que liga os pontos nos quais as moléculas de ar possuem o deslocamento máximo para fora na direção radial. Em qualquer instante, as frentes de onda são circunferências concêntricas com o centro na fonte. (a) Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre frentes de onda vizinhas? A fonte passa a ser mover ao longo do eixo  $x$  com uma velocidade de 110 m/s. Qual é a distância, ao longo do eixo  $x$ , entre as frentes de onda (b) na frente e (c) atrás da fonte?

**97** Você está parado a uma distância  $D$  de uma fonte sonora pontual isotrópica, caminha 50,0 m em direção à fonte e observa que a intensidade do som dobrou. Calcule a distância  $D$ .

**98** Em 10 de julho de 1996, um bloco de granito se despreendeu de uma montanha no vale de Yosemite e, depois de deslizar pela encosta, foi lançado em uma trajetória balística. As ondas sísmicas produzidas pelo choque do bloco com o solo foram registradas por sismógrafos a mais de 200 km de distância. Medições posteriores mostraram que o bloco tinha uma massa entre  $7,3 \times 10^7$  kg e  $1,7 \times 10^8$  kg e que ele caiu a uma distância vertical de 500 m e a uma distância horizontal de 30 m do ponto de onde foi lançado. (O ângulo de lançamento não é conhecido.) (a) Estime a energia cinética do bloco imediatamente antes do choque com o solo.

Suponha que tipos de ondas sísmicas foram produzidos no solo pelo impacto: uma *onda volumétrica*, com a forma de um hemisfério de raio crescente, e uma *onda superficial*, com a forma de um cilindro curto (Fig. 17-48). Suponha que o choque durou 0,50 s, que o cilindro tinha uma altura  $d$  de 5,0 m e que cada tipo de onda recebeu 20% da energia que o bloco possuía imediatamente antes do impacto. Desprezando a energia mecânica perdida pelas ondas durante a propagação, determine a intensidade (b) da onda volumétrica e (c) da onda superficial quando chegaram a um sismógrafo situado a 200 km de distância. (d) Com base nesses resultados, qual das duas ondas pode ser detectada com mais facilidade por um sismógrafo distante?

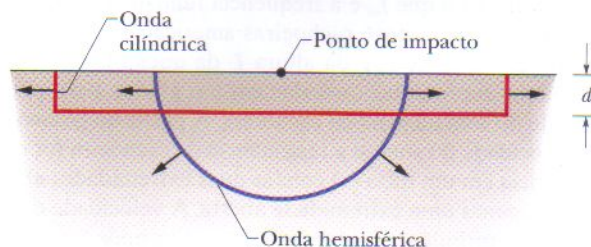


FIG. 17-48 Problema 98.

**99** Uma avalanche de areia em um tipo raro de duna pode produzir um estrondo suficientemente intenso para ser ouvido a 10 km de distância. O estrondo aparentemente é causado pela osci-

lação de uma camada deslizante de areia; a espessura da camada aumenta e diminui periodicamente. Se a frequência emitida é 90 Hz, determine (a) o período de oscilação da espessura da camada e (b) o comprimento de onda do som.

**100** Os ocupantes de um carro que se move a 16,0 m/s ouvem a sirene de uma ambulância que se aproxima por trás, a uma velocidade de 40,0 m/s (em relação ao ar e ao chão). A frequência da sirene é 950 Hz e a velocidade do som no ar é 340 m/s. (a) Qual é a frequência da sirene ouvida pelo motorista da ambulância? (b) Qual é a frequência ouvida pelos ocupantes do carro depois que o carro é ultrapassado pela ambulância?

**101** O ultra-som, uma onda sonora com uma frequência tão alta que não pode ser ouvida pelos seres humanos, é usado para produzir imagens do interior do corpo humano. Além disso, o ultra-som é usado para medir a velocidade do sangue no corpo; para tal, a frequência do ultra-som aplicado ao corpo é comparada com a frequência do ultra-som refletido pelo sangue para a superfície do corpo. Como o sangue pulsa, a frequência detectada varia.

Suponha que uma imagem de ultra-som do braço de um paciente mostra uma artéria que faz um ângulo  $\theta = 20^\circ$  com a direção de propagação do ultra-som (Fig. 17-49). Suponha ainda que a frequência do ultra-som refletido pelo sangue da artéria apresenta um aumento máximo de 5495 Hz em relação à frequência de 5,000 000 MHz do ultra-som original. (a) Na Fig. 17-49, o sangue está correndo para a direita ou para a esquerda? (b) A velocidade do som no braço humano é 1540 m/s. Qual é a velocidade máxima do sangue? (Sugestão: O efeito Doppler é causado pela componente da velocidade do sangue na direção de propagação do ultra-som.) (c) Se o ângulo  $\theta$  fosse maior, a frequência refletida seria maior ou menor?

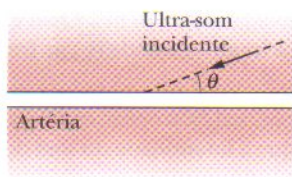


FIG. 17-49 Problema 101.

**102** O cano *A* tem apenas uma extremidade aberta; o tubo *B* é quatro vezes mais comprido e tem as duas extremidades abertas. Dos 10 menores números harmônicos  $n_B$  do tubo *B*, quais são (a) o menor, (b) o segundo menor e (c) o terceiro menor valor para o qual uma frequência harmônica de *B* coincide com uma das frequências harmônicas de *A*?

**103 Acústica das cachoeiras.** O impacto turbulento da água de uma cachoeira faz o solo oscilar em uma larga faixa de baixas frequências. Se a água cai livremente (em vez de bater nas pedras enquanto desce), as oscilações são maiores em uma frequência particular  $f_m$ . Este fato sugere que o fenômeno se deve a uma ressonância acústica e que  $f_m$  é a frequência fundamental. A tabela a seguir mostra, para nove cachoeiras americanas e canadenses, os valores medidos de  $f_m$  e da altura *L* da queda livre da água. Mostre como representar os dados em um gráfico para obter a velocidade do som na água da cachoeira. A partir do gráfico, calcule a velocidade do som se a ressonância da cachoeira for como a ressonância em um tubo (a) com as duas extremidades abertas e (b) com apenas uma extremidade aberta. A velocidade do som em uma água turbulenta contendo bolhas de ar pode ser cerca de

25% menor que a sua velocidade de 1400 m/s em água parada. (c) A partir das respostas dos itens (a) e (b), determine quantas extremidades abertas estão efetivamente envolvidas na ressonância de uma cachoeira.

**104** Uma pessoa em um vagão de trem toca uma nota de 440 Hz em um trompete. O vagão está se movendo a 20,0 m/s em direção a uma parede. Calcule a frequência (a) a som que incide na parede e (b) do som refletido que é ouvido pelo trompetista.

**105** Um carro de polícia persegue um Porsche 911 por excesso de velocidade. Suponha que a velocidade máxima do Porsche é 80,0 m/s e a do carro de polícia é 54,0 m/s. No instante em que os dois carros atingem a velocidade máxima, que frequência o motorista do Porsche escuta se a frequência da sirene do carro de polícia é 440 Hz? Considere a velocidade do som no ar como sendo 340 m/s.

**106** Uma onda sonora se propaga uniformemente em todas as direções a partir de uma fonte pontual. (a) Justifique a seguinte expressão para o deslocamento *s* do meio transmissor a uma distância *r* da fonte:

$$s = \frac{b}{r} \text{sen } k(r - vt),$$

onde *b* é uma constante. Considere a velocidade, o sentido de propagação, a periodicidade e a intensidade da onda. (b) Qual é a dimensão da constante *b*?

**107** Na Fig. 17-34,  $S_1$  e  $S_2$  são duas fontes sonoras pontuais isotrópicas. Elas emitem ondas em fase com comprimento de onda 0,50 m e estão separadas por uma distância  $D = 1,60$  m. Se movemos um detector de som ao longo de uma grande circunferência com o centro no ponto médio entre as fontes, em quantos pontos as ondas chegam ao detector (a) com a mesma fase e (b) com fases opostas?

**108** Suponha que um alto-falante esférico emite sons isotropicamente com uma potência de 10 W em uma sala com paredes, piso e teto cobertos de material absorvente (uma câmara anecoica). (a) Qual é a intensidade do som a uma distância  $d = 3,0$  m da fonte? (b) Qual é a razão entre as amplitudes da onda em  $d = 4,0$  m e em  $d = 3,0$  m?

**109** Os paleontólogos podem usar ondas sonoras para produzir uma imagem computadorizada do fóssil de um dinossauro incrustado na rocha. A imagem serve para guiar os paleontólogos durante a remoção do fóssil. (A técnica é mostrada nas cenas de abertura do filme *Jurassic Park*.) Para isso, um pulso sonoro de alta intensidade é emitido por uma fonte especial (um canhão

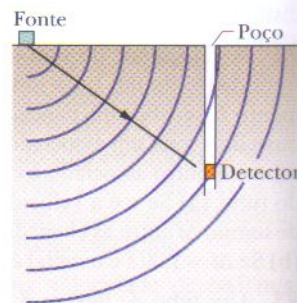


FIG. 17-50 Problema 109.

sísmico) no nível do solo e detectado por hidrofones instalados em um poço a intervalos regulares. A fonte e um hidrofone são mostrados na Fig. 17-50. Se a onda sonora se propaga da fonte para o hidrofone apenas através da rocha, como na Fig. 17-50, ela viaja com uma velocidade *V* e leva um certo tempo *T*. Se, em vez disso, ela atravessa um osso fossilizado no caminho, leva um tempo ligeiramente maior, já que a velocidade de propagação no osso é menor do que na rocha. Medindo a diferença  $\Delta t$  entre os tempos de percursos esperado e observado, a distância *d* percorrida no osso pode ser calculada. Depois que esse procedimento é

CACHOEIRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_m$ (Hz)	5,6	3,8	8,0	6,1	8,8	6,0	19	21	40
<i>L</i> (m)	97	71	53	49	35	24	13	11	8



repetido para muitas localizações da fonte e dos hidrofones, um computador pode transformar as várias distâncias  $d$  calculadas em uma imagem do fóssil.

(a) Seja  $V - \Delta V$  a velocidade do som no osso fossilizado, onde  $\Delta V$  é muito menor que  $V$ . Mostre que a distância  $d$  é dada por

$$d \approx \frac{V^2 \Delta t}{\Delta V}.$$

(b) Para  $V = 5000$  m/s e  $\Delta V = 200$  m/s, que valor típico de  $\Delta t$  pode ser esperado se o som passar pelo diâmetro de um osso da perna de um *T. rex* adulto? (Estime o diâmetro do osso.)

**110** O período de uma estrela variável pulsante pode ser estimado supondo que a estrela está executando pulsações longitudinais *radiais* no modo fundamental de uma onda estacionária, ou seja, que o raio da estrela varia periodicamente com o tempo, com um antinó do deslocamento na superfície da estrela. (a) Nesse modelo, o centro da estrela é um nó ou um antinó do deslocamento? (b) Por analogia com um tubo com uma extremidade aberta e a outra fechada, mostre que o período de pulsação

é dado por  $T = 4R/v$ , onde  $R$  é o raio de equilíbrio da estrela e  $v$  é a velocidade média do som no interior da estrela. (c) As estrelas anãs brancas típicas são feitas de uma substância com um módulo de elasticidade volumétrico de  $1,33 \times 10^{22}$  Pa e uma massa específica de  $10^{10}$  kg/m<sup>3</sup> e têm um raio igual a  $9,0 \times 10^{-3}$  vezes o raio solar. Qual o período aproximado de pulsação de uma anã branca?

**111** Um homem em repouso (em relação ao ar e ao chão) ouve um sinal de frequência  $f_1$  produzido por uma fonte que se move em sua direção com velocidade de 15 m/s. Se o homem se move em direção à fonte com uma velocidade de 25 m/s, ouve uma frequência  $f_2$  que difere de  $f_1$  por 37 Hz. Qual é a frequência da fonte? (Tome a velocidade do som no ar como sendo 340 m/s.)

**112** Uma violonista afina uma corda de violão para uma frequência fundamental de 440 Hz. (a) Qual será a frequência fundamental se ela aumentar a tensão da corda em 20%? (b) Qual será a frequência se, em vez disso, ela diminuir o comprimento efetivo da corda deslocando o dedo da posição da cravelha para um terço da distância até a ponte, na outra extremidade da corda?