Capítulo 17 Ondas II

Neste capítulo vamos estudar ondas sonoras e concentrar-se nos seguintes tópicos:

Velocidade de ondas sonoras

Relação entre deslocamento e amplitude

Interferência da onda de som

Intensidade e nível de som

Batimentos

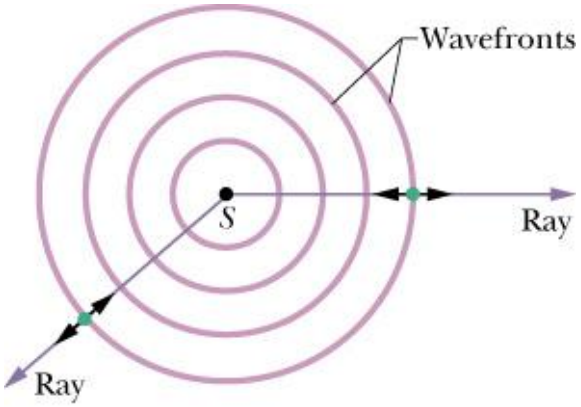
O efeito Doppler

Antoni Canela/Age Fotostock America, Inc.

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

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.

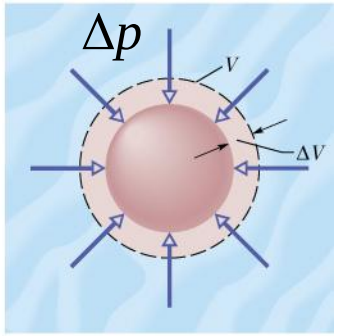
(17 - 2)



As ondas sonoras são mecânicas **longitudinal** ondas que se propagam em sólidos líquidos e gases. As ondas sísmicas utilizadas pelos exploradores de petróleo. As ondas sonoras geradas por um sistema de sonar se propagam no mar. Uma orquestra cria ondas sonoras que se propagam no ar.

O lugar geométrico onde os pontos de uma onda de som que tem o mesmo deslocamento é chamado uma "**Frente de Onda**". Linhas perpendiculares às frentes de onda são chamados "**raios**" Eles apontam na direção que se propagam as ondas sonoras. Um exemplo de uma fonte de ondas sonoras é dada na figura acima. Presumimos que o meio circundante onde o som se propaga é isotrópicos ou seja, ondas com a mesma velocidade para todas as direções. Neste caso, a onda sonora se espalha para fora de modo uniforme e as frentes de onda são esferas centradas no ponto de origem. As setas indicam os raios individuais. As setas duplas indicam o movimento das moléculas do meio em que o som se propaga.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$



(c)

Módulo de elasticidade volumetrico **(17-3)**

Se aplicarmos uma sobre pressao Δp sobre um objecto de volume V, Isto resulta numa alteração de volume ΔV como mostrado na figura.

O módulo de elasticidade volumetrico de material compacto é definido como: $B = -\dfrac{\Delta p}{\Delta V / V}$ a unidade em SI é Pascal

Nota: O sinal negativo indica o diminuir em volume quando Δp é positivo.

A velocidade do som

Usando a definição acima do módulo de elasticidade volumetrico e combinando-o com a segunda lei de Newton pode-se mostrar que a velocidade do som em um meio isotrópico homogêneo, com módulo volumétrico B e densidade ρ é dada pela equação: $v = \sqrt{\dfrac{B}{\rho}}$

Nota 1 : $|\Delta V| = \dfrac{pV}{B}$ módulo de elasticidade volumetrico é menor para materiais mais compressíveis. Os referidos materiais exibem baixa velocidade do som.

Nota 2 : Materiais mais densos (alto ρ) têm menor velocidade do som

TABELA 17-1

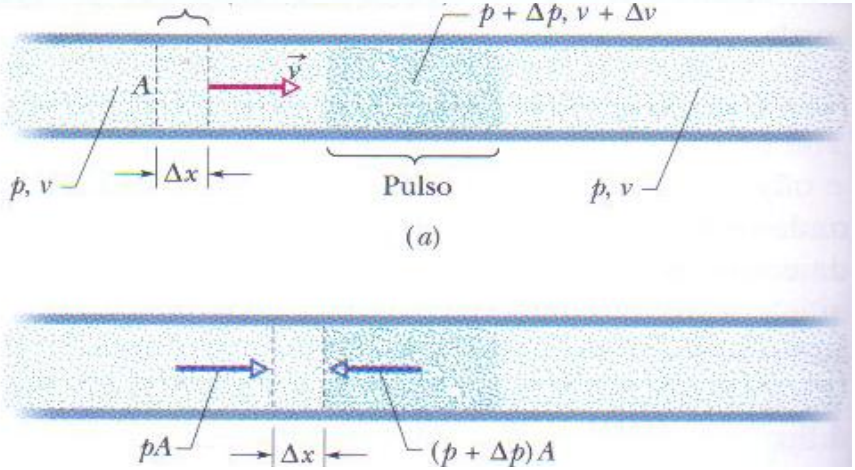
A Velocidade do Som[a]

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

[a] A 0°C e 1 atm de pressão, a menos que haja uma indicação em contrário.
[b] A 20°C e com 3,5% de salinidade.

Demonstração Formal da Eq. 17-3

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



$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v}.$$

$$F = pA - (p + \Delta p)A$$

$$= -\Delta p\, A \qquad \text{(força resultante).} \qquad (17\text{-}5)$$

$$\Delta m = \rho\, \Delta V = \rho A\, \Delta x = \rho A v\, \Delta t \qquad \text{(massa).}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad \text{(aceleração).} \qquad -\Delta p\, A = (\rho A v\, \Delta t)\frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

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

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{A\, \Delta v\, \Delta t}{A v\, \Delta t} = \frac{\Delta v}{v}.$$

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

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. 17-4*a*) e depois pelos mais afastados (mais altos) (Fig. 17-4*b*). 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° com a horizontal. Com que freqüência f_{base} os ecos produzidos pela reflexão dos pulsos nos degraus próximos da base da pirâmide chegam ao ouvinte? Com que freqüência f_{alto} os ecos produzidos pela reflexão dos pulsos nos degraus próximos do alto da pirâmide chegam ao ouvinte, um pouco mais tarde?

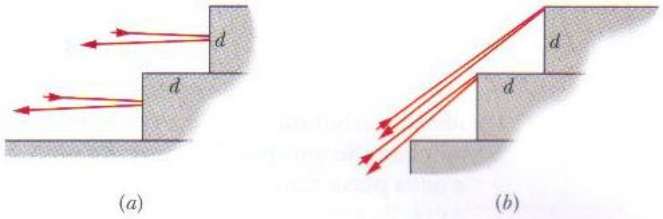


FIG. 17-4 As ondas sonoras são refletidas (*a*) nos degraus mais baixos e (*b*) nos degraus mais altos.

Cálculos: Perto da base da pirâmide (Fig. 17-4*a*) 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

$$\Delta t_{base} = \frac{L}{v} = \frac{2d}{v} \qquad (17\text{-}10)$$

$$= \frac{2(0{,}263\ \text{m})}{343\ \text{m/s}} = 1{,}533\times10^{-3}\ \text{s}.$$

A freqüência f_{base} com a qual os pulsos chegam ao ouvinte é

$$f_{base} = \frac{1}{\Delta t_{base}} \qquad (17\text{-}11)$$

$$= \frac{1}{1{,}533\times10^{-3}\ \text{s}} = 652\ \text{Hz}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Perto do alto da pirâmide (Fig. 17-4*b*) 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

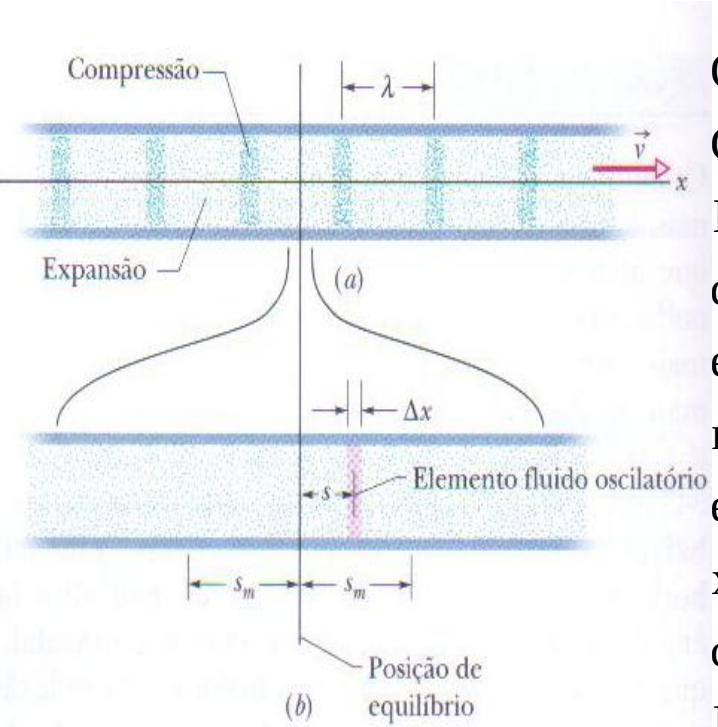
$$\Delta t_{alto} = \frac{L}{v} = \frac{2\sqrt{2}d}{v} \qquad (17\text{-}12)$$

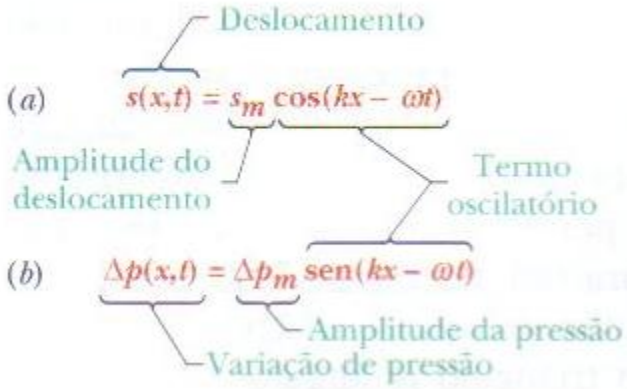
$$= \frac{2\sqrt{2}(0{,}263\ \text{m})}{343\ \text{m/s}} = 2{,}168\times10^{-3}\ \text{s}.$$

e a freqüência percebida pelo ouvinte é

$$f_{alto} = \frac{1}{\Delta t_{alto}}$$

$$= \frac{1}{2{,}168\times10^{-3}\ \text{s}} = 461\ \text{Hz}. \qquad \text{(Resposta)}$$





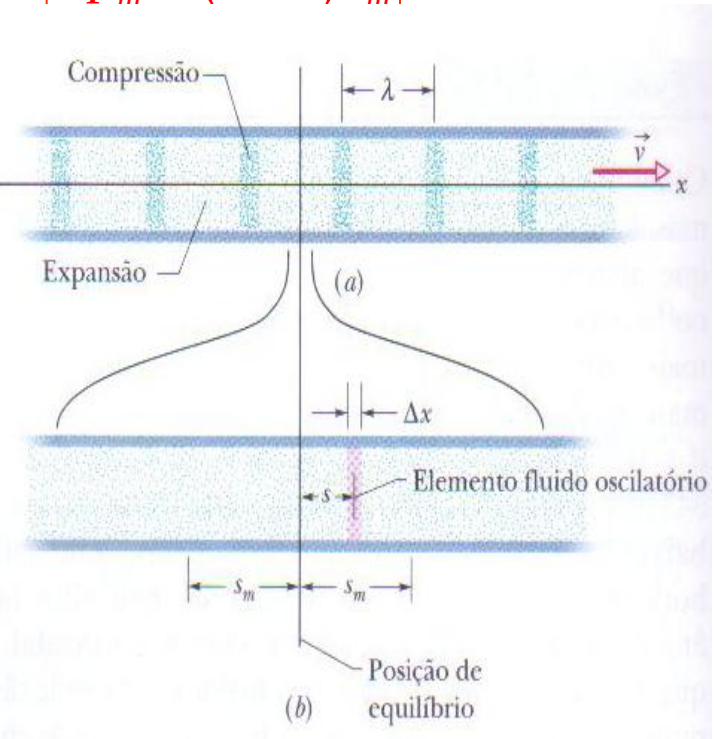
Ondas Sonoras Progressivas.

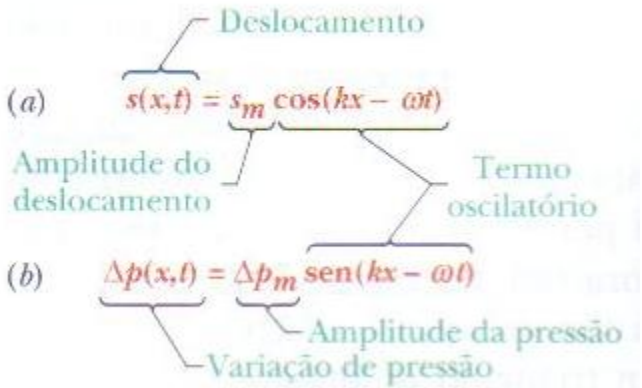
Considere o tubo cheio de ar mostrado na figura ao lado. Nós geramos uma onda sonora harmonica que viaja para o direita ao longo do eixo do tubo. Um método simples é colocar um alto-falante na extremidade esquerda do tubo e regula-lo a uma frequência particular. Considere um elemento de ar de espessura Δx que esta localizado na posição x antes da onda sonora ser gerado. Isto é conhecido como a "posição equlíbrio" do elemento.

Nestas condiçôes, a pressão no interior do tubo é constante

Na presenca da onda sonora o elemento oscila em torno da posicao equlibrio. Ao mesmo o tempo a pressão no local do elemento Δx oscila em torno do seu valor de equilíbrio. A onda sonora progressiva no tubo pode ser descrito através de um dos dois parametros:

$$\Delta p_m = (v\upsilon\omega)\, s_m$$





Ondas sonora *progressiva*.

Um parâmetro tais é a distância $s(x,t)$ do elemento a partir da sua posição de equilibrio $s(x,t) = s_m \cos(kx - \omega t)$. A constante s_m o amplitude de deslocamento da onda. O número de onda angular k e a frequencia angular ω tem mesmo o significado que no caso da onda transversal estudado no capitulo 16.

A segunda possibilidade e usar a variação da pressão Δp a partir do valor estático. $\Delta p(x,t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t)$

A constante Δp_m é a pressão da onda amplitude.

As duas amplitudes são ligados pela equação:

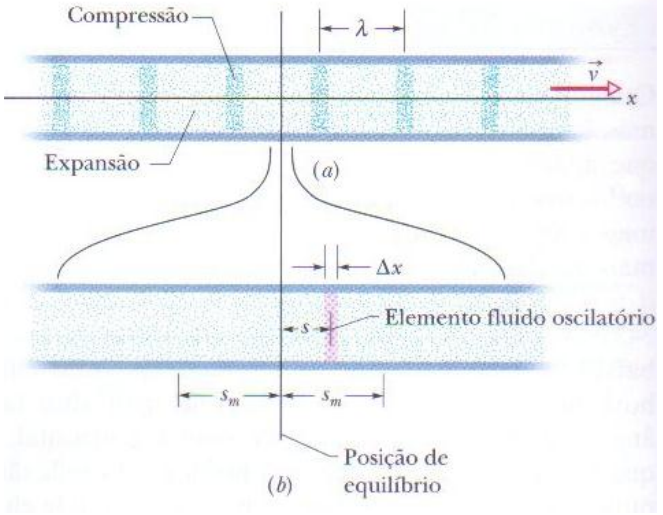
$$\Delta p_m = (v\upsilon\omega)\, s_m$$

Nota: O deslocamento e da variacão da pressão tem uma diferenca de fase de 90°. Como resultado, quando um parâmetro tem um máximo a outra tem um mínimo e vice-versa.

Demonstração das Eqs. 17-14 e 17-15

$$\Delta p(x,t) = \Delta p_m \operatorname{sen}(kx - \omega t). \qquad (17\text{-}14)$$

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



$$V = A\,\Delta x. \qquad \Delta p = -B\frac{\Delta V}{V}.$$

$$\Delta p = -B\frac{\Delta s}{\Delta x} = -B\frac{\partial s}{\partial x}. \longrightarrow \frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}[s_m \cos(kx - \omega t)] = -ks_m \operatorname{sen}(kx - \omega t).$$

$$\Delta p = Bks_m \operatorname{sen}(kx - \omega t).$$

Fazendo $\Delta p_m = Bks_m$,

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

Exemplo 17-2

A amplitude máxima de pressão Δp_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 freqüência do som é 1000 Hz e a velocidade do som é 343 m/s?

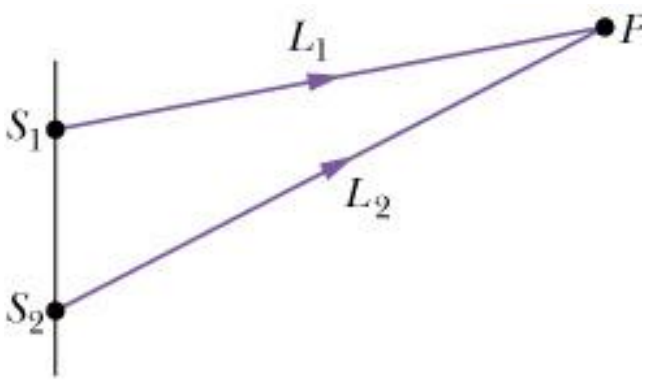
Cálculos: Explicitando s_m na Eq. 17-15, obtemos

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

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

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

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L$$



Interferência

Considere duas fontes pontuais de ondas sonoras S1 e S2 mostrado na figura. As duas fontes estão em fase e emitem ondas sonoras de mesma freqüência.

Ondas de ambas as fontes chegam ao ponto P cujas distância do S1 e S2 é L_1 and L_2 respectivamente.

As duas ondas interferem no ponto P.

No tempo ta fase de onda de som que chega de um S_1 no ponto P é is $\phi_1 = kL_1 - \omega t$

No tempo ta fase da onda sonora 2 chegando de S_2 no ponto P é $\phi_2 = kL_2 - \omega t$

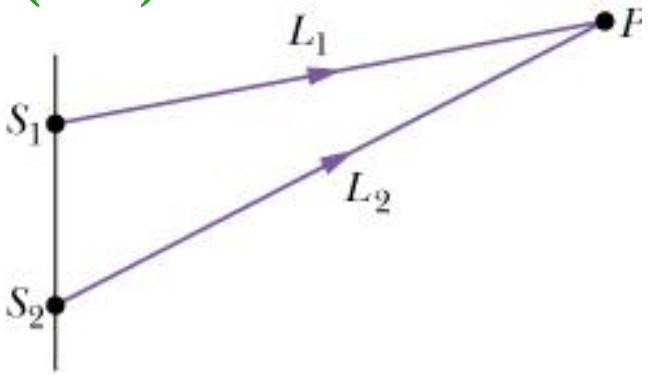
Em geral, as duas ondas de P tem uma diferença de fase

$$\phi = \left|\phi_2 - \phi_1\right| = \left|kL_2 - \omega t - \left(kL_1 - \omega t\right)\right| = k\left|L_2 - L_1\right| = \frac{2\pi}{\lambda}\left|L_2 - L_1\right|$$

A quantidade $\left|L_2 - L_1\right|$ e conhecido como o "diferenca comprimento do caminho" ΔL entre as duas ondas. Assim $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L$

Aquí λ é o comprimento de onda das duas ondas.

(17-7)



IntereferÊncia construtiva.

A onda em P resultante da interferência do duas ondas que chegam de S_1 e S_2 tem um máximo amplitude quando a diferença de fase $\phi = 2\pi m$

$$m = 0,1,2,\ldots . \quad \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L = 2\pi m \quad \rightarrow \Delta L = m\lambda$$

$$\Delta L = 0,\ \lambda,\ 2\lambda,\ldots$$

Intereferência destrutiva.

A onda em P resultante da interferência das duas ondas que chegam a partir de S_1 e S_2 tem uma amplitude miniimum quando a diferença de fase

$$\phi = \pi(2m+1) \qquad m = 0,1,2,\ldots . \quad \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L = \pi(2m+1) \quad \rightarrow$$

$$\Delta L = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad \Delta L = \lambda/2,\ 3\lambda/2,\ 5\lambda/2,\ldots$$

ΔL igual a um inteiro multiplo de λ $\uparrow$ interferência construtiva

ΔL igual a um meio inteiro multiplo de λ $\rightarrow$ interferência destrutiva

Exemplo 17-3 Aumente sua capacidade

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

(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

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

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. 17-9*a*?

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

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

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. 17-9*b* 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?

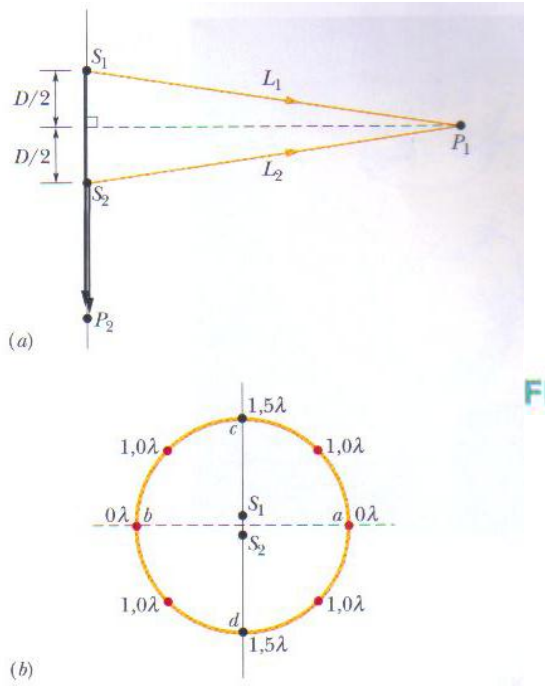
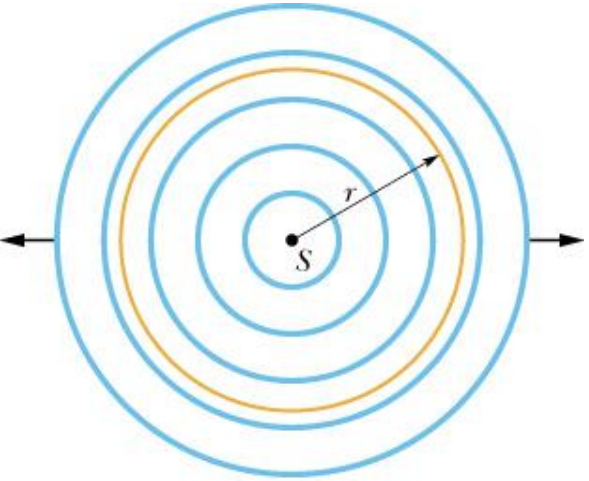


FIG. 17-9

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

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

(17 - 8)



Intensidade de uma onda de som

Considere-se uma onda que é incidente normalmente sobre uma superfície de área A. A onda transporta energia. Como resultado poder P (Energia por unidade de tempo) passa por A.

Nós definimos a intensidade da onda I a razão P / A

$$I = \frac{P}{A} \qquad \text{SI : } \mathrm{W/m^2}$$

A intensidade de uma onda harmónica com amplitude de deslocamento s_m é dada por:

$$I = \left(\frac{\rho v \omega^2}{2}\right) s_m^2. \qquad \text{Em termos de amplitude de pressão } I = \left(\frac{1}{2\rho v}\right) \Delta p_m^2$$

Considere emissor de uma fonte pontual S uma potência P sob a forma de ondas sonoras de uma determinada freqüência. O meio envolvente é isotrópico para as ondas espalhadas uniformemente. As frentes de onda correspondentes são esferas que têm S como

P seu centro. A intensidade de som a uma distância r a partir de S é: $I = \frac{P}{4\pi r^2}$

A intensidade de uma onda de som para um fontes pontuais é proporcional $\frac{1}{r^2}$

O decibel

A sensação auditiva em seres humanos é proporcional ao logaritmo do intensidade do som I. Isto permite que a orelha de perceber uma vasta gama de intensidades sonoras. O limiar de audição I_0 é definida como a mais baixa soar intensidade que pode ser detectado pelo ouvido humano. $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2

O nível sonoro β e definida de tal modo a imitar a resposta do ouvido humano.

$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_o}\right)$ β é expresso em decibeis (dB)

Podemos inverter a equação acima e expressar I em termos de β como:

$I = I_o \times 10^{(\beta/10)}$

Nota 1 : Para $I = I_o$ nós temos: $\beta = 10 \log 1 = 0$

Nota 2 : β aumenta em 10 decibéis cada vez Iaumenta por um fator de 10 .

Por examplo $\beta = 40$ dB corresponde a $I = 10^4 I_o$

Demonstração da Eq. 17-27

Considere, na Fig. 17-5*a*, 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

$$dK = \tfrac{1}{2}\, dm\, v_s^2, \tag{17-30}$$

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

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

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

$$dK = \tfrac{1}{2}(\rho A\, dx)(-\omega s_m)^2 \operatorname{sen}^2(kx - \omega t). \tag{17-31}$$

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

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

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

$$\left(\frac{dK}{dt}\right)_{\text{méd}} = \tfrac{1}{2}\rho A v \omega^2 s_m^2 \left[\operatorname{sen}^2(kx - \omega t)\right]_{\text{méd}}$$

$$= \tfrac{1}{4}\rho A v \omega^2 s_m^2 . \tag{17-33}$$

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,

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

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 $L = 10$ 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 $P_s = 1{,}6 \times 10^4$ W.

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

IDÉIAS-CHAVE (a) Vamos construir um cilindro imaginário de raio $r = 12$ m e comprimento $L = 10$ 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

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

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

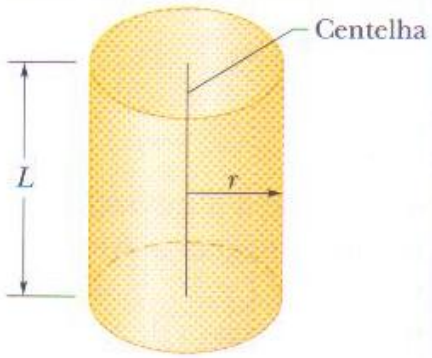


FIG. 17-11 Uma centelha na forma de um segmento de reta de comprimento L emite ondas sonoras radiais. As ondas atravessam um cilindro imaginário r e comprimento L cujo eixo coincide com a centelha.

$$I = \frac{1{,}6 \times 10^4 \text{ W}}{2\pi(12 \text{ m})(10 \text{ m})}$$

$$= 21{,}2 \text{ W/m}^2 \approx 21 \text{ W/m}^2. \qquad \text{(Resposta)}$$

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

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

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

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

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 Townshend, 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 diminui 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 β 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

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

Usando a identidade

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

podemos escrever a Eq. 17-36 na forma

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

Reagrupando os termos e substituindo a redução do nível sonoro $\beta_f - \beta_i$ por -20 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:

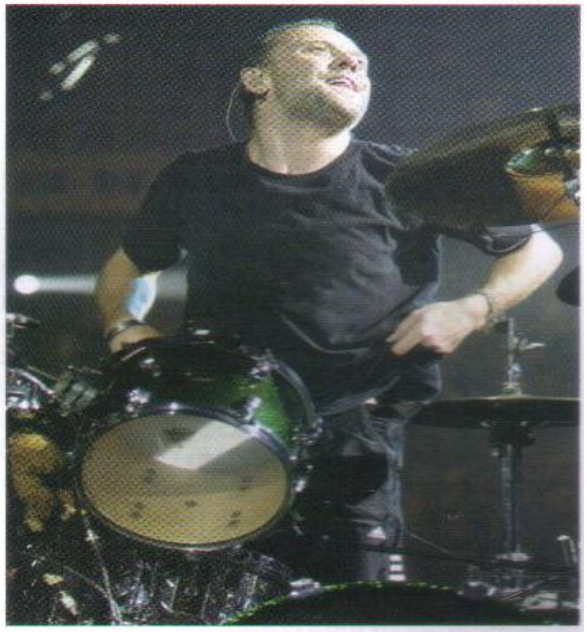
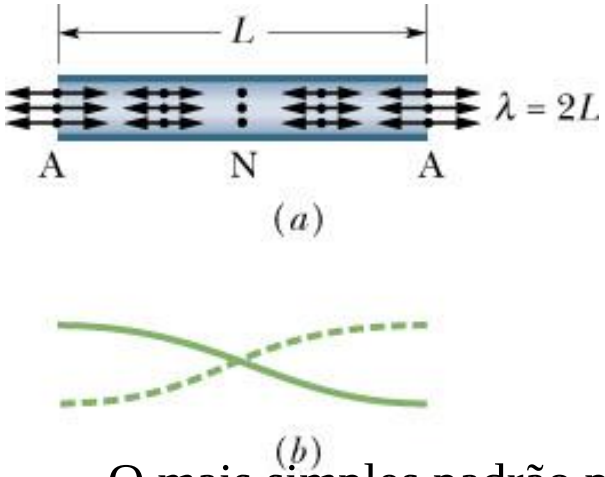


FIG. 17-12 Lars Ulrich, da banda Metallica, é um dos que apóiam a organização HEAR (Hearing Education and Awareness for Rockers), que alerta para os danos que altos níveis sonoros podem causar à audição. *(Tim Mosenfelder/ Getty Images News and Sport Services)*

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

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.



Som ondas estacionárias em tubos

Considere um tubo cheio com o ar que é aberto em ambas as extremidades. As ondas sonoras têm que ter comprimento de onda que satisfaçam um determinada relação com o comprimento L do tubo resultando em ondas estacionárias

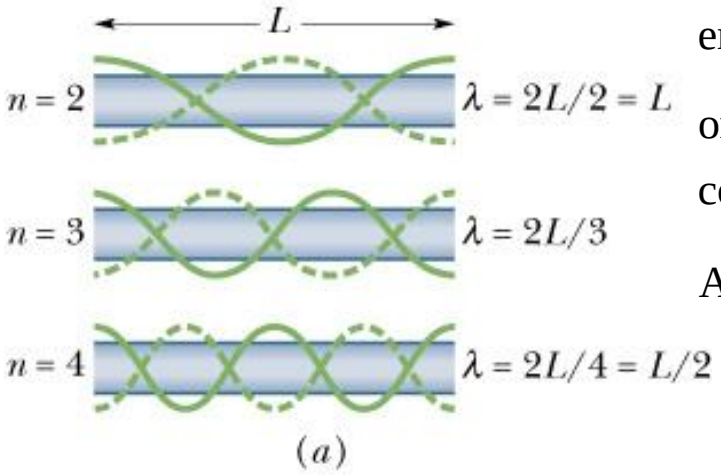
O mais simples padrão pode ser configurado em um tubo que é aberto em ambas as extremidades, como mostrado na fig.a. Em tal tubo de um ondas estacionárias têm um antinodo (máximo) na posição da amplitude A amplitude da onda estacionária é traçada em função da distância em fig.b. O padrão tem um nó no centro da tubulação, uma vez que dois antinodos adjacentes são separados por um ânodo (mínimo). A distância entre dois antinodos adjacentes é $\lambda/2$.

Assim $L = \lambda / 2 \rightarrow \lambda = 2L$ Sua frequencia $f = \dfrac{v}{\lambda} = \dfrac{v}{2L}$

A onda estacionaria de Fig.b e conhecido como o "modo fundamnetal" ou "primeiro harmonico" do tubo.

Nota: Antinodos na amplitude de deslocamento correspondem aos nós na amplitude de pressão. Isto e porque s_m e Δp_n estão 90^o fora de fase.

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$



Ondas estacionárias em tubos abertos em ambas as extremidades

Os próximos três padrões de ondas permanentes estão em 2L mostrado na fig.a. O comprimento de onda $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ onde $n = 1, 2, 3, \ldots$ O inteiro n é conhecido como o número harmônico

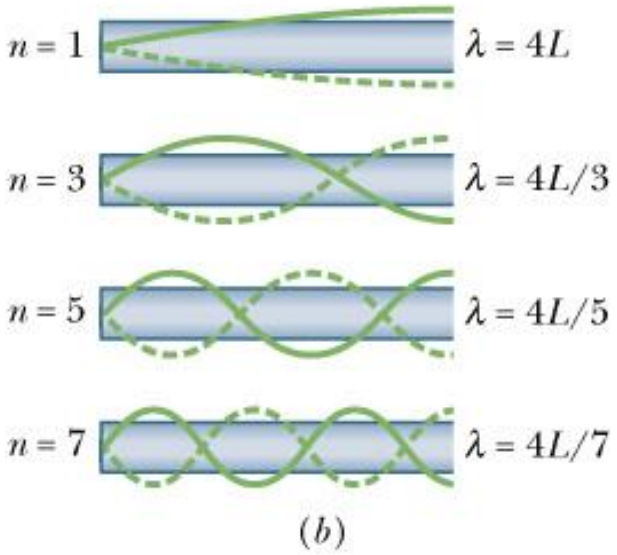
As freqüências correspondentes são $f_n = \frac{nv}{2L}$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n+1/2}$$

Ondas estacionárias em tubos abertos numa extremidade e fechado na outra.

Os quatro primeiros padrões de ondas permanentes estão mostrado na fig.a. Eles têm um antinodo no extremidade aberta e um nó na extremidade fechada.

O comprimento de onda é $\lambda_n = \frac{2L}{n+1/2}$



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 freqüência 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. 17-14*b*.

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

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

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

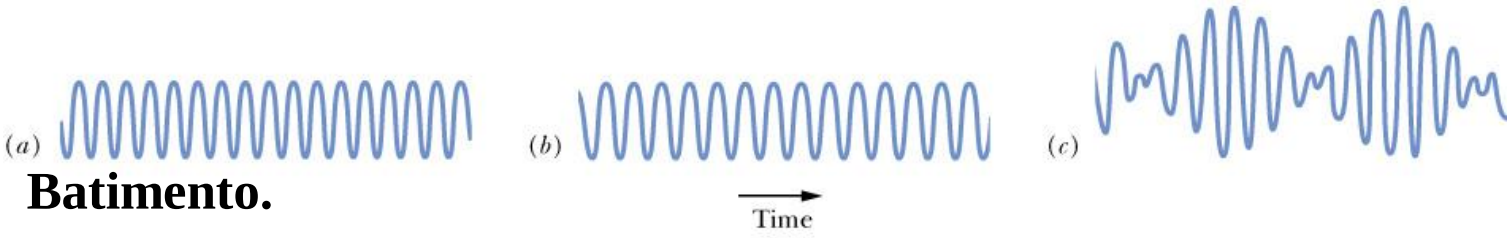
(b) Se você encostar o ouvido em uma das extremidades do tubo, que freqüência fundamental ouvirá?

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. 17-15*b*.

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

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

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



Batimento.

Se ouvirmos duas ondas sonoras de igual amplitude e frequências f_1 e f_2 $(f_1 > f_2$ e $f_1 \approx f_2)$ nós percebê-los como um som de freqüência $f_{av} = \dfrac{f_1 + f_2}{2}$. Além disso, também percebemos "batimentos", que são variações na intensidade do som com uma frequência batida $f_{beat} = f_1 - f_2$.

O deslocamento de duas ondas de som são dados pela equação: $s_1 = s_m \cos \omega_1 t$, e $s_2 = s_m \cos \omega_2 t$.

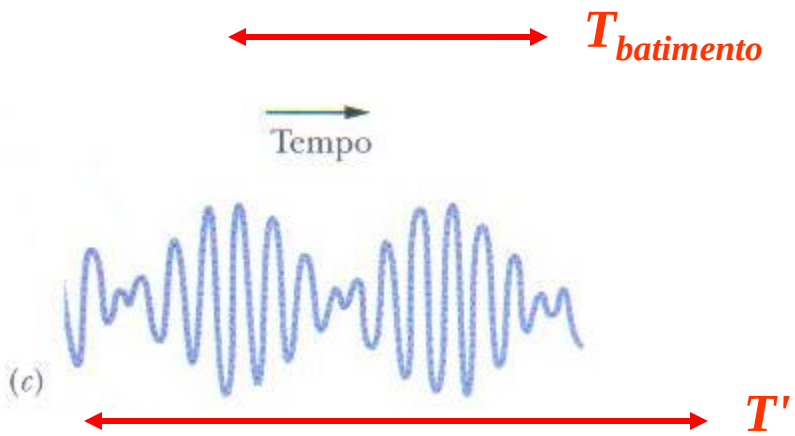
Estes são plotados na fig.a e fig.b.

Usando o princípio de sobreposição pode-se determinar o deslocamento resultante como:

$$s = s_1 + s_2 = s_m \left(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t\right) = 2 s_m \cos\left[\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right) t\right] \cos\left[\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right) t\right]$$

$$s = \left[2 s_m \cos \omega' t\right] \cos \omega t \quad \text{onde} \quad \omega' = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \quad \text{e} \quad \omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$

Desde que $\omega_1 \approx \omega_2 \rightarrow \omega \gg \omega'$



$$f_{batimento} = f_1 - f_2$$

$s = \left[2s_m \cos \omega' t\right] \cos \omega t$ onde $\omega' = \dfrac{\omega_1 - \omega_2}{2}$ and $\omega = \dfrac{\omega_1 + \omega_2}{2}$

O deslocamento s é traçado em função do tempo na figura acima. Podemos considera -la como uma função de cosseno cuja amplitude é igual a $\left|2s_m \cos \omega' t\right|$.

A amplitude é dependente do tempo, mas varia lentamente com o tempo. A amplitude apresenta um máximo sempre que $\cos \omega' t$ é igual +1 ou -1 que acontece duas vezes dentro de um período da função $\cos \omega' t$.

Assim frequência o angular dos batimentos $\omega_{batimentos} = 2\omega' = 2\left(\dfrac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right) = \omega_1 - \omega_2$

A frequencia dos batimentos é $f_{batimentos} = 2\pi\omega_{batimentos} = 2\pi\omega_1 - 2\pi\omega_2 = f_1 - f_2$

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 dois 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 freqüência do primeiro harmônico produzido pelo lado A da siringe é $f_{A1} = 432$ Hz e que a freqüência do primeiro harmônico produzido pela extremidade B é $f_{B1} = 371$ Hz. Qual é a freqüência de batimento entre as duas freqüências do primeiro harmônico e entre as duas freqüências do segundo harmônico?

IDÉIA-CHAVE De acordo com a Eq. 17-46 ($f_{bat} = f_1 - f_2$), a freqüência de batimento de duas freqüências é a diferença entre elas.

Cálculos: Para as duas freqüências de primeiro harmônico f_{A1} e f_{B1}, a freqüência de batimento é

$$f_{bat,1} = f_{A1} - f_{B1} = 432 \text{ Hz} - 371 \text{ Hz}$$
$$= 61 \text{ Hz}. \qquad \text{(Resposta)}$$

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

$$f_2 = 2f_1.$$

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

$$f_{bat,2} = f_{A2} - f_{B2} = 2f_{A1} - 2f_{B1}$$
$$= 2(432 \text{ Hz}) - 2(371 \text{ Hz})$$
$$= 122 \text{ Hz}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Os experimentos mostram que os pingüins conseguem perceber essas freqüências 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 freqüências de batimento que permite que sua voz seja identificada mesmo entre as vozes de milhares de outros pingüins.

O efeito Doppler

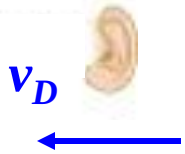
Considere a fonte e um detector de ondas sonoras como mostrado na figura ao lado. Nós supomos que a freqüência da fonte é igual para f.

Tomamos como referencial que ar circundante através do qual as ondas sonoras propagar. Se não houver movimento relativo entre a fonte eo detector, em seguida, o detector percebe a frequancy do som como $f' \neq f$. Se a fonte ou o movimento detector para um ao outro $f' > f$. se por outro lado a fonte ou o detector de se afastar do outro $f' < f$. Isto e conhecido como o "efeito Doppler"

A frequêcia f' é dada pela equação: $f' = f \dfrac{v \pm v_D}{v \pm v_S}$. Aquí v_S e v_D são as velocidades da fonte e do detector em relação ao ar, respsctively.

Quando o movimento do detector ou fonte é um para o outro o sinal da velocidade deve dar um mudança ascendente na frequência. Se, por outro lado o movimento é distância uns dos outros o sinal da velocidade deve dar um deslocamento para baixo em frequência.

As quatro combinações possíveis são ilustradas na página seguinte.



$$f' = f\frac{v + v_D}{v - v_S} \qquad f' > f$$

$$f' = f\frac{v - v_D}{v + v_S} \qquad f' < f$$

$$f' = f\frac{v - v_D}{v - v_S}$$

$$f' = f\frac{v + v_D}{v + v_S}$$

$$\boxed{f' = f\frac{v \pm v_D}{v \pm v_S}}$$

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 freqüências tão altas que não podem ser percebidas pelos ouvidos humanos. Suponha que um morcego emite ultra-sons com uma freqüência $f_{mor,e} = 82{,}52$ 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 freqüência $f_{mar,d}$ é detectada pela mariposa? Qual é a freqüência $f_{mor,d}$ detectada pelo morcego ao receber o eco da mariposa?

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

Detecção pela mariposa: A equação geral do efeito Doppler é

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

Com essas substituições e escolhas, temos:

$$f_{mar,d} = f_{mor,e}\frac{v - v_{mar}}{v - v_{mor}}$$

$$= (82{,}52 \text{ kHz})\frac{343 \text{ m/s} - 8{,}00 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s} - 9{,}00 \text{ m/s}}$$

$$= 82{,}767 \text{ kHz} \approx 82{,}8 \text{ kHz}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Detecção do eco pelo morcego: Quando o morcego recebe o eco a mariposa se comporta como fonte sonora, emitindo sons com a freqüência $f_{mar,d}$ 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 freqüência $f_{mor,d}$ detectada pelo morcego usamos a Eq. 17-56:

$$f_{mor,d} = f_{mar,d}\frac{v + v_{mor}}{v + v_{mar}}$$

$$= (82{,}767 \text{ kHz})\frac{343 \text{ m/s} + 9{,}00 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s} + 8{,}00 \text{ m/s}}$$

$$= 83{,}00 \text{ kHz} \approx 83{,}0 \text{ kHz}. \qquad \text{(Resposta)}$$

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

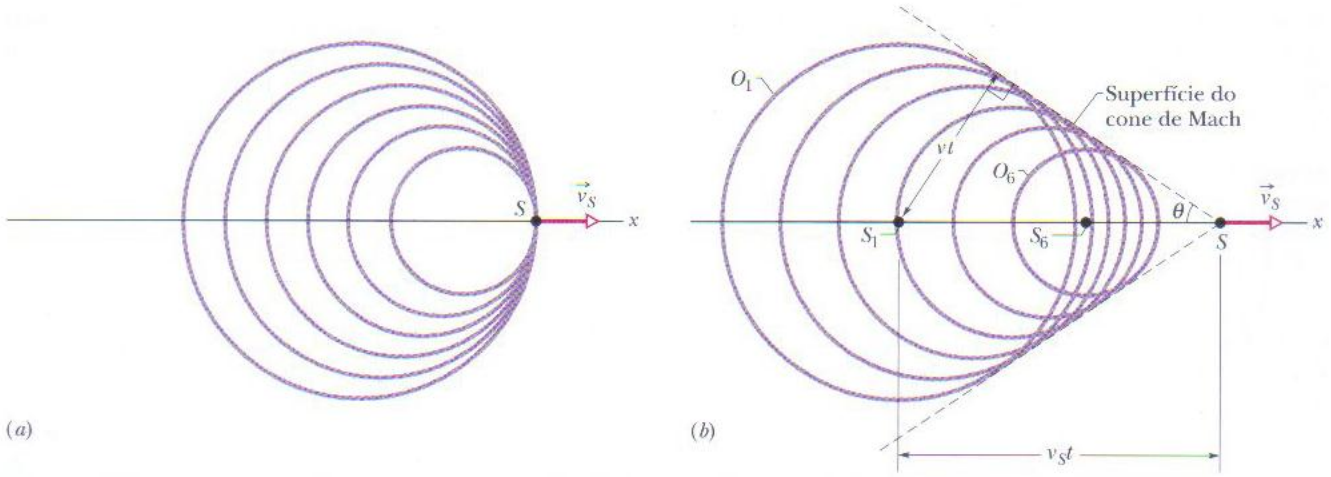


FIG. 17-24 Ondas de choque produzidas pelas asas de um jato FA 18 da Marinha dos Estados Unidos. As ondas de choque são visíveis porque a redução brusca da pressão do ar fez com que moléculas de água se condensassem, formando uma nuvem. *(Foto do guarda-marinha John Gay para a Marinha dos Estados Unidos)*

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{vt}{v_S t} = \frac{v}{v_S} \qquad \text{(ângulo de cone de Mach).} \qquad (17\text{-}57)$$