Introdução à Física Acústica

Antonio Newton Borges e Clóves Gonçalves Rodrigues

11 de fevereiro de 2016

Prefácio

Este livro é um texto introdutório de Física Acústica destinado para estudantes dos cursos de Fonoaudiologia e áreas afins. O Capítulo 1 faz uma revisão sobre as principais grandezas físicas e o sistema internacional de unidades. O Capítulo 2 trata sobre oscilações e movimentos periódicos. No Capítulo 3 é introduzido o movimento ondulatório, com a classificação das ondas, a equação de onda progressiva, número de onda e frequência angular, velocidade das ondas, fenômenos ondulatórios, ondas estacionárias e ressonância. Os Capítulos 4 e 5 tratam especificamente das ondas sonoras - com ênfase na sua produção e propagação - versando sobre: infra-som e ultra-som, velocidade do som, intensidade de energia sonora, sensibilidade do ouvido humano, nível de intensidade sonora, nível de pressão sonora, reflexão, refração e difração do som, batimentos, efeito Doppler, ressonância e membrana vibrante. O Capítulo 6 trata das características do som e de sua percepção pelo aparelho auditivo humano, sendo vistos temas como: intensidade do som, altura, timbre, tom, ruído, barulho, sons musicais, o processo de produção da fala, a audição, a sensibilidade do ouvido humano, audiogramas e curvas isofônicas, binauralidade, poluição sonora, perda auditiva e aparelhos auditivos.

Sumário

Prefácio **3**

1 Medidas Físicas e Notação Científica **9**
1.1 Introdução . . . 9
1.2 O Sistema Internacional de Unidades . . . 9
1.3 Grandezas Físicas Derivadas . . . 10
1.3.1 Velocidade escalar média . . . 10
1.3.2 Aceleração . . . 10
1.3.3 Força . . . 11
1.3.4 Trabalho . . . 11
1.3.5 Energia . . . 11
1.3.6 Potência . . . 12
1.3.7 Pressão . . . 12
1.4 Notação Científica . . . 14

2 Movimentos Periódicos **17**
2.1 Introdução . . . 17
2.2 Período e Frequência . . . 17
2.3 Exemplos de Osciladores . . . 19
2.3.1 Pêndulo Simples . . . 19
2.3.2 Oscilador Harmônico Linear Simples . . . 19
2.4 Oscilações Amortecidas . . . 20
2.5 Oscilações Forçadas . . . 21

3 Movimento Ondulatório **25**
3.1 Onda . . . 25
3.2 Ondas em uma Corda . . . 25
3.3 Classificação das Ondas . . . 26
3.4 Equação de uma Onda Progressiva . . . 28
3.5 Sentido de Propagação de uma Onda . . . 29
3.6 Número de Onda e Frequência Angular . . . 30
3.7 Velocidade das Ondas Progressivas . . . 33
3.8 Fenômenos Ondulatórios . . . 35
3.8.1 Princípio de Superposição . . . 35
3.8.2 Interferência de Ondas . . . 36
3.8.3 Passagem de uma Onda de um Meio para Outro . . . 37

3.8.4 Reflexão de uma Onda 38
3.8.5 Ondas Estacionárias e Ressonância 39

4 Som **47**
4.1 Ondas Sonoras 47
4.2 O Que é Som 47
4.3 Ondas Sonoras Progressivas 48
4.4 Infra-Som e Ultra-Som 50
4.5 A Velocidade do Som no Ar em Função da Temperatura 51
4.6 Intensidade de Energia Sonora 53
4.7 Intensidade de Energia de uma Fonte Pontual 55
4.8 Sensibilidade do Ouvido Humano 57
4.9 Nível de Intensidade Sonora 57
4.10 Nível de Pressão Sonora 60

5 Fenômenos Sonoros **65**
5.1 Reflexão do Som 65
5.2 Refração do Som 66
5.3 Materiais Absorvedores de Som 68
5.4 Difração do Som 69
5.5 Batimentos 70
5.6 O Efeito Doppler 73
5.7 Ressonância em Tubo de Ar 73
5.7.1 Tubo Aberto 74
5.7.2 Tubo Fechado 76
5.8 Ressonância em Membranas Vibrantes 77

6 Produção e Sensação do Som **81**
6.1 Introdução 81
6.2 O Som e Suas Características 81
6.2.1 Intensidade 81
6.2.2 Altura 81
6.2.3 Timbre 82
6.3 Tom, Ruído e Barulho 83
6.3.1 Tom 83
6.3.2 Ruído 83
6.3.3 Barulho 83
6.4 Sons Musicais 84
6.4.1 Cordas Vibrantes 84
6.4.2 Membranas 84
6.4.3 Tubos Sonoros 84
6.4.4 Barras 84
6.4.5 Nota Musical e Intervalo 85
6.5 Produção da Fala 86
6.6 Audição 88
6.6.1 Orelha Externa 88

6.6.2 Orelha Média . . . 88
6.6.3 Orelha Interna . . . 89
6.7 Sensibilidade do Ouvido Humano . . . 90
6.8 Binauralidade . . . 93
6.9 Poluição Sonora . . . 93
6.10 Redução e Prevenção da Poluição Sonora . . . 95
6.11 Perda Auditiva . . . 97
6.11.1 Perda Condutiva . . . 97
6.11.2 Perda Neurossensorial . . . 98
6.12 Aparelhos Auditivos . . . 99

Bibliografia **105**

Respostas **107**

Apêndice **113**

Capítulo 1

Medidas Físicas e Notação Científica

1.1 Introdução

Física é a ciência que estuda os fenômenos naturais através de um método regido por determinados princípios gerais e disciplinado por relações entre experimentos e teoria. A Matemática é um instrumento muito importante para a Física, cujo estudo abrange as leis naturais que regem o ambiente em que o homem se desenvolve e as teorias delas decorrentes. A palavra *Física* provém de um vocábulo grego que significa *natureza* e transformou-se por motivos históricos no termo empregado para designar o *estudo dos fenômenos naturais*. Atualmente, as teorias e os fenômenos analisados pela Física tornaram-se tão importantes que se acham relacionados com os campos de estudos da maioria das outras ciências. Dentre as várias subdivisões que compreende a Física encontra-se a *Física Acústica* a qual estuda a produção, a propagação e a recepção das vibrações mecânicas.

O conhecimento das leis e fenômenos físicos é indispensável para a sobrevivência humana. Para descobrir as leis que governam os fenômenos naturais, os cientistas devem realizar medidas das grandezas envolvidas nestes fenômenos. A Física, em particular, costuma ser denominada "a ciência da medida". Na Grécia antiga a deusa Métis era a representação da inteligência prática, da prudência e do conhecimento exato. Nossa língua herdou, do nome da deusa, as palavras *medir* e *medida*. Uma grandeza Física é uma entidade que caracteriza um sistema nos dando informações valiosas a seu respeito.

Começamos, então, por aprender como medir as grandezas físicas, em termos das quais as leis da Física são expressas. Entre estas quantidades estão o comprimento, o tempo, a velocidade, a massa, a pressão, etc. As palavras usadas na Física para expressar grandezas físicas não devem ser confundidas com seus significados habituais, pois, isto normalmente gera confusão. Uma grandeza física é definida estabelecendo-se um padrão e atribuindo-lhe uma unidade.

1.2 O Sistema Internacional de Unidades

Existem sete grandezas que foram convenientemente escolhidas como unidades fundamentais. Estas unidades fundamentais formam a base do Sistema Internacional de Unidades (SI) que também é conhecido como "sistema métrico". Na mecânica existem dois sistemas fundamentais de medida muito utilizados: o sistema internacional MKS que é a abreviatura de *metro*, *quilograma* (do inglês *kilogram*) e *segundo*, e o CGS que é a abreviatura de *centímetro*, *grama* e *segundo*. Toda a mecânica é fundamentada nestas três unidades básicas de medida. Portanto, no sistema MKS, a unidade de comprimento é o metro (m), a unidade de massa é o quilograma (kg) e a unidade de tempo é o segundo (s).

As quatro unidades fundamentais apresentadas na Tabela 1.1 associadas a outras que veremos em capítulos posteriores serão as de maior importância no estudo da Física Acústica.

Tabela 1.1: Algumas unidades fundamentais do SI

Grandeza	Nome da Unidade	Símbolo
comprimento	metro	m
massa	quilograma	kg
tempo	segundo	s
temperatura	kelvin	K

As outras três unidades fundamentais do SI são apresentadas na Tabela 1.2. Estas unidades serão de pouco interesse para os nossos objetivos neste livro texto.

Tabela 1.2: Demais unidades fundamentais do SI

Grandeza	Nome da Unidade	Símbolo
corrente elétrica	ampère	A
quantidade de substância	mol	mol
intensidade luminosa	candela	cd

1.3 Grandezas Físicas Derivadas

Muitas unidades derivadas do SI são definidas em termos das unidades fundamentais apresentadas nas Tabelas 1.1 e 1.2. Descrevemos em seguida as principais unidades derivadas do SI.

1.3.1 Velocidade escalar média

A *velocidade escalar média* (v) é a razão entre a distância total percorrida (d) e o tempo total gasto (Δt) para percorrer esta distância,

$$v = \frac{d}{\Delta t} \tag{1.1}$$

A unidade de velocidade no SI é o *metro por segundo* (m/s).

1.3.2 Aceleração

A *aceleração* ($\vec{a}$) no *movimento uniformemente variado* é a taxa de variação da velocidade em relação ao tempo,

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \tag{1.2}$$

onde Δt é a variação do tempo e $\Delta \vec{v}$ é a variação da velocidade, ou seja $\Delta t = t_2 - t_1$ e $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$, sendo $\vec{v}_2$ e $\vec{v}_1$ as velocidades correspondentes aos tempos t_2 e t_1, respectivamente. De acordo com a Eq. 1.2, a unidade de aceleração no SI é *metro por segundo ao quadrado* (m/s^2).

1.3.3 Força

A *força* ($\vec{F}$) é todo agente capaz de deformar ou produzir uma aceleração em um corpo. Por exemplo, quando exercemos um esforço muscular para puxar ou empurrar um objeto, estamos lhe comunicando uma força ($\vec{F}$). A força resultante $\vec{F}$ aplicada sobre uma partícula é:

$$\vec{F} = m\vec{a} \tag{1.3}$$

sendo m a massa da partícula e $\vec{a}$ a sua aceleração. Conforme a Eq. (1.3), a unidade de força no SI é kg.m/s^2 que recebe o nome de *newton* (N = kg.m/s^2).

1.3.4 Trabalho

Suponha que uma partícula é arrastada sobre uma mesa horizontal, submetida à ação de uma força ($\vec{F}$) constante, e que a partícula se desloque de uma distância d. Sendo α o ângulo entre $\vec{F}$ e a direção do deslocamento do corpo (veja Fig. 1.1).

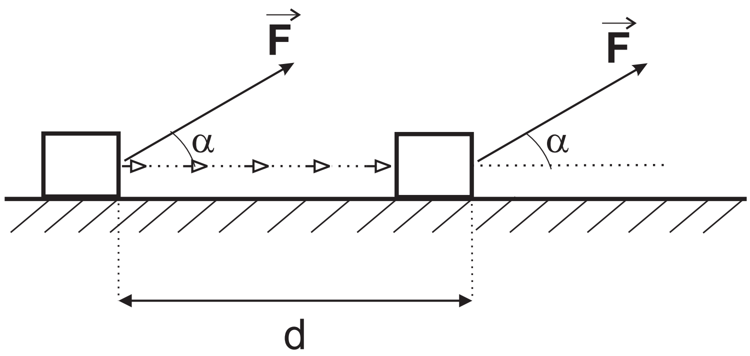


Figura 1.1: Bloco, considerado como partícula, sendo arrastado sobre uma mesa horizontal por uma força constante $\vec{F}$.

Define-se o *trabalho realizado por uma força constante*, $\mathcal{T}$, do seguinte modo,

$$\mathcal{T} = Fd\cos\alpha \tag{1.4}$$

onde F é o módulo da força $\vec{F}$. Se a força $\vec{F}$ atua no mesmo sentido do deslocamento, temos $\alpha = 0°$ e, como $\cos 0° = 1$, teremos,

$$\mathcal{T} = Fd \tag{1.5}$$

A unidade de trabalho no SI é o *joule* cujo símbolo é J (J = N.m).

1.3.5 Energia

A *energia* (E) é um dos conceitos mais importantes da Física e talvez o termo "energia" seja um dos mais empregados em nossa linguagem cotidiana. Na Física, costuma-se introduzir este conceito dizendo que "a energia representa a capacidade de realizar trabalho". A energia é medida com a mesma unidade usada para se medir o trabalho, ou seja, o *joule* (J). Como exemplos de energia podemos citar a energia cinética, energia potencial, energia mecânica, energia térmica, etc.

1.3.6 Potência

A *potência* (P) é uma grandeza definida para se medir a rapidez com que se realiza um certo trabalho. Se uma força realiza um trabalho $\mathcal{T}$ durante um intervalo de tempo Δt, a potência média dessa força é definida como sendo

$$P = \frac{\mathcal{T}}{\Delta t} \tag{1.6}$$

Se, por exemplo, duas pessoas realizam o mesmo trabalho, terá maior potência aquela que realizá-lo no menor tempo. Pela Eq. (1.6) vemos que a unidade de potência no SI é o J/s que recebe o nome de *watt* cujo símbolo é W (W = J/s).

1.3.7 Pressão

A *pressão* é a razão entre o módulo da força perpendicular aplicada sobre uma certa superfície e a área de contato com a superfície. Seja, por exemplo, um objeto cujo peso designado por $\vec{F}$, está apoiado sobre uma superfície plana, como mostra a Fig. 1.2.

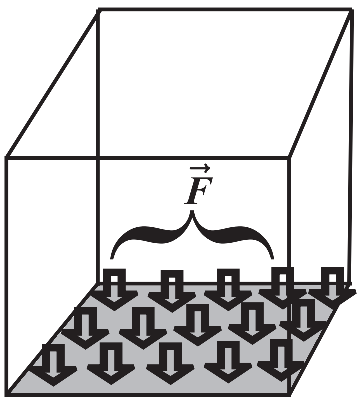


Figura 1.2: Pressão exercida em uma superfície por uma caixa.

Se $\mathcal{A}$ é a área na qual o objeto se apóia, a pressão p provocada pela força peso, sobre a área $\mathcal{A}$ é dada por,

$$p = \frac{F}{\mathcal{A}} \tag{1.7}$$

onde F é o módulo da força $\vec{F}$. Para não confundir o símbolo de pressão com o de potência utilizaremos neste livro P (maiúsculo) para representar a potência e p (minúsculo) para representar a pressão. Deve-se observar da Fig. 1.2 que a compressão que o objeto exerce sobre a superfície, devido ao seu peso, está distribuída em toda a área $\mathcal{A}$ e a força $\vec{F}$, que produz a compressão, é perpendicular à superfície.

Conforme a Eq. (1.7), a unidade de pressão no SI é *newton por metro quadrado* (N/m^2) que é comumente conhecido como pascal (Pa). Vale comentar aqui sobre a *pressão atmosférica*. A pressão atmosférica é a pressão exercida pelo peso do ar. Esta pressão é de aproximadamente $1,01 \times 10^5$ Pa ao nível do mar. Quando um mergulhador está no fundo do mar, o corpo dele fica submetido a uma pressão maior, porque além da pressão atmosférica, existe ainda o peso da coluna de água que está sobre ele e que também exerce pressão. Já um alpinista que sobe uma montanha experimentará uma pressão cada vez menor à medida que sobe; isto porque com o aumento da altitude a massa da coluna de ar sobre seu corpo é cada vez menor, e como a massa de ar é menor o peso que o ar exerce no alpinista também será menor.

A Tabela 1.3 fornece as unidades das principais grandezas derivadas do SI vistas até aqui.

Tabela 1.3: Algumas unidades derivadas do SI

Grandeza	Nome da Unidade	Símbolo
velocidade	metro por segundo	m/s
aceleração	metro por segundo ao quadrado	m/s^2
força	newton	N (= $kg.m/s^2$)
trabalho e energia	joule	J (= $kg.m^2/s^2$)
potência	watt	W (= J/s)
pressão	pascal	Pa (= N/m^2)

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 1-1

Uma partícula num movimento unidimensional sai do ponto A vai até o ponto B e retorna ao ponto A num intervalo de tempo de 10 s, como mostra a Figura 1.3 logo a seguir. A distância entre A e B é de 1 m. Qual a velocidade escalar média da partícula?

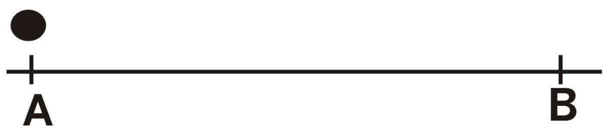


Figura 1.3:

SOLUÇÃO

Como a partícula vai do ponto A até o ponto B e depois retorna ao ponto A, a distância total que ela percorre será o dobro da distância entre os pontos A e B. Logo

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{2 \times 1\text{m}}{10\,\text{s}} = 0,2\,\text{m/s}$$

Exemplo 1-2

Um candelabro de massa 2 kg está suspenso por uma corda que está fixada em um teto. Qual é a tração τ que a corda suporta? Considere g = 9,78 m/s^2.

SOLUÇÃO

A tração na corda será justamente o peso do corpo suspenso, ou seja:

$$\tau = mg = 2\,\text{kg} \times 9,78\,\text{m/s}^2 = 19,56\,\text{N}$$

Exemplo 1-3

Um bloco de concreto está sobre um piso horizontal. Se o bloco possui uma massa de 2 kg e uma área de contato com o piso de 0,2 m^2, qual a pressão exercida pelo bloco no piso? Considere g = 9,78 m/s^2.

SOLUÇÃO

A força que o tijolo exerce sobre o piso é o seu próprio peso mg. Portanto teremos:

$$p = \frac{F}{\mathcal{A}} = \frac{mg}{\mathcal{A}} = \frac{2\,\mathrm{kg} \times 9,78\,\mathrm{m/s^2}}{0,2\,\mathrm{m^2}} = 97,8\,\mathrm{N/m^2} = 97,8\,\mathrm{Pa}$$

$* * * * * * * * * * * * *$

1.4 Notação Científica

Na física frequentemente encontramos números muito grandes ou muito pequenos, os quais são muito incômodos para serem escritos e difíceis de trabalhar sem cometer erros em computação aritmética. Para evitarmos escrever uma grande quantidade de zeros e facilitar os cálculos com grandes ou pequenos números fazemos uso da *notação científica* (também conhecida como *notação exponencial*). A notação científica consiste em escrever certa quantidade como o produto de um número, entre 1 e 10, multiplicado por 10 elevado a alguma potência. Por exemplo:

$$3.560.000.000 \;=\; 3,56 \times 10^9 \;\text{ e }\; 0,000000492 \;=\; 4,92 \times 10^{-7}$$

Para determinarmos o expoente de 10 na notação científica devemos contar o número de ordens decimais que devem ser movidas para produzir o número que precede ao 10. Vejamos como fazer isto:

$$7\,\underbrace{\overleftarrow{02000}}_{5\ ordens} = 7,02 \times 10^5 \quad \text{e} \quad 3\,\underbrace{\overleftarrow{5010000}}_{7\ ordens} = 3,501 \times 10^7$$

$$0,\underbrace{\overrightarrow{000002}}_{6\ ordens}1 = 2,1 \times 10^{-6} \quad \text{e} \quad 0,\underbrace{\overrightarrow{00000009}}_{8\ ordens}7 = 9,7 \times 10^{-8}$$

Observe que o expoente de 10 é positivo quando o decimal é movido para a esquerda e é negativo quando o decimal é movido para a direita.

Outra conveniência, quando utilizamos pequenos ou grandes números, é o uso dos prefixos relacionados na Tabela 1.4. Alguns empregos destes prefixos, como em milímetros, centímetros, quilogramas e megabytes, já são de seu conhecimento. Assim, podemos expressar um determinado intervalo de tempo $2,35 \times 10^{-9}$segundos como $2,35$ nanossegundos ou de forma abreviada $2,35$ ns.

Tabela 1.4: Prefixos mais utilizados

Fator	Prefixo	Símbolo	Fator	Prefixo	Símbolo
10^1	deca	da	10^{-1}	deci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	quilo	k	10^{-3}	milli	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a

PROBLEMAS

1) Escreva em notação científica os seguintes números:
a) 12300000000
b) 0,0721
c) 12
d) 0,00000000000104

2) Expresse, em notação científica:
a) 30 kg em gramas
b) 130 mg em quilogramas
c) 77,8 g em quilogramas
d) 5 km em metros e em centímetros
e) 2 m em quilômetro
f) 270 cm em metros

3) A velocidade de uma partícula é de 340 m/s. Expresse esta velocidade em:
a) cm/s
b) km/s

Capítulo 2

Movimentos Periódicos

2.1 Introdução

A introdução de movimentos periódicos é de grande importância para o estudo do movimento ondulatório que será realizado no próximo capítulo. As noções de período, frequência e amplitude que serão introduzidos aqui serão de grande utilidade nos capítulos seguintes.

2.2 Período e Frequência

Diz-se que um movimento é periódico quando, para um mesmo referencial, se repete identicamente em intervalos de tempos sucessivos e iguais. O termo periódico quer dizer que, depois de um certo lapso de tempo, o sistema recupera sua configuração original e em seguida o movimento começa a se repetir. O movimento, portanto, ocorre em ciclos repetitivos, cada um dos quais exatamente igual a qualquer outro. Movimentos periódicos ocorrem frequentemente na natureza e ocupam uma posição de grande importância na Física. Como exemplos, podemos citar o movimento de rotação da Lua em torno da Terra e o movimento de translação da Terra em torno do Sol. Movimentos periódicos que podem ser descritos em termos de uma única coordenada de distância, como o movimento para cima e para baixo de uma massa suspensa por uma mola vertical, são chamados de movimentos oscilatórios ou vibratórios . O movimento de uma corda de violino, o movimento de um pêndulo oscilando, o movimento dos átomos num sólido são todos exemplos de movimento oscilatório. O movimento periódico pode ser chamado também de *movimento harmônico*.

Quando um corpo executa um movimento, indo e voltando sobre uma mesma trajetória, dizemos que ele está vibrando ou oscilando entre dois pontos. Se o corpo vai de uma posição extrema à outra e retorna a posição inicial, dizemos que ele efetuou uma vibração completa ou um ciclo.

O tempo que um corpo, em movimento periódico, gasta para realizar um ciclo completo é denominado *período* (T) do movimento. Por exemplo, o período de rotação da Lua em torno da Terra é de aproximadamente 28 dias e o de translação da Terra em torno do Sol de 365 dias.

Nos movimentos oscilatórios o número de vibrações completas (ou número de ciclos) N que o corpo realiza por intervalo de tempo decorrido Δt é denominado *frequência* (f) do movimento:

$$f = \frac{N}{\Delta t} \tag{2.1}$$

Devemos notar que para uma única oscilação temos $N = 1$ e $\Delta t = T$, logo podemos escrever que

$$f = \frac{1}{T} \tag{2.2}$$

A unidade de frequência no SI é 1/s. Esta unidade de 1 vibração/s ou 1 ciclo/s foi denominada hertz (1 hertz = 1/s), em homenagem a Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), famoso físico alemão do século XIX. Se o corpo oscila com uma frequência f, podemos obter da equação (2.2) que o seu período de vibração (T) será dado por

$$T = \frac{1}{f} \tag{2.3}$$

Desta relação, podemos concluir que quanto maior for a frequência com que o corpo oscila menor será o seu período e vice-versa. Usando a equação (2.1) poderíamos ainda escrever a equação (2.3) como

$$T = \frac{\Delta t}{N} \tag{2.4}$$

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 2-1

A Terra executa uma volta completa em torno do Sol em aproximadamente 365 dias. (a) Qual o período do movimento? (b) Qual a frequência do movimento?

SOLUÇÃO:

(a) O período do movimento é o tempo necessário para executar um ciclo completo. O período será portando de 365 dias. No sistema SI: $T = 365 \times 24 \times 60 \times 60\,\mathrm{s} = 31536000\,\mathrm{s}$.

(b) Para encontrarmos a frequência do movimento vamos utilizar a Eq. (2.2)

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{31536000\,\mathrm{s}} \simeq 3,17 \times 10^{-8}\,\mathrm{Hz}$$

Exemplo 2-2

Um corpo executa dez oscilações completas em um intervalo de tempo de 20 segundos. (a) Qual a frequência do movimento? (b) Qual o período do movimento?

SOLUÇÃO:

(a) Utilizemos a Eq. (2.1)

$$f = \frac{N}{\Delta t} = \frac{10}{20\ \mathrm{s}} = 0,5\,\mathrm{Hz}$$

(b) Para encontrarmos o período do movimento vamos utilizar a Eq. (2.4)

$$T = \frac{\Delta t}{N} = \frac{20\,\mathrm{s}}{10} = 2\,\mathrm{s}$$

Exemplo 2-3

Um corpo executa um movimento periódico com uma frequência de 10 Hz. Quantas oscilações este corpo executa em um intervalo de tempo de 10 segundos?

SOLUÇÃO:

Utilizemos a Eq. (2.1)

$$f = \frac{N}{\Delta t} \Rightarrow N = f \cdot \Delta t = 10\,\mathrm{Hz} \cdot 10\,\mathrm{s} = 100$$

* * * * * * * * * * * * *

2.3 Exemplos de Osciladores

2.3.1 Pêndulo Simples

Um pêndulo simples (veja Figura 2.1) é um fio inextensível de massa desprezível fixado em uma de suas extremidades e com um corpo de massa m preso à sua outra extremidade. Quando retirado de sua posição de equilíbrio e solto o pêndulo começa a oscilar.

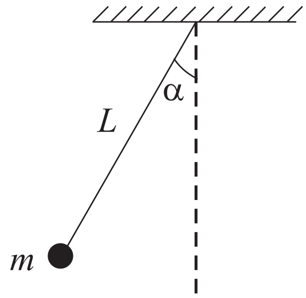


Figura 2.1: Pêndulo simples.

A *amplitude do movimento* será a distância entre a posição de equilíbrio e a posição extrema ocupada pelo corpo que oscila. É possível demonstrar que o período de oscilação de um pêndulo simples oscilando com pequena amplitude ($\alpha \leq 15°$) é dado pela expressão

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \ , \tag{2.5}$$

onde L é o comprimento do pêndulo simples e g é a aceleração da gravidade local.

A expressão (2.5) nos mostra que: quanto maior for o comprimento L do pêndulo, maior será o seu período; quanto maior for a aceleração da gravidade no local onde o pêndulo oscila, menor será o seu período; o período não depende da massa m do pêndulo.

2.3.2 Oscilador Harmônico Linear Simples

Um bloco de massa m conectado a uma mola está inicialmente em repouso na posição x_0, sobre um piso horizontal sem atrito (veja Figura 2.2).

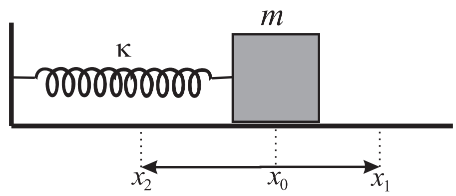


Figura 2.2: Oscilador harmônico linear.

O bloco é então deslocado de sua posição inicial até o ponto x_1 esticando-se é claro a mola. O bloco é então solto. Este irá, então, se movimentar entre os pontos x_1 e x_2, sendo $|x_1| = |x_2|$. A amplitude A do movimento será o módulo do deslocamento máximo realizado pelo movimento, ou seja $A = |x_1| = |x_2|$. Este constitui um exemplo de um *oscilador harmônico linear*. Neste caso é possível demonstrar que o período de seu movimento é

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\kappa}}\ , \tag{2.6}$$

onde T é o período (ou seja, o tempo necessário para que o objeto realize um ciclo completo), m é a massa do objeto que está oscilando e κ é a constante elástica da mola. Observe que neste caso, ao contrário do pêndulo, o período depende da massa do corpo que oscila: quanto maior a massa maior será o período do pêndulo.

Nos sistemas que se comportam como osciladores sempre existe uma força que tende a retornar o objeto oscilante para a sua posição de equilíbrio. Esta força é chamada de *força restauradora*. No caso do pêndulo a força restauradora está associada à gravidade e no caso do oscilador harmônico simples a força restauradora está associada às propriedades elásticas da mola.

$* * * * * * * * * * * * *$

Exemplo 2-4
Um pêndulo simples possui um comprimento de 2 m. Qual o seu período de oscilação? Adote $g = 9{,}78$ m/s^2.
SOLUÇÃO:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2 \times 3,14\sqrt{\frac{2\,\mathrm{m}}{9,78\,\mathrm{m/s^2}}} \simeq 2,84\,\mathrm{s}$$

Exemplo 2-5
Um bloco de 1 kg está preso à extremidade de uma mola que possui uma constante elástica de 3 N/m. Qual o período de oscilação do movimento?
SOLUÇÃO:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\kappa}} = 2 \times 3,14\sqrt{\frac{1\,\mathrm{kg}}{3\,\mathrm{N/m}}} \simeq 3,62\,\mathrm{s}$$

Exemplo 2-6
Seja um pêndulo simples cujo período é igual a 0,5 s. Qual a frequência f do pêndulo?
SOLUÇÃO:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,5\mathrm{s}} = 2\frac{1}{\mathrm{s}} = 2\,\mathrm{Hz}$$

$* * * * * * * * * * * * *$

2.4 Oscilações Amortecidas

Quando o movimento de um oscilador é reduzido por uma força externa dizemos que o movimento é *amortecido*. Na prática todos os movimentos oscilatórios são amortecidos por algum tipo de força. O movimento de um pêndulo oscilando no ar, por exemplo, vai lentamente diminuindo porque o ar exerce uma força viscosa sobre o pêndulo. Já o movimento de um bloco conectado a uma mola será amortecido pelo ar e também pela força de atrito existente entre o bloco e o piso. Para um oscilador amortecido a energia mecânica não é constante e decresce com o decorrer do tempo.

2.5 Oscilações Forçadas

As oscilações naturais (ou próprias) de um corpo são aquelas que ocorrem quando o corpo é deslocado e depois abandonado, oscilando livremente. Agora, quando o corpo está sujeito a uma força externa oscilatória, a oscilação resultante do corpo é denominada *oscilação forçada* e terá a mesma frequência da força externa e não a sua frequência natural de oscilação. A resposta do corpo a uma força externa oscilatória dependerá da relação entre a sua frequência natural de oscilação e a frequência aplicada. Teremos agora neste caso duas frequências:

i) A frequência natural do sistema, f_0, que é a frequência na qual o sistema iria oscilar se fosse deslocado e depois deixado livremente a oscilar, e ii) a frequência, f, da força externa.

Um exemplo de oscilação forçada é a que ocorre quando uma pessoa empurra outra em um balanço. Outro exemplo de oscilação forçada é quando uma tropa de soldados marcha de forma cadenciada por sobre uma ponte. A sucessão de pisadas cadenciadas na ponte fará com que ela oscile não com sua frequência natural, mas sim com a frequência da força externa que lhe é aplicada. Uma sucessão de pequenos impulsos gerados por uma força externa aplicada a um corpo, pode provocar grandes amplitudes de movimento. Existe um valor característico da frequência externa para o qual a amplitude de oscilação atinge um valor máximo. Esta condição é chamada de *ressonância* e o valor da frequência externa para o qual a ressonância acontece é chamada de *frequência de ressonância*. Esta condição de ressonância ocorre quando $f \approx f_0$. Uma soprano quando quebra uma taça de cristal está usando o princípio de ressonância.

No caso da construção de um prédio industrial, por exemplo, deve-se saber que tipo de máquina irá funcionar em seu interior e quais as frequências naturais da estrutura do prédio para evitar que as frequências naturais de oscilação do prédio coincidam com as das máquinas que irão funcionar naquele local.

QUESTIONÁRIO

1) O que é um movimento oscilatório?

2) Cite exemplos de movimentos vibratórios (ou oscilatórios) que você já teve oportunidade de observar.

3) O que é um ciclo?

4) O que é frequência?

5) O que é período?

6) O que é a amplitude de um movimento oscilatório?

7) Se a frequência de um movimento periódico aumenta o que acontece com o seu período?

8) O que é uma oscilação forçada?

9) O que é ressonância?

10) O que é uma oscilação amortecida?

PROBLEMAS

1) A Lua executa uma volta completa em torno da Terra em aproximadamente 28 dias. (a) Qual o período do movimento nos SI? (b) Qual a frequência do movimento?

2) Em uma experiência com um pêndulo simples verificou-se que o corpo suspenso realizava 10 oscilações completas em 5 segundos. (a) Qual é o período do pêndulo? (b) Qual é a frequência de oscilação do pêndulo?

3) Um bloco preso a extremidade de uma mola executa 4 ciclos num intervalo de tempo de 8 segundos. (a) Qual é o período do movimento? (b) Qual é a frequência do movimento?

4) Se um corpo, em movimento periódico, oscila com uma frequência de 2 hertz, qual o seu período de vibração?

5) Se um corpo, em movimento periódico, oscila com um período de 0,25 segundos, qual é o número de vibrações completas que o corpo efetua por unidade de tempo?

6) Um pêndulo possui um comprimento de 120 centímetros. Considerando a gravidade de 9,78 m/s^2, determine: (a) o período de oscilação do pêndulo e (b) a frequência do pêndulo.

7) Um bloco cuja massa é de 800 gramas oscila preso a uma mola de constante elástica de 4 N/m (veja Fig. 2.2). Determine: (a) o período e (b) a frequência de oscilação.

Capítulo 3

Movimento Ondulatório

3.1 Onda

Podemos definir uma onda como sendo uma perturbação que se propaga, carregando consigo momento, energia e informação. Toda onda possui uma certa variável física que oscila, sendo esta oscilação transmitida sucessivamente. Por esta razão foi importante termos tratado no Capítulo 2 sobre as oscilações. As propriedades do movimento ondulatório são muito importantes para o entendimento do funcionamento do aparelho auditivo e da produção da fala.

3.2 Ondas em uma Corda

Para um entendimento preliminar sobre ondas tomaremos como exemplo ilustrativo nesta seção as ondas geradas em uma corda elástica.

A Figura 3.1(a) nos mostra uma corda longa, presa em uma de suas extremidades a uma parede e esticada horizontalmente por uma pessoa. Se esta pessoa movimentar sua mão para cima e, depois, para baixo, voltando à posição original, verifica-se que uma perturbação, ou *pulso*, propaga-se ao longo da corda, com uma certa velocidade, como procuramos mostrar na Figura 3.1(b).

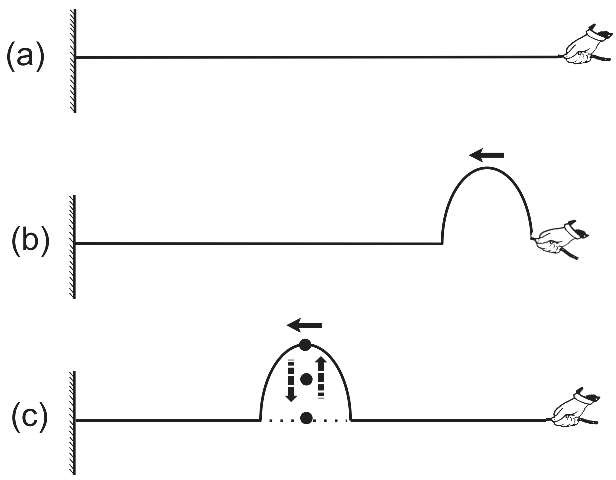


Figura 3.1: Pulso criado em uma corda esticada.

Se fixarmos nossa atenção para um determinado ponto da corda (por exemplo, marcando este ponto com tinta), verificaremos que este ponto se desloca para cima e para baixo enquanto o pulso passa por ele. Devemos salientar que é apenas a perturbação (ou pulso) que se desloca ao longo da corda, enquanto seus pontos simplesmente sobem e descem à medida que o pulso passa por eles, como mostrado na Figura 3.1(c). Verificamos, então, que a oscilação (o sobe e desce da corda) está sendo transmitida ao longo da corda, e a velocidade com que esta oscilação é transmitida ao longo da corda será a velocidade de propagação da onda.

Imaginemos, agora, que a pessoa, ao segurar a corda, movimentasse sua mão continuamente para cima e para baixo da posição inicial, com uma certa frequência constante. Neste caso teremos uma série de pulsos (ou trem de ondas) propagando-se ao longo da corda como mostra a Figura 3.2. Dizemos que esta série de pulsos, como mostrado na Fig. 3.2, constitui uma onda propagando-se na corda. Os pontos mais altos dos pulsos são denominados *cristas* da onda e os pontos mais baixos dos pulsos são denominados *vales* da onda. A frequência desta onda será a mesma frequência da fonte oscilante. Neste caso a fonte oscilante é a mão da pessoa que segura a corda em uma de suas extremidades.

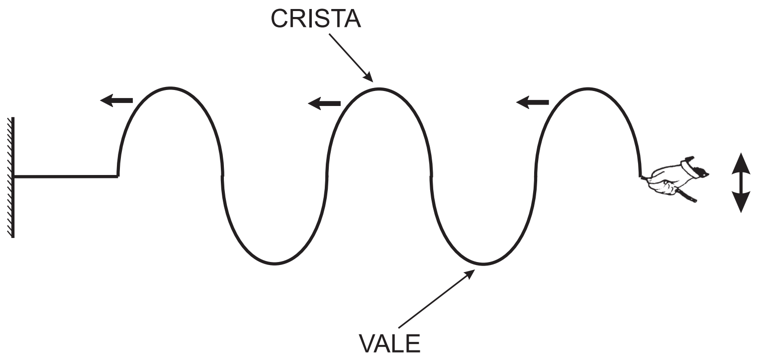


Figura 3.2: Propagação de pulsos em uma corda.

Um ponto qualquer do meio material (no caso a corda), ao ser atingido pela onda, inicia um movimento vibratório, oscilando enquanto a onda passa por ele. A amplitude e a frequência de vibração deste ponto definem a amplitude e a frequência da onda, isto é, a amplitude e a frequência de uma onda são a amplitude e a frequência das vibrações de um ponto do meio no qual ela se propaga.

Numa onda, a informação e a energia se deslocam de um ponto para outro, sem que qualquer objeto material se propague junto com a onda. Por exemplo, o ponto da corda mostrado na Fig. 3.1(c), que é um elemento de massa da corda, não se desloca no sentido horizontal para a esquerda indo de encontro à parede. Ele apenas sobe e desce no sentido vertical. O que se propaga é apenas a perturbação.

3.3 Classificação das Ondas

As ondas podem ser classificadas de diferentes modos de acordo com suas propriedades. Dentre estas classificações estão as seguintes:

a) Quanto à Natureza

Ondas mecânicas - Os dois aspectos centrais dessas ondas é que elas são governadas pelas Leis de Newton e precisam de um meio material deformável ou elástico para se propagarem. Este meio material pode ser, por exemplo, o ar, a água, uma corda esticada, uma barra de aço, etc. A perturbação é transmitida sucessivamente de um ponto a outro. As partículas do meio vibram próximas a seu ponto de equilíbrio sem se deslocar como um todo. Como as ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagarem elas não se propagam no vácuo. São exemplos de ondas mecânicas o som, ondas numa mola ou corda, ondas na água, etc.

Ondas eletromagnéticas - São ondas que não necessitam de um meio material para se propagarem, podendo viajar livremente através do espaço vazio. A mais conhecida onda eletromagnética é a luz. Os raios X e as microondas também são exemplos de ondas eletromagnéticas. Todas as ondas eletromagnéticas viajam através do vácuo com a mesma velocidade c, dada por: $c \simeq 3 \times 10^8$m/s. Nas ondas eletromagnéticas as variáveis físicas que oscilam são os campos elétricos e magnéticos.

Ondas materiais - Sob certas condições, partículas subatômicas podem apresentar propriedades semelhantes às das ondas. Estas ondas são governadas pelas leis da Física Quântica.

b) Quanto à Dimensão

Ondas unidimensionais - Quando se propagam em uma só direção ou segundo a direção de um único eixo. Ex.: onda numa corda, onda numa mola.

Ondas bidimensionais - Quando se propagam em duas dimensões ou em um plano formado por dois eixos. Ex.: quando se solta uma pedra em uma bacia com água formam-se ondas circulares em sua superfície.

Ondas tridimensionais - Quando se propagam em todas as direções, isto é, no espaço. Ex.: onda sonora.

c) Quanto a Direção de Propagação e Vibração

Onda transversal - Em uma onda transversal, os pontos do meio no qual a onda se propaga vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda. Um exemplo é o movimento ondulatório mostrado na Fig. 3.2, onde os pontos da corda vibram para cima e para baixo enquanto a onda se propaga, para a esquerda, ao longo da corda.

Onda longitudinal - Em uma onda longitudinal, os pontos do meio no qual a onda se propaga vibram paralelamente à direção de propagação da onda. Se uma pessoa movimentar para frente e para trás a extremidade de uma mola esticada, dando a esta extremidade um movimento oscilatório na direção da própria mola, verificaremos que uma perturbação, constituída por uma série de "compressões" e "rarefações", propaga-se ao longo da mola (veja Fig. 3.3), sendo esta uma onda longitudinal.

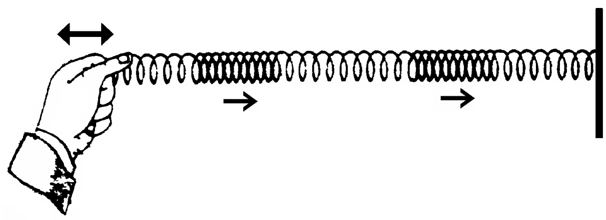
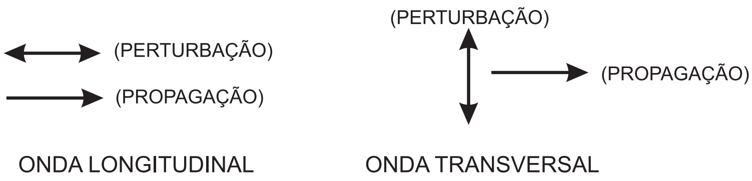


Figura 3.3: Compressões propagando-se ao longo de uma mola.

Resumindo:



Existem, no entanto, algumas ondas que não são nem exclusivamente longitudinais e nem exclusivamente transversais. Estas ondas são conhecidas como *ondas mistas*. Um exemplo de onda mista são as ondas que se propagam na superfície da água. As partículas da água descrevem trajetórias elípticas enquanto a onda se propaga como mostra a Figura 3.4.

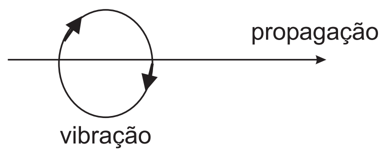


Figura 3.4: Onda mista.

3.4 Equação de uma Onda Progressiva

Uma onda deslocando numa corda esticada pode assumir muitas formas, mas a propriedade fundamental para cada onda é o seu *comprimento de onda* λ (lâmbda) e a sua *frequência* f. O comprimento de onda é a distância que a onda percorre durante um período T, isto é, o comprimento de onda de uma onda, é a distância mais curta, na qual o padrão da onda (sendo t mantido constante) repete-se completamente. A frequência é o número de oscilações transversais por unidade de tempo que qualquer elemento da corda sofre devido à passagem da onda. A frequência da onda é a frequência da fonte oscilante (no caso das Figuras 3.2 e 3.3 a fonte oscilante é a mão da pessoa).

Definimos uma forma de onda através da relação, $y = f(x,t)$, de um elemento da corda em função da posição x e do tempo t, daquele elemento ao longo da corda. Para um estudo específico, iremos escolher a onda da Figura 3.5 gerada pelo movimento de uma das extremidades da corda, transversalmente, em movimento periódico.

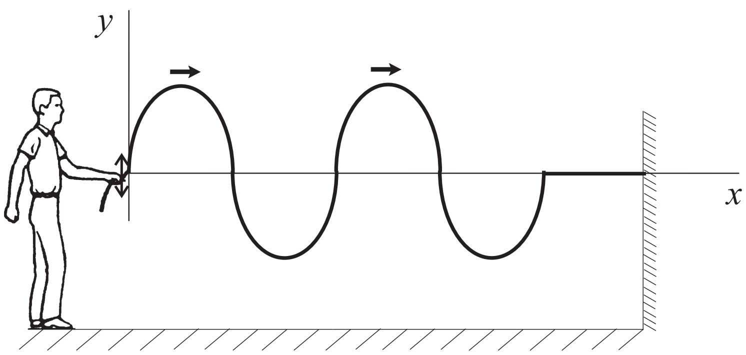


Figura 3.5: Onda transversal em uma corda.

Escrevemos para a relação entre o deslocamento transversal y de qualquer elemento da corda na posição x e no tempo t:

$$y(x,t) = A\text{sen}(kx - \omega t)\,, \tag{3.1}$$

onde k e ω são constantes e A é a amplitude da onda, sendo a amplitude o deslocamento máximo de y. Em alguns textos a amplitude A é representada por y_m onde o subscrito m indica máximo. A quantidade $(kx-\omega t)$ é conhecida como *fase da onda*. O significado físico das quantidades k e ω será discutido na seção 3.6. Podemos escrever também para a equação do deslocamento a forma $y(x,t) = A\text{sen}(kx + \omega t)$. A diferença entre usar um sinal negativo ou positivo no argumento da função seno será analisada na seção 3.5. Outra forma aceitável para o deslocamento y é $y(x,t) = A\cos(kx - \omega t)$, porém a forma apresentada na Eq. (3.1) é a mais usual.

Todas as formas de onda, incluindo o pulso da Figura 3.1, podem ser construídas pela soma das ondas senoidais (Eq. 3.1) cujos comprimentos de onda e amplitudes de onda devem ser cuidadosamente selecionados para se obter a forma de onda desejada. Dessa forma, o entendimento das ondas senoidais é a chave para o entendimento de ondas de qualquer forma.

As variáveis x e t que aparecem na equação (3.1) estendem-se de $-\infty$ a $+\infty$, ou seja, elas não possuem limites. Isto quer dizer que a equação descreve uma onda numa corda de comprimento infinito, existindo para todo o tempo, desde um passado distante a um futuro longínquo distante. Na prática, são consideradas apenas variações razoavelmente pequenas de cada variável.

3.5 Sentido de Propagação de uma Onda

Como vimos na seção anterior, a equação de uma onda pode ser expressa por

$$y(x,t) = A\text{sen}(kx - \omega t) \tag{3.2}$$

ou por

$$y(x,t) = A\text{sen}(kx + \omega t) \tag{3.3}$$

Mas qual o significado físico em se usar o sinal positivo ou negativo? Vejamos o primeiro caso. Façamos $kx - \omega t$ igual a uma certa quantidade alfa, ou seja

$$kx - \omega t = \alpha\,.$$

Isolando x nesta equação temos:

$$x = \frac{\alpha}{k} + \frac{\omega t}{k} \tag{3.4}$$

Notamos na equação (3.4) que com o transcorrer do tempo, ou seja, quando o tempo t cresce x também cresce. Isto significa que a onda está se deslocando no sentido de x crescente (para a direita) como mostra a Figura 3.6(a).

Vejamos agora o segundo caso. Façamos $kx + \omega t$ igual à quantidade α e teremos:

$$kx + \omega t = \alpha\,.$$

Isolando x nesta última expressão ficamos com:

$$x = \frac{\alpha}{k} - \frac{\omega t}{k} \tag{3.5}$$

Vemos agora da Eq. (3.5) que com o transcorrer do tempo, ou seja, quando o tempo t cresce x diminui. Isto significa que a onda está se deslocando no sentido de x decrescente (para a esquerda) como mostra a Figura 3.6(b).

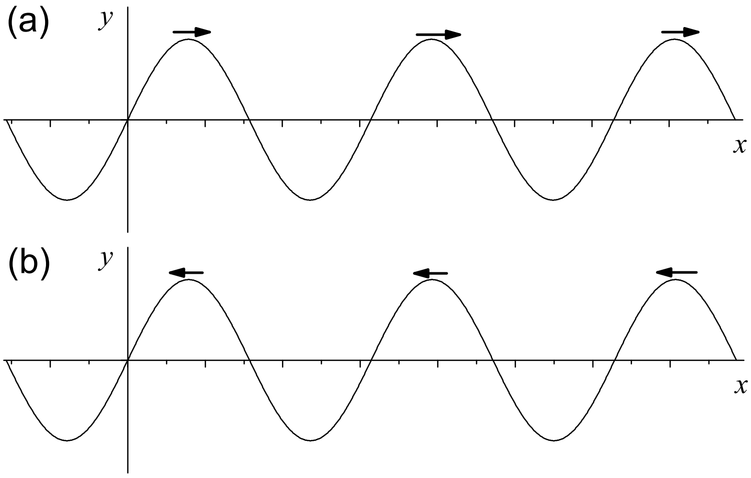


Figura 3.6: (a) Onda deslocando no sentido de x crescente e (b) de x decrescente.

Resumindo, a equação de uma onda pode ser escrita como:

$$y(x,t) = A\text{sen}(kx \pm \omega t) \tag{3.6}$$

sendo

$$y(x,t) = A\text{sen}(kx - \omega t), \ (x \ \text{ crescendo}) \tag{3.7}$$

$$y(x,t) = A\text{sen}(kx + \omega t), \ (x \ \text{ decrescendo}) \tag{3.8}$$

3.6 Número de Onda e Frequência Angular

Na Fig. 3.7(a) mostramos como o deslocamento transversal $y(x,t)$ da Eq. (3.6) varia em relação à posição x num tempo determinado, escolhido com $t = 0$, isto é, a figura é um "instantâneo" da onda naquele momento. Com esta restrição a Eq. (3.6) torna-se

$$y(x,0) = A\text{sen}(kx)\,,$$

que por simplicidade escreveremos como

$$y(x) = A\text{sen}(kx) \tag{3.9}$$

Um típico intervalo de comprimento de onda é mostrado na Figura 3.7(a), onde o comprimento de onda é $\lambda = x_2 - x_1$. Podemos notar pela Figura 3.7(a) que nos pontos x_1 e x_2 a função $y(x)$ possui o mesmo valor, ou seja: $y(x_1) = y(x_2)$

Utilizando a equação (3.9) podemos escrever esta igualdade como

$$A\text{sen}(kx_1) = A\text{sen}(kx_2)\,.$$

Simplificando a constante A que aparece nos dois lados da igualdade:

$$\text{sen}(kx_1) = \text{sen}(kx_2)$$

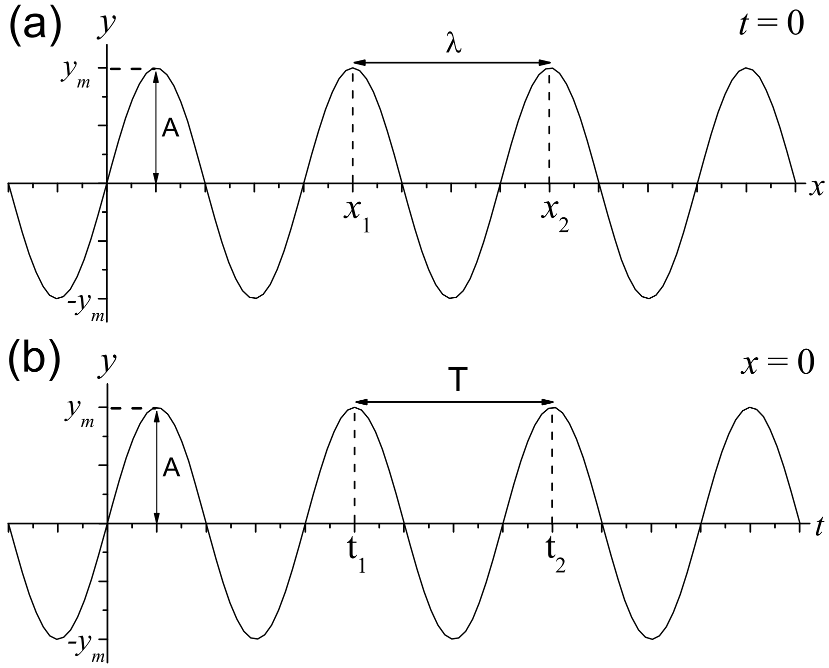


Figura 3.7: (a) Deslocamento para $y(x) = A\text{sen}(kx)$ e (b) deslocamento para $y(t) = A\text{sen}(\omega t)$.

Como $\lambda = x_2 - x_1$, podemos escrever que $x_2 = \lambda + x_1$ e a equação anterior fica

$$\text{sen}(kx_1) = \text{sen}(kx_1 + k\lambda) \tag{3.10}$$

A função *seno* se repete primeiramente quando o ângulo é acrescido de 2π radianos, de forma que a equação (3.10) será verdadeira se $k\lambda = 2\pi$, ou

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \, , \tag{3.11}$$

sendo k conhecido como *número de onda angular* da onda. A relação apresentada na Eq. (3.11) dá sentido físico à quantidade k que aparece na equação (3.6). A unidade de k no SI é o radiano por metro (rad/m).

Passamos agora nossa análise para a Fig. 3.7(b) que mostra como o deslocamento y da Eq. (3.6) varia com o tempo t, numa posição fixa dada, por exemplo em $x = 0$.

Se você se colocasse nesta posição (em $x = 0$) e observasse o movimento da corda através de uma abertura vertical feita num cartão, o movimento de apenas um "ponto" da corda seria revelado. Seu movimento para cima e para baixo na direção y seria dado segundo a equação (3.6) por

$$y(0, t) = A\text{sen}(\pm\omega t)$$

onde foi tomado $x = 0$ na equação (3.6). Como $\text{sen}(-\alpha) = -\text{sen}(\alpha)$ esta última equação pode ser escrita como:

$$y(t) = \pm A\text{sen}(\omega t) \tag{3.12}$$

onde simplificamos a notação de $y(0, t)$ para $y(t)$ apenas.

Um típico intervalo de período da onda é mostrado na Figura 3.7(b), onde o período da onda é $T = t_2 - t_1$. Podemos notar pela Figura 3.7(b) que nos pontos t_1 e t_2 a função $y(t)$ possui o mesmo valor, ou seja:

$$y(t_1) = y(t_2)$$

Utilizando a equação (3.12) podemos reescrever esta última equação como

$$\pm A\text{sen}(\omega t_1) = \pm A\text{sen}(\omega t_2)$$

Simplificando a constante A que aparece nos dois lados da igualdade:

$$\text{sen}(\omega t_1) = \text{sen}(\omega t_2)$$

Como $T = t_2 - t_1$, podemos escrever que $t_2 = T + t_1$ e a equação anterior fica

$$\text{sen}(\omega t_1) = \text{sen}(\omega t_1 + \omega T) \tag{3.13}$$

Como já dissemos anteriormente a função *seno* se repete primeiramente quando o ângulo é acrescido de 2π radianos, de forma que a equação (3.13) será verdadeira se $\omega T = 2\pi$, ou

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \,, \tag{3.14}$$

sendo ω conhecido como *frequência angular* da onda, o que dá significado físico à quantidade ω que aparece na equação (3.6). A unidade de frequência angular no SI é o radiano por segundo (rad/s). Lembrando que o período da onda pode ser escrito em termos da frequência da onda como $T = 1/f$, a equação (3.14) pode ainda ser escrita como

$$\omega = 2\pi f \tag{3.15}$$

* * * * * * * * * * * * *

<u>*Exemplo 3-1*</u>
Uma onda senoidal é descrita por $y(x,t) = 0,03\text{sen}(72x - 8t)$, na qual as constantes numéricas estão no SI. (a) Qual a amplitude desta onda? (b) Qual o número de onda angular desta onda? (c) Qual a frequência angular desta onda? (d) Qual o comprimento de onda da onda? (e) Qual o período desta onda? (f) Qual é a frequência desta onda?
SOLUÇÃO:
(a) Por comparação com a Eq. (3.7), notamos que: A = 0,03 m = 3 cm.
(b) Por comparação com a Eq. (3.7), temos que: k = 72 rad/m.
(c) Por comparação com a Eq. (3.7), observamos que: ω = 8 rad/s.
(d) Da Eq. (3.11), temos

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{72} \simeq 0,087\,\text{m}$$

(e) Da Eq. (3.14), podemos obter o período em função da frequência angular

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{8} \simeq 0,785\,\text{s}$$

(f) Da Eq. (3.15), obtemos:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{8}{2\pi} \simeq 1,27\,\text{Hz}$$

* * * * * * * * * * * * *

3.7 Velocidade das Ondas Progressivas

Entendemos por ondas progressivas aquelas que se deslocam (para a esquerda ou direita) com o decorrer do tempo. Na Figura 3.8 mostramos a onda da Eq. (3.7) em dois instantes t_1 e t_2, ou seja, em um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$. A onda está caminhando em direção crescente de x (para a direita da Fig. 3.8) com uma configuração completa da onda deslocando-se de uma distância Δx durante o intervalo Δt. Fica claro que $\Delta x = x_2 - x_1$. A razão $\Delta x/\Delta t$ é a velocidade da onda. Como podemos encontrar seu valor?

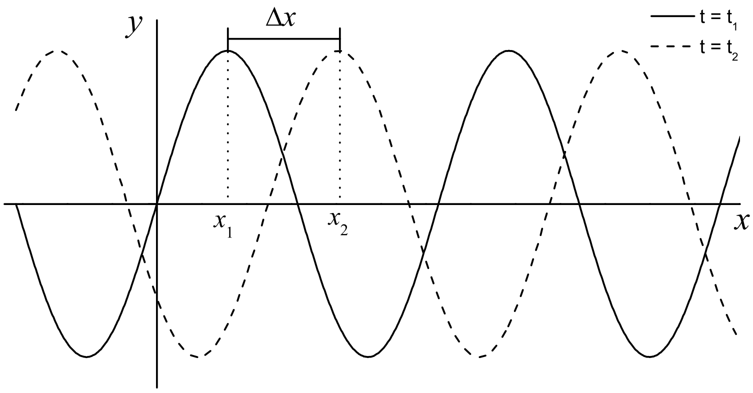


Figura 3.8: Onda deslocando na direção crescente de x.

Utilizando a Eq. (3.4), que é a expressão do deslocamento longitudinal de uma onda que se desloca para a direita (sentido crescente de x). Tomando a Eq. (3.4) para os instante $t = t_1$ e $t = t_2$ obtemos duas equações:

$$x_1 = \frac{\alpha}{k} + \frac{\omega t_1}{k} \;, \tag{3.16}$$

e

$$x_2 = \frac{\alpha}{k} + \frac{\omega t_2}{k} \;, \tag{3.17}$$

respectivamente. Façamos agora a diferença entre estas duas equações, (3.17) – (3.16):

$$x_2 - x_1 = \frac{\alpha}{k} + \frac{\omega t_2}{k} - \frac{\alpha}{k} - \frac{\omega t_1}{k}$$

Simplificando e colocando ω/k em evidência temos

$$x_2 - x_1 = \frac{\omega}{k}(t_2 - t_1)\,.$$

Lembrando que $\Delta x = x_2 - x_1$ e que $\Delta t = t_2 - t_1$ esta última equação pode ser reescrita como

$$\Delta x = \frac{\omega}{k}\Delta t \;\text{ ou }\; \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\omega}{k}\,,$$

sendo a velocidade definida como $v = \Delta x/\Delta t$, temos finalmente

$$v = \frac{\omega}{k} \tag{3.18}$$

A Eq. (3.18) nos dá então a velocidade com que a onda se propaga. Esta quantidade é positiva, indicando que a onda está viajando na direção crescente de x, isto é, para a direita na Fig. 3.8. Se na dedução da equação para a velocidade da onda tivéssemos utilizado a Eq. (3.5), que é a expressão do deslocamento longitudinal de uma onda que se desloca para a esquerda (sentido decrescente de x) teríamos obtido o seguinte resultado:

$$v = -\frac{\omega}{k} \, , \tag{3.19}$$

onde o sinal menos indica que a onda está viajando na direção decrescente de x, isto é, para a esquerda. O leitor pode deduzir a Eq. (3.19) seguindo o mesmo processo utilizado para determinar a Eq. (3.18).

A Eq. (3.18) pode ser expressa de uma maneira alternativa. Fazendo uso da Eq. (3.11) ($k = 2\pi/\lambda$) e da Eq. (3.14) ($\omega = 2\pi/T$), podemos escrever, para a velocidade da onda,

$$v = \frac{2\pi/T}{2\pi/\lambda} \, ,$$

que depois de simplificada se torna

$$v = \frac{\lambda}{T} \tag{3.20}$$

Como $f = 1/T$, outra forma alternativa seria

$$v = \lambda f \tag{3.21}$$

A Eq. (3.20) nos diz que a onda se desloca de um comprimento de onda em um período de oscilação.

Um caso especial e de grande interesse é uma onda se deslocando em uma corda. Pode ser demonstrado que a velocidade de propagação de uma onda numa corda ideal esticada, como a da Fig. 3.2, depende somente das características da corda e não da frequência da onda. Esta velocidade é expressa pela seguinte equação:

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \, , \tag{3.22}$$

onde τ é a *tensão* (ou tração) na corda e μ é a *densidade linear de massa* da corda, sendo definida como

$$\mu = \frac{m}{L} \, , \tag{3.23}$$

onde m e L são, respectivamente, a massa e o comprimento da corda. A unidade de μ no sistema internacional é kg/m. Percebemos da Eq. (3.22) que a velocidade de uma onda numa corda é caracterizada por dois aspectos: um *elástico* e outro *inercial*. A parte elástica da corda é representada pela tensão τ na corda, pois não seria possível gerar uma onda numa corda esticada se esta corda não pudesse se esticar ainda mais. A parte inercial da corda é representada pela sua densidade linear μ, já que esta é a sua massa por comprimento. Ressaltamos aqui que todo meio em que se propagar uma onda mecânica existirá um aspecto elástico e outro inercial. A frequência da onda na corda esticada é fixada pelo agente que cria a onda (por exemplo, a mão da pessoa na Fig. 3.2). Poderemos determinar o comprimento de onda da onda na corda através da equação $v = \lambda f$.

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 3-2

Uma onda senoidal progressiva se desloca no sentido de x crescente. Sabendo-se que esta onda possui uma amplitude de 5 mm, uma velocidade de 340 m/s e um comprimento de onda de 34 cm qual é a equação desta onda? Dê a resposta no SI.

SOLUÇÃO:

A equação de uma onda que se desloca no sentido de x crescente é (veja Eq. (3.7))

$$y(x,t) = A\text{sen}(kx - \omega t)$$

Temos que: $A = 5$ mm $= 0{,}005$ m. O valor do número de onda k pode ser obtido com o uso da Eq. (3.11)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{0,34\,\text{m}} \simeq 18,5\,\text{rad/m}$$

Da Eq. (3.18) temos

$$v = \frac{\omega}{k} \Rightarrow \omega = v \cdot k = (340\,\text{m/s}) \cdot (18,47\,\text{rad/m}) \simeq 6280\,\text{rad/s}$$

Substituindo os valores de A, k e ω na equação de onda temos finalmente:

$$y(x,t) = 0,005\text{sen}(18,5x - 6280t)$$

* * * * * * * * * * * * *

3.8 Fenômenos Ondulatórios

3.8.1 Princípio de Superposição

Pode acontecer que duas ou mais ondas passem numa mesma região do espaço ao mesmo tempo. Seja, por exemplo, duas ondas 1 e 2 se deslocando simultaneamente ao longo de uma mesma corda esticada. O deslocamento da corda quando ambas as ondas atuam será

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) \tag{3.24}$$

onde $y_1(x,t)$ e $y_2(x,t)$ são os dois deslocamentos que a corda experimentaria se cada onda agisse separadamente. Este é um exemplo do *princípio de superposição*, um princípio largamente utilizado na Física, que se observa com bastante frequência em Acústica.

As Figuras 3.9 e 3.10 mostram dois pulsos, gerados nas extremidades de uma corda, em três instantes t_1, t_2 e t_3. Os pulsos se propagam em sentidos opostos. No instante t_1 os pulsos são produzidos. No instante t_2 eles se encontram e se superpõem, sendo que neste instante podemos aplicar o princípio de superposição (Eq. 3.24). No instante t_3, após os dois pulsos terem se encontrado, cada pulso continua se propagando em seu sentido original com a mesma velocidade, mesma amplitude e mesma frequência. É como se nada tivesse acontecido. No ponto onde as duas ondas se encontraram (no mesmo tempo e espaço) dizemos que ouve uma *interferência*. O fenômeno de interferência acontece com todos os tipos de ondas. O fenômeno de interferência é exclusivo do movimento ondulatório.

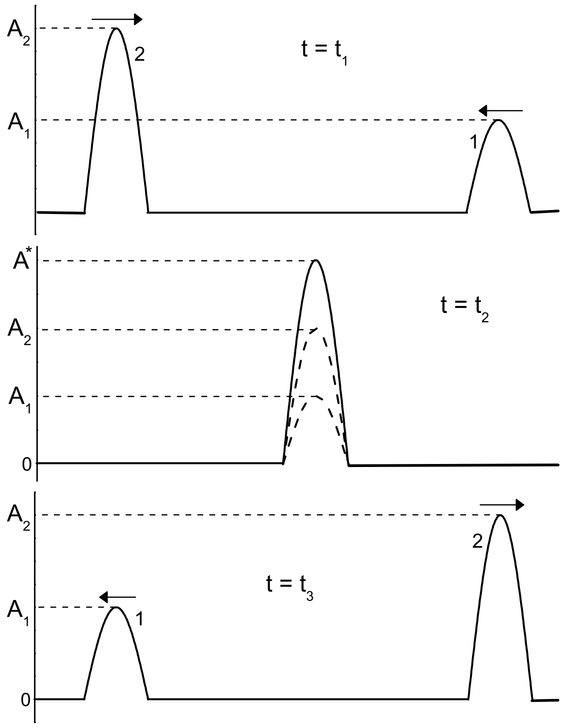


Figura 3.9: Interferência construtiva.

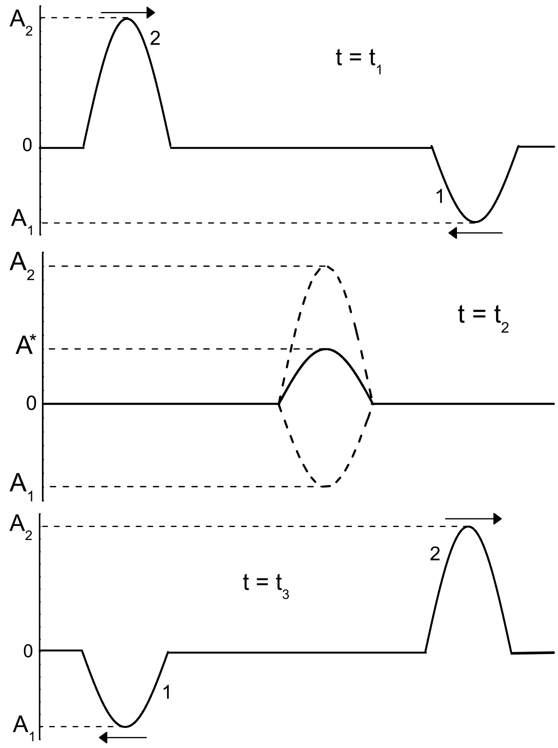


Figura 3.10: Interferência destrutiva.

3.8.2 Interferência de Ondas

Interferência é o fenômeno de cancelamento ou de reforço quando uma ou mais ondas se superpõem. Seja, por exemplo, duas ondas que caminham ao longo de uma mesma corda esticada com a mesma frequência angular ω e o mesmo número de onda angular k, definidas por

$$y_1(x,t) = A_1 \mathrm{sen}(kx - \omega t + \phi)\,, \tag{3.25}$$

e

$$y_2(x,t) = A_2 \mathrm{sen}(kx - \omega t)\,, \tag{3.26}$$

onde A_1 e A_2 são as amplitudes das ondas $y_1(x,t)$ e $y_2(x,t)$, respectivamente. Estas duas ondas caminham no mesmo sentido (x crescente) com a sua velocidade sendo dada pela expressão $v = \omega/k$. As ondas $y_1(x,t)$ e $y_2(x,t)$ diferem apenas por uma constante ϕ, a qual é chamada de *diferença de fase*, que representa a diferença de fase entre as duas ondas.

Aplicando o Princípio da Superposição, a onda resultante, $y(x,t)$, da combinação destas duas ondas será

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)\,,$$

$$y(x,t) = A_1 \mathrm{sen}(kx - \omega t + \phi) + A_2 \mathrm{sen}(kx - \omega t)]\,.$$

Por questão de simplicidade trataremos apenas do caso em que as amplitudes das duas ondas sejam iguais, ou seja, $A_1 = A_2 = A$. Fazendo-se isto na equação anterior e definindo $\alpha = kx - \omega t$, temos

$$y(x,t) = A[\mathrm{sen}(\alpha + \phi) + \mathrm{sen}(\alpha)]$$

Utilizando a relação trigonométrica: $\text{sen}(a)+\text{sen}(b) = 2\text{sen}[(a+b)/2]\cos[(a-b)/2]$, com $a = \alpha+\phi$ e $b = \alpha$, obtemos:

$$y(x,t) = 2A\cos(\phi/2)\text{sen}(\alpha + \phi/2)$$

Lembrando que $\alpha = kx - \omega t$, temos finalmente

$$y(x,t) = 2A\cos(\phi/2)\text{sen}(kx - \omega t + \phi/2)\,. \tag{3.27}$$

Notamos pela equação (3.27) que a onda resultante também possui uma forma senoidal, diferindo das ondas originais $y_1(x,t)$ e $y_2(x,t)$, somente em dois aspectos: *i*) pela diferença de fase ($\phi/2$) e *ii*) pela amplitude, que será

$$A^* = 2A\cos(\phi/2) \tag{3.28}$$

Dizemos, em geral, que se a onda resultante possui uma amplitude maior que as amplitudes das ondas originais, a interferência é *construtiva* (veja Fig. 3.9), e se a onda resultante possui uma amplitude menor que as amplitudes das ondas originais, a interferência é *destrutiva* (veja Fig. 3.10).

Verificaremos agora dois casos bem especiais:

Primeiro caso: se fizermos $\phi = 0$, na Eq. (3.27), ela se reduz a

$$y(x,t) = 2A\text{sen}(kx - \omega t) \tag{3.29}$$

Segundo caso: verificamos que se $\phi = \pi$ rad na Eq. (3.27), $\cos(\phi/2) = 0$ e a onda resultante será nula:

$$y(x,t) = 0 \tag{3.30}$$

No primeiro caso [Eq. (3.29)], as duas ondas ($y_1(x,t)$ e $y_2(x,t)$) estão exatamente em fase e sua interferência é dita *completamente construtiva*. Notamos pela Eq. (3.28) que para $\phi = 0$, a onda resultante possui uma amplitude que é o dobro da amplitude das ondas originais, ou seja, $A^* = 2A$, sendo este o maior valor possível para a amplitude da onda resultante.

No segundo caso dizemos que houve uma interferência *totalmente destrutiva* e a amplitude da onda resultante possui seu valor mínimo, ou seja, $A^* = 0$ para $\phi = \pi$ na Eq. (3.28). Para que isto ocorra, as ondas originais devem estar exatamente em oposição de fase.

3.8.3 Passagem de uma Onda de um Meio para Outro

Na Fig. 3.11(a) mostramos uma corda esticada, constituída de uma parte mais fina ligada a outra parte mais grossa. Temos então dois meios diferentes, (1) e (2), sendo, particularmente, a densidade linear do meio (1) menor que a do meio (2), ou seja, $\mu_1 < \mu_2$. Como a tensão (τ) nas duas cordas é a mesma, podemos afirmar de acordo com a equação (3.22), que a velocidade de propagação de uma onda na parte mais fina é maior que na parte mais grossa, ou seja, $v_1 > v_2$.

Fazendo oscilar a extremidade da corda fina, uma onda se propaga ao longo dela e, ao atingir a corda grossa passa a se propagar também nesta corda, isto é, a onda é transmitida da corda fina para a corda grossa (Fig. 3.11(b)). A onda que é transmitida para o meio (2) recebe o nome de *onda refratada*.

A frequência de uma onda não se altera quando ela é transmitida de um meio para outro, sendo o valor de f o mesmo para os meios (1) e (2). Pela equação $\lambda = v/f$, vemos que, no meio em que a onda se propaga com maior velocidade, ela terá maior comprimento de onda e

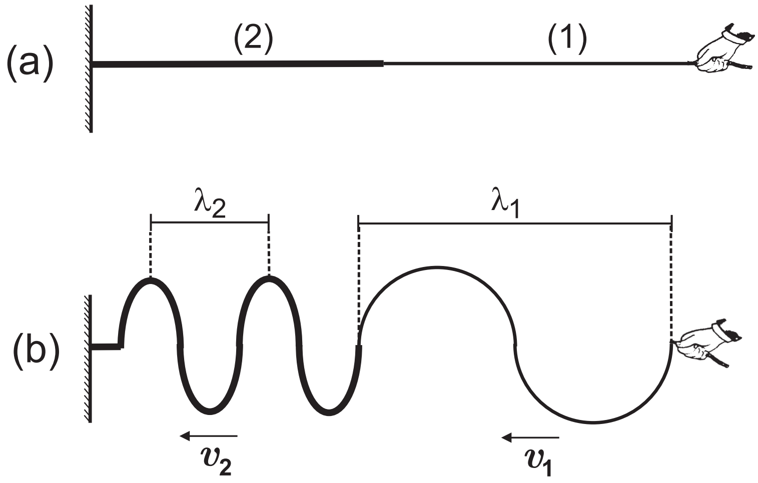


Figura 3.11: Refração de uma onda.

no meio em que a onda se propaga com menor velocidade ela terá um menor comprimento de onda. Assim, observe que na Fig. 3.11(b) temos $\lambda_1 > \lambda_2$, pois $v_1 > v_2$.

Concluindo, chamamos de *refração de uma onda* quando uma onda passa de um meio para outro, com variação da sua velocidade de propagação e de seu comprimento de onda. Na Figura 3.11 distinguimos então a onda incidente (onda no meio 1) e a onda refratada (onda no meio 2). A onda refratada mantém a mesma frequência da onda incidente.

3.8.4 Reflexão de uma Onda

A *reflexão* de uma onda ocorre quando uma onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio original de propagação. A onda refletida mantém a mesma velocidade e o mesmo comprimento de onda da onda incidente.

Na Figura 3.12(a) mostramos a reflexão sofrida por um pulso quando incide em uma extremidade fixa. São mostrados quatro intervalos consecutivos de tempo ($t = t_1$, $t = t_2$, $t = t_3$, $t = t_4$). Entendemos por extremidade fixa aquela que não pode se mover. O pulso é criado por uma pessoa na extremidade direita da corda e se propaga para a esquerda. Quando o pulso chega à extremidade esquerda encontra-se com uma parede onde a corda está fixada. O pulso exerce então uma força para cima sobre a parede. Pela lei de *ação e reação* (3ª lei de Newton), a parede exercerá sobre a corda uma força de mesmo módulo mas de sentido contrário. Esta força de reação faz com que o pulso volte invertido em relação ao pulso incidente. Chamamos este tipo de reflexão de *reflexão rígida*. Deve-se notar que o ponto onde a corda está fixada na parede não sofre um deslocamento transversal. Chamamos este ponto de *nó*.

Na Figura 3.12(b) mostramos a reflexão sofrida por um pulso quando incide em uma extremidade livre. Uma extremidade é dita livre quando ela pode se locomover. Para isto, na extremidade esquerda da corda foi colocado um anel que pode se deslocar por uma haste. Neste caso quando o pulso chega na extremidade esquerda da corda o anel desliza para cima na haste puxando a corda, produzindo um pulso refletido de mesmo sinal que o pulso incidente. Este tipo de reflexão é denominado de *reflexão não rígida*.

Além da refração e da reflexão existe um outro comportamento que a onda pode sofrer

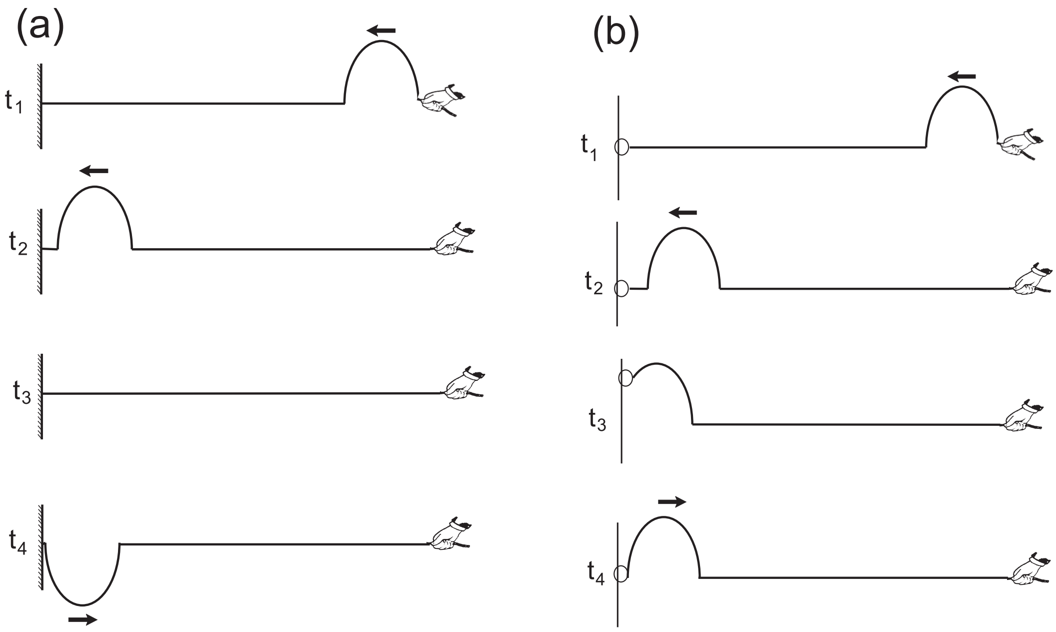


Figura 3.12: (a) Reflexão rígida e (b) reflexão não rígida.

ao incidir sobre uma barreira: a *difração*. A difração de uma onda ocorre quando uma onda consegue "contornar" um obstáculo.

3.8.5 Ondas Estacionárias e Ressonância

Quando existem ondas num espaço confinado, como por exemplo, numa corda de comprimento L, esticada e presa em suas extremidades (veja Fig. 3.13(a)), as ondas que se propagam na corda sofrem reflexões em suas extremidades. As ondas refletidas se somam às ondas incidentes de acordo com o princípio de superposição. Na Fig. 3.13(b) mostramos um exemplo em que duas ondas senoidas se propagam em sentidos opostos com o mesmo comprimento de onda e amplitude. A onda é refletida na parede e na mão da pessoa que segura a corda. Esta onda é chamada de *onda estacionária* porque, apesar da forma da onda mudar com o tempo, ela não se propaga pela corda. Os pontos da corda que apresentam deslocamento transversal nulo são chamados de *nodos* ou *nós*. Os pontos que apresentam deslocamento transversal máximo são chamados de *ventre*, *antinodos* ou *antinós*. Note, pela Figura 3.13(b), que os antinós estão separados por meio comprimento de onda. Pode-se perceber que os nós também estão separados por meio comprimento de onda.

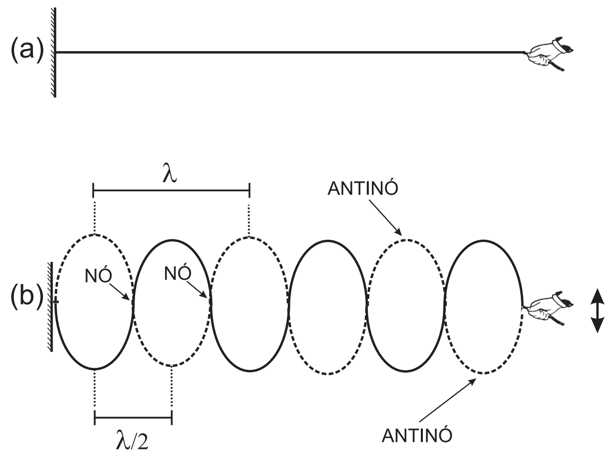


Figura 3.13: Onda estacionária em uma corda.

Na Fig. 3.14 mostramos três modos de oscilações de uma onda estacionária gerada em uma corda de comprimento L. Para que as oscilações na corda tenham uma máxima amplitude devemos fornecer frequências bem definidas (frequências discretas). Dizemos que o sistema entra em *ressonância* nestas frequências. Se colocarmos a corda vibrando em uma outra frequência diferente das frequências de ressonância, não será gerada uma onda estacionária na corda com amplitude máxima. Note na figura os nós e antinós, os quais só ocorrem em frequências bem definidas. Como as extremidades da corda não podem se mover, deve existir um nó em cada extremidade da corda.

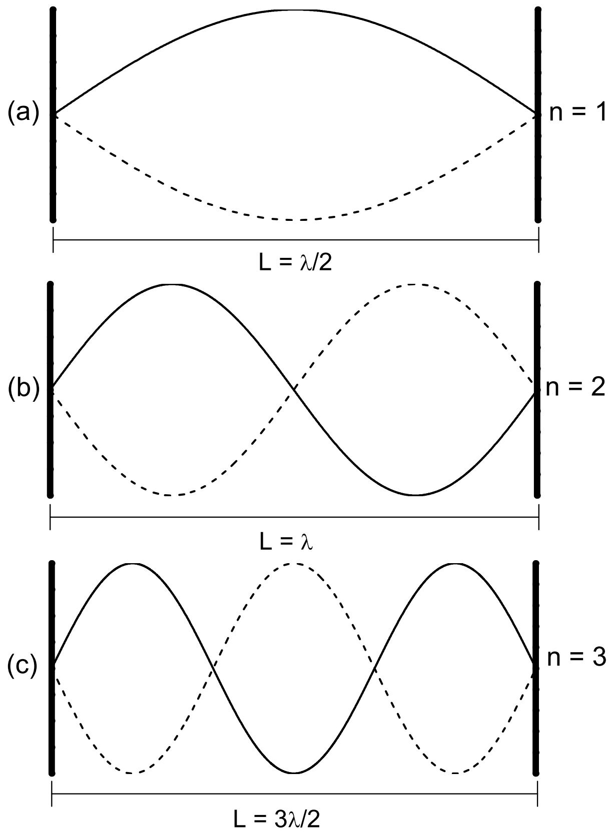


Figura 3.14: Três modos de oscilação de uma onda estacionária.

Na Fig. 3.14(a) existe apenas um antinó no centro da corda e dois nós (um em cada extremidade da corda). Este é o padrão mais simples em que há o fenômeno de ressonância. Neste caso, para que haja a ressonância devemos ter a seguinte relação entre o comprimento L da corda e o comprimento de onda da onda: $L = \lambda/2$.

Notamos pela Fig. 3.14(b) que existem agora dois antinós separados por meio comprimento de onda e três nós (um em cada extremidade da corda e ouro no centro). Este é o segundo padrão em que há o fenômeno de ressonância. Neste caso, para que haja a ressonância devemos ter a seguinte relação entre o comprimento L da corda e o comprimento de onda da onda: $L = \lambda$. Um terceiro padrão de ressonância é mostrado na Figura 3.14(c). Observamos que existem três antinós e quatro nós. Neste caso a ressonância ocorre para $L = 3\lambda/2$.

Resumindo, observamos que os padrões de ressonância ocorrem nas condições:

$$\begin{aligned} 1^{\text{o}}\,\text{padrão}: \quad L &= 1\frac{\lambda}{2} \\ 2^{\text{o}}\,\text{padrão}: \quad L &= 2\frac{\lambda}{2} \\ 3^{\text{o}}\,\text{padrão}: \quad L &= 3\frac{\lambda}{2} \\ &\vdots \end{aligned}$$

que pode ser estendido infinitamente. Notamos, porém, que esta série pode ser generalizada pela seguinte expressão:

$$L = n\frac{\lambda}{2}\,, \quad n = 1, 2, \ldots$$

onde o índice n indica o *modo de ressonância*, e os comprimentos de ondas permitidos serão

$$\lambda = \frac{2L}{n}\,, \;\; n = 1, 2, 3, \ldots \tag{3.31}$$

Lembrando que $\lambda = v/f$, a equação anterior pode ser reescrita como

$$\frac{v}{f} = \frac{2L}{n}$$

Isolando f na equação anterior temos

$$f = n\frac{v}{2L}\,, \;\; n = 1, 2, 3 \ldots \tag{3.32}$$

Um trem de ondas estacionárias se desenvolverá somente se a corda esticada for sacudida numa das frequências dadas pela Eq. (3.32). Dizemos que o sistema ressoa a essas frequências. O modo de oscilação de frequência mais baixa ($n = 1$) é chamado de 1º *harmônico* ou *frequência fundamental*. Para $n = 2$ temos o 2º *harmônico*, para $n = 3$ temos o 3º *harmônico*, e assim sucessivamente. A importância da ressonância é que nesta condição a corda oscila com grande amplitude, pressionando o ar à sua volta e criando uma onda sonora que possui a mesma frequência das oscilações da corda em vibração. O fenômeno de ressonância não ocorre apenas para uma corda vibrante. O fenômeno de ressonância pode ocorrer em qualquer "sistema vibrante". Substituindo a velocidade v dada pela equação (3.22) na equação (3.32) temos:

$$f = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{\tau}{\mu}}\,, \quad n = 1, 2, 3 \ldots \tag{3.33}$$

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 3-3

Uma onda estacionária pode ser produzida em uma corda elástica utilizando o equipamento mostrado na Figura 3.15. Passando uma das extremidades da corda por uma polia e prendendo-lhe uma massa, transformará o ponto B em uma extremidade fixa. O outro extremo da corda é ligado a um vibrador (ponto A). Através do gerador de função fornecemos uma frequência adequada ao vibrador. As oscilações transversais do vibrador criam na corda uma onda

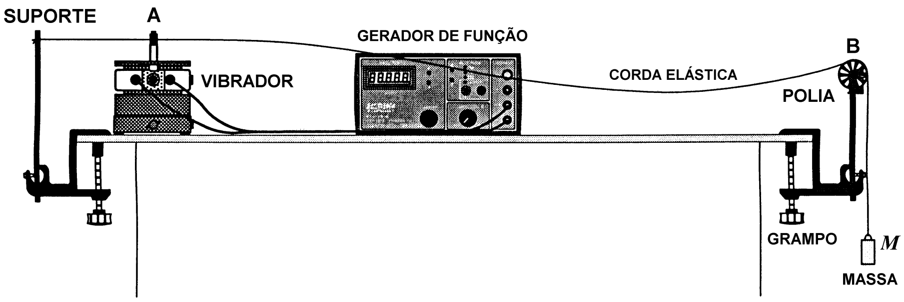


Figura 3.15: Equipamento utilizado para produção de ondas estacionárias em um corda.

progressiva, que se reflete na extremidade fixa, gerando assim uma onda estacionária na corda. A frequência das ondas é igual à do vibrador. Se as amplitudes de vibração do vibrador forem pequenas o ponto A poderá ser considerado um nó. Suponha que utilizemos uma corda elástica de 10 gramas de massa ($m_c = 0,01$ kg) e de comprimento total de 2 metros ($L_{total} = 2$ m). A distância entre os pontos A e B é de 1 metro e a massa M suspensa possui 100 gramas ($M = 0{,}1$ kg). (a) Qual a densidade linear da corda? (b) Qual a tensão na corda? (c) Qual a velocidade da onda na corda? (d) Qual a frequência fundamental de ressonância? (e) Qual o comprimento de onda desta onda nesta frequência?

SOLUÇÃO:

(a) A densidade linear da corda será:

$$\mu = \frac{m_c}{L_{total}} = \frac{0,01\,\text{kg}}{2\,\text{m}} = 0,005\,\text{kg/m}$$

(b) A tensão na corda será o peso da massa suspensa:

$$\tau = Mg = (0,1\,\text{kg}) \times (9,78\,\text{m/s}^2) = 0,978\,\text{N}$$

(c) A velocidade será:

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \sqrt{\frac{0,978}{0,005}} \simeq 14\,\text{m/s}$$

(d) A frequência fundamental ou 1º harmônico é a frequência para $n = 1$. Utilizando a Eq. (3.32) temos:

$$f = n\frac{v}{2L} = 1\frac{14\,\text{m/s}}{2 \times 1\,\text{m}} = 7\,\text{Hz}$$

(e) Para determinarmos o comprimento de onda podemos utilizar a Eq. (3.32) ou a Eq. (3.21):

$$v = \lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{14\,\text{m/s}}{7\,\text{Hz}} = 2\,\text{m}$$

* * * * * * * * * * * * *

QUESTIONÁRIO

1) O que é uma onda?

2) Como se classificam as ondas quanto à natureza?

3) O que são: a) ondas mecânicas? b) ondas eletromagnéticas? e c) ondas materiais?

4) Como se classificam as ondas quanto à dimensão?

5) O que são: a) ondas unidimensionais? b) ondas bidimensionias? e c) ondas tridimensionais?

6) Qual a diferença entre uma onda longitudinal e uma onda transversal?

7) O que são ondas mistas?

8) Qual é a equação geral de uma onda transversal que se desloca no sentido crescente de x? E para uma onda que se desloca no sentido decrescente de x?

9) O que acontece com a velocidade de uma onda transversal em uma corda quando aumentamos a tensão na corda? E se aumentarmos a densidade da corda?

10) Qual a diferença entre interferência construtiva e destrutiva?

11) Que propriedade da onda se mantém constante quando a onda passa de um meio para outro? Quais propriedades se alteram?

12) Qual a diferença entre uma reflexão rígida e uma não rígida?

13) O que é uma onda estacionária?

14) O que é ressonânicia?

PROBLEMAS

1) Uma onda senoidal desloca-se ao longo de uma corda. O tempo necessário para um determinado ponto da corda se mover de um deslocamento máximo para zero é 0,01 s. Quais são: (a) O período da onda (b) A frequência da onda? (c) Se o comprimento de onda é de 0,5 m qual é a velocidade da onda?

2) Uma onda possui uma velocidade de 345 m/s e uma frequência de 1000 Hz. Qual é seu comprimento de onda?

3) Uma onda possui uma frequência de 2000 Hz e um comprimento de onda de 10 cm. Qual é a velocidade da onda?

4) Uma onda possui uma velocidade de 350 m/s e um comprimento de onda de 20 cm. Qual é sua frequência?

5) A lâmina de vibração de uma campainha está presa a extremidade de uma corda esticada. Ligando-se a campainha, a lâmina passa a vibrar, executando 20 oscilações/s, dando origem a uma onda que se propaga na corda com velocidade $v = 2$ m/s. (a) Qual é a frequência com que um ponto qualquer da corda oscila enquanto a onda passa por ele? (b) Quanto tempo a onda gasta para atingir um ponto, situado a uma distância $d = 20$ m da lâmina? (c) Qual é a distância entre duas cristas sucessivas desta onda? (d) Se a frequência da lâmina for aumentada para $f = 30$ Hz, o que acontecerá com os valores da velocidade de propagação e do comprimento de onda?

6) Escreva a equação para uma onda que se desloca no sentido negativo ao longo do eixo dos x e que tem amplitude de 0,02 m, frequência de 200 Hz e velocidade de 400 m/s.

7) Escreva a equação para uma onda que se desloca no sentido positivo ao longo do eixo dos x e que tem amplitude de 0,05 m, comprimento de onda de 0,5 m e uma velocidade de 400 m/s.

8) Uma onda tem uma frequência angular de 20π rad/s e comprimento de onda de 0,5 m. Calcule: (a) a frequência da onda; (b) a velocidade da onda.

9) A equação de uma onda transversal numa corda é dada por $y(x, t) = 0,2\text{sen}(20x - 600t)$, onde todas as unidades estão no sistema internacional. Determine: (a) a amplitude da onda; (b) o número de onda angular; (c) a frequência angular; (d) a velocidade de propagação da onda; (e) o comprimento de onda; (f) o período; (g) a frequência, (h) o deslocamento transversal da partícula para $t = 0$ s e $x = \pi/20$ m.

Os três exercícios seguintes (10, 11 e 12) referem-se a uma corda esticada, constituída de uma parte mais fina (1) ligada a outra parte mais grossa (2), ligada a uma parede.

10) Sabendo-se que na corda (1) a velocidade de propagação da onda é $v_1 = 1{,}0$ m/s e que o comprimento de onda vale $\lambda_1 = 100$ cm, responda: (a) Qual a frequência que um ponto qualquer da corda (1) está oscilando? (b) Qual é o tempo que a mão da pessoa gasta para efetuar uma vibração completa? (c) Quantas vibrações por segundo efetua o ponto de união das duas cordas? (d) Qual a frequência da onda que se propaga na corda (2)?

11) Sendo $v_2 = 0{,}2$ m/s a velocidade de propagação da onda na corda (2), determine a distância entre duas cristas consecutivas nesta corda.

12) Considere que um pulso seja produzido pela mão, em um certo instante, no início da corda (1). Sabendo-se que o comprimento de cada corda é igual a 100 cm, quanto tempo este pulso gastará para alcançar a extremidade da corda (2) ligada à parede?

13) Uma corda suporta uma tração de 100 N. A massa da corda vale 2 kg e seu comprimento 10 m. Determinar: (a) a densidade linear, (b) a velocidade de propagação de um pulso através da corda.

14) Uma onda estacionária, em uma corda de violino de 20 cm de comprimento, vibra em seu modo $n = 2$. (a) Faça uma figura representando esta onda. (b) Determine o seu comprimento de onda. (c) Se a velocidade da onda é igual a 10 m/s qual é a sua frequência?

15) Suponhamos que, no exercício anterior, apenas a tração na corda do violino foi alterada de tal modo que a corda vibre em seu modo $n = 4$. Neste caso: (a) Faça a figura representando a onda resultante e determine o seu comprimento de onda. (b) A velocidade da onda na corda será alterada? Explique.

16) Uma corda fixa em suas extremidades mede 10,0 m de comprimento e tem uma massa de 0,01 kg. Ela é posta a vibrar sob uma tensão de 120 N. (a) Qual a velocidade das ondas na corda? (b) Qual o comprimento de onda estacionária mais comprida possível? (c) Dê a frequência desta onda.

17) Uma corda de náilon de uma guitarra tem uma densidade linear de 2×10^{-3} kg/m e está sob tensão de 100 N. Os suportes fixos distam 50 cm. A corda vibra no modo estacionário $n = 4$. Calcule: (a) a velocidade; (b) o comprimento de onda; (c) a frequência das ondas componentes cuja superposição causa esta vibração.

18) Uma corda de aço para piano tem 20 cm de comprimento e 2 g de massa. Quando submetida a uma força tensora de 400 N, qual é a frequência fundamental da onda que se propaga nessa corda?

Capítulo 4

Som

4.1 Ondas Sonoras

As ondas sonoras são ondas mecânicas que podem propagar-se através de um meio que possui elasticidade. Este meio elástico pode ser um sólido, um líquido, ou um gás. Quando os meios elásticos são submetidos a forças externas o meio tende a preservar sua forma, comprimento e volume através de forças restauradoras que agem para que o meio material retorne à sua condição inicial, antes da aplicação da força externa.

Se o meio através do qual as ondas se propagam for um líquido ou um gás poderá haver somente a transmissão de ondas longitudinais. Neste capítulo, concentraremos nosso interesse nas ondas sonoras definidas como ondas mecânicas longitudinais que se propagam com frequências no intervalo audível (20 a 20.000 Hz).

4.2 O Que é Som

O som é produzido pelas vibrações de corpos materiais. Sempre que escutamos um som é porque há um corpo material vibrando. Por exemplo: quando uma pessoa fala, ela está fazendo com que suas pregas vocais vibrem. Ao vibrar suas pregas vocais, o ar ao redor das cordas vibra e esta vibração é então transmitida de molécula a molécula do ar até chegar aos nossos ouvidos. As cordas de um violino ou de um violão também vibram e emitem som quando são colocadas em movimento. O mesmo acontece quando batemos em um tambor ou em outro corpo material qualquer: o corpo material vibra e emite som.

Como o som é uma onda que necessita de um meio material para se propagar, não existirá onda sonora na ausência de um meio, ou seja, no vácuo. Será sempre necessário um meio material entre um corpo em vibração e o ouvido de uma pessoa para que esta pessoa possa perceber o som emitido pelo corpo em vibração. Ao contrário do som, lembramos que a luz pode se propagar no vácuo. Se a luz não se propagasse no vácuo, a luz emitida pelo Sol não chegaria ao nosso planeta tornando impossível qualquer tipo de vida na Terra. Uma explosão na superfície solar, por mais intensa que seja, não pode produzir uma onda sonora que chegue até o nosso planeta, visto que não existe matéria na região entre o Sol e a Terra.

As ondas sonoras com uma frequência menor que 20 hertz ou maior que 20.000 hertz ao atingirem o ouvido de uma pessoa não provocam nenhuma sensação auditiva. Para que a pessoa tenha uma sensação auditiva, é necessário que a frequência da onda esteja compreendida aproximadamente entre os limites de 20 e 20.000 Hz. No entanto, as frequências audíveis para o ser humano não estão rigorosamente entre 20 e 20.000 hertz, estes limites variam um pouco de uma pessoa para outra. Mais realisticamente estes limites estariam entre 16 e 25.000 Hz. Ressaltamos que esta faixa de frequência audível corresponde à sensibilidade do "ouvido humano", pois existem animais cujo ouvido pode ser sensibilizado para frequências maiores ou menores que esta. Podemos definir, então, o som como uma onda longitudinal que se propaga em um meio material (sólido, líquido ou gasoso), cuja frequência está compreendida, aproximadamente, entre 20 hertz e 20.000 hertz.

4.3 Ondas Sonoras Progressivas

A Figura 4.1 mostra uma situação em que uma fonte sonora **F** (por exemplo, uma lâmina em vibração) é colocada próxima a uma das extremidades de um tubo contendo ar. A fonte sonora provoca no ar compressões e rarefações sucessivas que se propagam neste meio, de maneira semelhante ao que acontece em uma mola quando ela vibra longitudinalmente, como foi mostrado na Figura 3.3 do Capítulo 3. O comprimento de onda, λ, da onda será a distância entre duas compressões sucessivas.

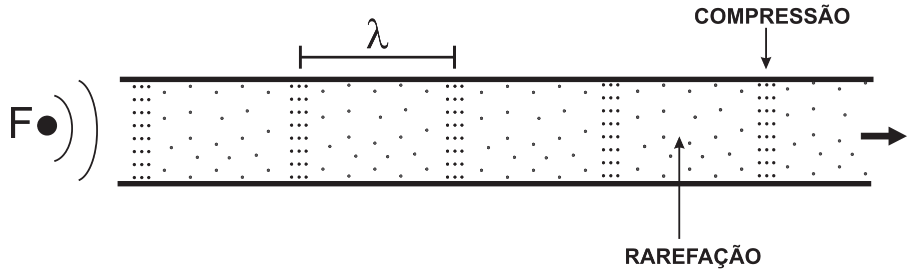


Figura 4.1: Fonte sonora produzindo uma onda acústica em um tubo de ar.

Focalizemos nossa atenção apenas para uma das faixas de ar dentro do tubo como mostra a Figura 4.2.

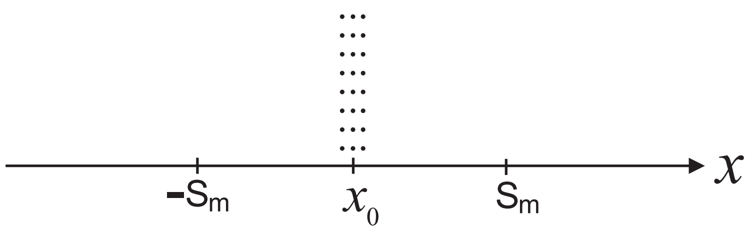


Figura 4.2: Coluna de ar oscilando entre $-S_m$ e $+S_m$.

Quando uma coluna de ar, situada em x_0, é atingida por esta onda de compressões e rarefações, ela vibra entre os pontos $-S_m$ e $+S_m$, isto é, ela vibra na mesma direção em que a onda se propaga, tornando-se um elemento oscilante. Logo, a onda emitida pela fonte sonora **F**, em vibração, é uma *onda longitudinal*, com amplitude igual a S_m. A frequência desta onda será igual à frequência da fonte sonora **F**. Basicamente o que ocorre a nível microscópico é que quando as moléculas do ar são comprimidas, elas perturbam as moléculas vizinhas, provocando o mesmo efeito nas moléculas mais próximas. As moléculas, inicialmente comprimidas, se afastam e voltam novamente à posição que ocupavam no início. Assim cada grupo de moléculas pressiona o grupo seguinte e depois volta à sua posição inicial, gerando assim uma onda. O deslocamento longitudinal do elemento oscilante, representado na Figura 4.2, é dado por

$$S = S_m \cos(kx - \omega t) \tag{4.1}$$

O deslocamento máximo S_m, em geral é muito menor que o comprimento da onda sonora. Para mostrar a distância S_m, a escala horizontal na Fig. 4.2 foi ampliada em comparação com a da Fig. 4.1. Para representarmos o deslocamento poderíamos também ter utilizado a forma $S = S_m \text{sen}(kx - \omega t)$, porém, a forma apresentada pela Eq. (4.1) é a mais usual. Os significados de k e ω são os mesmos do Capítulo 3, ou seja, k é o número de onda angular da onda e ω a frequência angular da onda, estando relacionados com o comprimento de onda da onda e com a frequência da onda pelas expressões

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{4.2}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \tag{4.3}$$

A velocidade de onda da onda pode ser obtida pela relação $v = \omega/k$.

A pressão numa posição x, da Fig. 4.1, durante a passagem da onda, diminui e aumenta com o tempo, sendo esta variação dada por

$$\Delta p = \Delta p_m \text{sen}(kx - \omega t)\,, \tag{4.4}$$

onde Δp_m é a amplitude da pressão. Relembramos aqui que a unidade de pressão no sistema internacional é o pascal (1 Pa = 1 N/m^2). Um valor positivo de Δp, na Eq. 4.4, corresponde a uma compressão e um valor negativo a uma rarefação. A variação máxima da pressão na onda, (Δp_m), na Eq. (4.4), está relacionada com o deslocamento máximo, (S_m), por

$$\Delta p_m = v\rho\omega S_m\,, \tag{4.5}$$

onde v é a velocidade da onda, ρ é a densidade volumétrica do ar onde a onda se propaga e ω é a frequência angular. Lembramos que a densidade volumétrica é a quantidade de massa por volume. A variação máxima da pressão Δp_m é usualmente muito menor que a da pressão p que prevalece quando não existe onda.

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 4-1

A mínima variação da pressão que o ouvido humano pode detectar é aproximadamente de 20×10^{-6}Pa. Qual a amplitude de deslocamento S_m das moléculas de ar para um som com uma frequência de 1000 Hz? Considere a velocidade do som no ar 343 m/s e a densidade do ar 1,21 kg/m^3.

SOLUÇÃO:

Da Eq. (4.5), temos

$$S_m = \frac{\Delta p_m}{v\rho\omega} = \frac{\Delta p_m}{v\rho 2\pi f} = \frac{20 \times 10^{-6}\,\text{Pa}}{(343\,\text{m/s})(1,21\,\text{kg/m}^3)(2\pi)(1000\,\text{Hz})} = 7,6 \times 10^{-12}\text{m}$$

Note que este valor é menor que o raio de um átomo!

Exemplo 4-2
A máxima variação da pressão que o ouvido humano pode tolerar é aproximadamente de 20 Pa. Qual a amplitude de deslocamento S_m das moléculas de ar para um som com uma frequência de 1000 Hz? Considere a velocidade do som no ar 343 m/s e a densidade do ar 1,21 kg/m^3.
SOLUÇÃO:
Usando novamente a Eq. (4.5), temos

$$S_m = \frac{\Delta p_m}{v\rho\omega} = \frac{\Delta p_m}{v\rho 2\pi f} = \frac{20\,\text{Pa}}{(343\,\text{m/s})(1,21\,\text{kg/m}^3)(2\pi)(1000\,\text{Hz})} = 7,6 \times 10^{-6}\text{m}$$

Exemplo 4-3
Uma certa onda sonora possui uma frequência de 1020 Hz e uma velocidade de 340 m/s no ar. Se a variação máxima da pressão Δp_m é de 10 Pa, (a) qual a equação para a variação da pressão da onda? (b) Se a amplitude de deslocamento S_m deste som no ar é de 2 cm, qual a equação para o deslocamento longitudinal desta onda?
SOLUÇÃO:
(a) Da Eq. (4.4), temos $\Delta p = \Delta p_m \text{sen}(kx - \omega t)$. Como $\Delta p_m = 10$ Pa, nos resta então encontrar os valores de k e ω. Da Eq. (4.3) temos $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 1020 = 2040\pi\,\text{rad/s}$ O valor de k pode ser encontrado da equação:

$$v = \frac{\omega}{k} \Rightarrow k = \frac{\omega}{v} = \frac{2040\pi}{340} = 6\pi\,\text{rad/m}$$

A equação para a variação de pressão da onda é então:

$$\Delta p = 10\,\text{sen}(6\pi x - 2040\pi t)\,\text{(SI)}$$

(b) A equação para o deslocamento longitudinal desta onda é $S = S_m \cos(kx - \omega t)$. Como $S_m = 2\,\text{cm} = 0,02\,\text{m}$ e os valores de k e ω já foram encontrados no item anterior temos:

$$S = 0,02\cos(6\pi x - 2040\pi t)\,\text{(SI)}$$

$* * * * * * * * * * * * *$

4.4 Infra-Som e Ultra-Som

Uma onda mecânica longitudinal propagando-se em um meio material com frequência superior a 20.000 Hz é denominada *ultra-som*, e se frequência for inferior a 20 Hz é denominada *infra-som*. Como vimos, estas ondas não provocam sensação auditiva ao atingirem o ouvido de uma pessoa.

Alguns animais, entretanto, são capazes de perceber os ultra-sons e os infra-sons. Isto acontece porque o ouvido destes animais é sensibilizado para estas frequências. Os elefantes, em certas ocasiões, podem se comunicar emitindo (e ouvindo) infra-sons. Já um cavalo pode escutar frequências de até 46.000 Hz. Um cachorro é capaz de perceber ultra-sons cujas frequências alcançam até 50.000 Hz. É por esta razão que cães amestrados atendem a apitos de ultra-sons, enquanto que uma pessoa não consegue ouvir o apito. Os morcegos, embora sejam quase cegos, podem voar sem colidir com obstáculos porque emitem ultra-sons, que são captados por seus ouvidos após se refletirem nestes obstáculos. As frequências dos ultra-sons que os morcegos emitem e ouvem podem chegar a 120.000 Hz. Certos tipos de ratos podem escutar frequências de até 45.000 Hz.

De modo semelhante ao que é feito pelos morcegos, o sonar é um dispositivo em que os ultra-sons são utilizados para localizar um objeto e medir a distância até ele. Um submarino ou um cardume de peixes podem ser localizados ao refletirem os ultra-sons emitidos pelo sonar de um navio. O ultra-som também é utilizado na medicina na formação de imagens. Um aparelho de ultra-som permite, por exemplo, uma mulher grávida observar a imagem de sua criança pelo monitor de um computador.

4.5 A Velocidade do Som no Ar em Função da Temperatura

Você já deve ter observado que, em uma tempestade, embora um relâmpago (clarão) e o trovão (barulho) sejam produzidos no mesmo instante, só ouvimos o trovão um certo tempo após termos visto o relâmpago. Isto acontece porque a velocidade da luz é muito grande ($\simeq 3 \times 10^8$ m/s) em comparação com a velocidade do som ($\simeq$ 343 m/s no ar). Portanto, o relâmpago é visto praticamente no mesmo instante em que ele é produzido. Logo, o intervalo de tempo entre a percepção do relâmpago e a do trovão representa aproximadamente o tempo gasto pela onda sonora para chegar até nós.

Isaac Newton (1642-1727) foi o primeiro cientista a compreender a importância do problema do cálculo da velocidade do som. Para determinar a velocidade do som no ar Newton usou uma situação semelhante à descrita no parágrafo anterior: uma pessoa detonava um canhão e, a uma distância de aproximadamente 20 km, outra pessoa media o tempo entre a percepção do clarão e do som produzidos pelo tiro. Como esta medida representava o tempo que o som levou para percorrer a distância de 20 km, ou seja, $v = d/\Delta t$ (onde d é a distância percorrida pelo som e Δt o tempo decorrido), foi possível calcular a velocidade do som no ar. No entanto em suas experiências Newton não levou em conta dois fatores importantes: a temperatura e a densidade do ar. Cerca de 130 anos mais tarde é que o Físico e Matemático francês Pierre Simon Laplace (1749-1827) descobriu este erro. Medidas mais recentes, realizadas com maior precisão, mostram que a velocidade do som no ar é de 343 m/s ao nível do mar a uma temperatura de 20°C. Esta especificação é necessária porque se verifica que, quanto maior for a temperatura de um gás, maior a velocidade com que a onda sonora nele se propaga. Assim, as variações de temperatura no ar modificam a velocidade do som, que é dada aproximadamente por:

$$v = 331 + 0,6\,\theta\,(\mathrm{m/s}) \ , \tag{4.6}$$

onde θ é a temperatura em °C. Na Eq. (4.6) a velocidade é dada em metros por segundo.

* * * * * * * * * * * * *

<u>*Exemplo 4-4*</u>

a) Qual é a velocidade do som no ar a uma temperatura de 0 °C? b) E a uma temperatura de 20 °C?

SOLUÇÃO:

Usando a equação (4.6):

a) $v = 331 + 0,6\,\theta = 331 + 0,6 \times 0 = 331\,\mathrm{m/s}$

b) $v = 331 + 0,6\,\theta = 331 + 0,6 \times 20 = 343\,\mathrm{m/s}$

Exemplo 4-5

Um estudante realizando um experimento sonoro ao ar livre verifica que o som percorre 34 metros em 0,1 segundo. (a) Qual é a velocidade do som? (b) Qual a temperatura do ar?

SOLUÇÃO:

(a) A velocidade do som pode ser calculada através da expressão

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{34\,\mathrm{m}}{0,1\,\mathrm{s}} = 340\,\mathrm{m/s}$$

(a) Usando a equação (4.6): $v = 331 + 0,6\,\theta \Rightarrow 340 = 331 + 0,6\,\theta \Rightarrow 0,6\,\theta = 9 \Rightarrow \theta = 15$ °C.

* * * * * * * * * * * * * *

A velocidade de propagação de uma onda depende do meio no qual ela está se propagando e isto ocorre também com o som. A Tabela 4.1 mostra alguns valores para a velocidade do som em diferentes materiais a uma pressão ao nível do mar.

Tabela 4.1: Velocidade do som (m/s) em alguns meios materiais

Sólidos (20°C)	Líquidos (25°C)	Gases (0°C)
Granito.........6000	Água do mar....1533	Hidrogênio..........1269
Ferro.............130	Água doce........1493	Hélio.....................965
Alumínio.......5100	Mercúrio...........1450	Vapor(100°C).......405
Aço...............4550	Água (0°C).......1402	Nitrogênio............339
Cobre............3750	Querosene.........1315	Ar.........................331
Chumbo........1230	Álcool...............1210	Oxigênio...............317

Estas variações da velocidade do som em diferentes meios ocorrem porque a propagação de uma onda em meios elásticos depende das características de elasticidade e da densidade do meio. Em geral podemos utilizar para a velocidade das ondas mecânicas longitudinais em um meio a seguinte expressão:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}\ , \tag{4.7}$$

onde ρ é a densidade do meio e B é uma medida da tendência de um material em manter seu volume contra forças externas. A constante B recebe o nome de *módulo de elasticidade volumétrico* nos líquidos e gases e de *módulo de Young* nos sólidos. No entanto esta distinção não é muito usual sendo B chamado de *módulo de elasticidade volumétrico* tanto nos líquidos e gases como também nos sólidos. A equação (4.7) explica porque em geral o som tem uma velocidade maior nos sólidos que nos líquidos e gases. Apesar dos sólidos em geral possuírem uma maior densidade que os líquidos (o que provocaria uma diminuição na velocidade do som) eles tem pouca compressibilidade, ou seja, uma alta tendência a manter seu volume (B grande). Reforçamos ainda que os valores de B e ρ variam com a pressão e a temperatura.

Todas as propriedades que estudamos no Capítulo 3, para ondas em geral, são também válidas para as ondas sonoras (inclusive para os infra-sons e ultra-sons). Assim, uma onda sonora se reflete de tal modo que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. A refração também ocorre com o som. A difração e a interferência são fenômenos observados com as ondas sonoras, assim como acontece com qualquer tipo de onda. Além disso, a relação $v = \lambda f$ é válida para as ondas sonoras e a frequência de um som não se altera quando ele passa de um meio para outro, porém sua velocidade e comprimento de onda mudam.

$* * * * * * * * * * * * *$

Exemplo 4-6
O módulo de elasticidade volumétrico do ar a 20 °C é de $1,423 \times 10^5 \mathrm{N/m^2}$, e sua densidade nesta mesma temperatura é de 1,21 kg/m^3. Qual é então a velocidade do som no ar?
SOLUÇÃO:
Usando a equação (4.7):

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{1,423 \times 10^5 \mathrm{N/m^2}}{1,21\,\mathrm{kg/m^3}}} \simeq 343\,\mathrm{m/s}$$

Exemplo 4-7
O módulo de elasticidade volumétrico do aço a temperatura ambiente é de aproximadamente 16×10^{10} N/m^2, e sua densidade nesta mesma temperatura é de $7,7 \times 10^3$ kg/m^3. Qual é então a velocidade do som no aço?
SOLUÇÃO:
Usando novamente a equação (4.7)

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{16 \times 10^{10} \mathrm{N/m^2}}{7,7 \times 10^3\,\mathrm{kg/m^3}}} \simeq 4558\,\mathrm{m/s}$$

$* * * * * * * * * * * * *$

Existem outros fatores que afetam a velocidade do som no ar. Um deles é a umidade. A umidade reduz a densidade do ar seco à mesma temperatura. Assim a velocidade do som aumenta à medida que a umidade aumenta. A altitude também altera a velocidade do som no ar, pois, em maiores altitudes o ar é menos denso (ar rarefeito).

A velocidade do som dependerá também da intensidade do som. Se as intensidades forem muito grandes, como nas explosões, a propagação da energia será feita inicialmente na forma de uma onda de choque, que tem velocidade maior que aquela das ondas sonoras normais na mesma temperatura e pressão. Quanto mais violenta a explosão, mais intensa é a onda de choque que a acompanha e maior a sua velocidade de propagação. À medida que se propaga a onda de choque vai se dissipando e finalmente se transforma em uma onda sonora normal.

4.6 Intensidade de Energia Sonora

Além da velocidade, do comprimento de onda e da frequência, existe uma outra importante propriedade de uma onda sonora: a intensidade de energia sonora. A intensidade de energia de uma onda sonora é a razão da taxa média de energia transmitida por área, na qual a energia é transmitida pela onda. A taxa média de energia é a potência P da onda, ou seja, $P = \Delta E/\Delta t$. Podemos então definir a intensidade de energia sonora I pela expressão

$$I = \frac{P}{\mathcal{A}} \ , \tag{4.8}$$

onde P é a potência e $\mathcal{A}$ é a área. Para não confundir o símbolo de pressão com o de potência adotaremos P (maiúsculo) para designar a potência e p (minúsculo) para designar a pressão. Como $P = \Delta E/\Delta t$ (sendo ΔE a energia que esta onda transporta através de uma área $\mathcal{A}$, em um intervalo de tempo Δt), uma forma alternativa para a Eq. (4.8) seria

$$I = \frac{\Delta E}{\mathcal{A} \cdot \Delta t} \tag{4.9}$$

A unidade no SI para a intensidade de energia é o watt por metro quadrado (W/m^2). Poderemos ter então sons com forte ou baixa intensidade. A transmissão de energia por uma onda progressiva é feita no sentido de propagação da onda. A Fig. 4.3 mostra uma fonte sonora **F** na extremidade de um tubo contendo ar, como o da Fig. 4.1. A intensidade de energia sonora I na extremidade direita do tubo será a energia transmitida por área $\mathcal{A}$, por unidade de tempo.

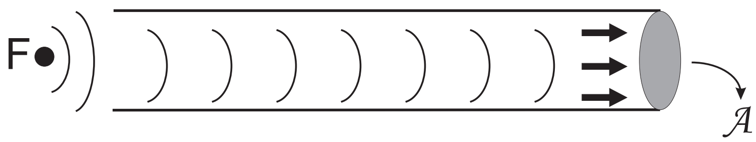


Figura 4.3: Energia sonora sendo transmitida através de um tubo contendo ar.

A intensidade é uma propriedade do som que está relacionada com a energia de vibração da fonte que emite a onda sonora. Ao se propagar, a onda transporta esta energia, distribuindo-a em todas as direções. Quanto maior for a quantidade de energia (por unidade de área e por unidade de tempo) que a onda sonora transporta até nosso ouvido, maior será a intensidade do som que perceberemos.

Pode ser demonstrado que a intensidade de energia sonora pode ser também expressa pela seguinte equação

$$I = \frac{1}{2}\rho v(\omega S_m)^2 \ , \tag{4.10}$$

onde ρ é a densidade do meio onde a onda se propaga, v é a velocidade da onda, ω é a frequência angular da onda e S_m a amplitude do deslocamento longitudinal (veja Fig. 4.2). Percebemos da Eq. (4.10) que a intensidade de energia é proporcional ao quadrado da amplitude e ao quadrado da frequência. Notamos, então, que a intensidade de um som é tanto maior quanto maior for a amplitude e a frequência da onda, ou seja, uma onda com maior amplitude ou frequência irá transmitir uma quantidade de energia maior.

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 4-8
Uma fonte de 100 W/m^2 emite ondas sonoras através de uma janela de 1 m^2. Qual é a energia que atravessa a janela em um minuto?

SOLUÇÃO:
Utilizando a Eq. (4.9):

$$I = \frac{\Delta E}{\mathcal{A} \cdot \Delta t} \Rightarrow \Delta E = I \cdot \mathcal{A} \cdot \Delta t = 100\,\mathrm{W/m^2} \cdot 1\,\mathrm{m^2} \cdot 60\,\mathrm{s} = 6000\,\mathrm{J}$$

Exemplo 4-9
Usando os resultados dos Exemplos 4-1 e 4-2, encontre: (a) a intensidade de energia sonora mínima que o ouvido humano pode detectar; (b) a intensidade de energia sonora máxima que o ouvido humano pode suportar. Considere no cálculo uma frequência de 1000 Hz, a velocidade do som no ar de 343 m/s e a densidade do ar 1,21 kg/m^3.
SOLUÇÃO:
(a) Pela Eq. (4.10), temos

$$I = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 (S_m)^2 = \frac{1}{2}\rho v (2\pi f)^2 (S_m)^2 = 2\rho v (\pi f S_m)^2$$

Usando o valor de S_m obtido no exemplo 4-1, temos

$$I = 2 \cdot (1,21\,\mathrm{kg/m^3}) \cdot (343\,\mathrm{m/s})(3,14 \cdot 1000\,\mathrm{Hz} \cdot 7,6 \times 10^{-12}\mathrm{m})^2 \simeq 0,5 \times 10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}$$

(b) Usamos novamente a Eq. (4.10) com o valor de S_m obtido no exemplo 4-2:

$$I = (1,21\,\mathrm{kg/m^3})(343\,\mathrm{m/s})(2\pi^2)(1000\,\mathrm{Hz})^2(7,6 \times 10^{-6}\mathrm{m})^2 \simeq 0,5\,\mathrm{W/m^2}$$

* * * * * * * * * * * * *

4.7 Intensidade de Energia de uma Fonte Pontual

Uma fonte sonora pontual **F** com uma certa potência P emite ondas esféricas uniformemente em todas as direções (veja Fig. 4.4).

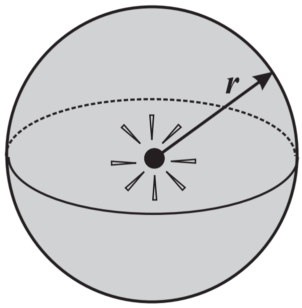


Figura 4.4: Energia sonora irradiada esfericamente por uma fonte pontual.

Toda a potência irradiada pela fonte deve, necessariamente, passar através de uma esfera de raio r centrada na fonte. Como a área da superfície esférica é $4\pi r^2$, podemos fazer na Eq. (4.8) $\mathcal{A} = 4\pi r^2$, para obtermos:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \tag{4.11}$$

Vemos então que a intensidade do som decai com o inverso do quadrado da distância da fonte. Vimos, porém, na seção anterior que a intensidade de energia de uma onda sonora pode ser expressa pela Equação (4.10). Que quantidade deve variar, então, nesta equação com a distância? Se a densidade ρ do meio não variar com a distância a velocidade v de onda permanece constante (veja Eq. 4.7). Como a frequência da fonte é fixa a frequência angular ω da onda não se altera. A única possibilidade que resta é que a amplitude do deslocamento da onda S_m varie com a distância. E de fato isto é o que ocorre, ou seja S_m, depende da distância r da fonte: $S_m = S_m(r)$. Para encontrar esta dependência de S_m com a distância r da fonte igualemos as equações (4.10) e (4.11):

$$\frac{1}{2}\rho v(\omega S_m)^2 = \frac{P}{4\pi r^2} \Rightarrow (S_m)^2 = \frac{P}{2\pi\rho v\omega^2 r^2} \Rightarrow S_m = \sqrt{\frac{P}{2\pi\rho v\omega^2}\frac{1}{r}}$$

Como P, ρ, v e ω são fixos podemos fazer $\sqrt{P/2\pi\rho v\omega^2} = C$, onde C é uma constante. Temos então finalmente que

$$S_m(r) = \frac{C}{r}$$

ou seja, amplitude do deslocamento da onda S_m decai com $1/r$. Substituindo o valor de $S_m(r)$ na equação (4.1) para o deslocamento longitudinal do elemento oscilante temos:

$$S = \frac{C}{r}\cos(kr - \omega t)$$

onde $C = \sqrt{P/2\pi\rho v\omega^2}$. Isto significa que a amplitude da onda de pressão (veja Eq. 4.4) também diminui à medida que a distância à fonte aumenta, resultado que é verificado experimentalmente. A amplitude de pressão também decai com $1/r$.

* * * * * * * * * * * * * *

Exemplo 4-10

Ondas esféricas são emitidas uniformemente em todas as direções por uma fonte pontual. A potência P da fonte é de 25 W. (a) Qual é a intensidade sonora I a uma distância de 1,0 m da fonte? (b) Qual é a intensidade sonora I a uma distância de 5,0 m da fonte?

SOLUÇÃO:

Usando a Eq. 4.11 com $r = 1,0\,\mathrm{m}$ e com $r = 5,0\,\mathrm{m}$:

(a)

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{25\,\mathrm{W}}{(4\pi)(1\,\mathrm{m})^2} \simeq 1,99\,\mathrm{W/m^2}$$

(b)

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{25\,\mathrm{W}}{(4\pi)(5\,\mathrm{m})^2} \simeq 0,08\,\mathrm{W/m^2}$$

* * * * * * * * * * * * * *

4.8 Sensibilidade do Ouvido Humano

Existe um valor mínimo da intensidade sonora capaz de sensibilizar o aparelho auditivo. Este valor mínimo depende da frequência do som (veja Fig. 4.5), variando também de uma pessoa para outra. Para uma frequência aproximada de 1.000 hertz e para um ouvido normal, este limite mínimo é cerca de 10^{-12} W/m^2 (reveja o Exemplo 4-6). Para você perceber que este valor é muito pequeno, informamos que esta intensidade corresponde a uma amplitude de vibração de 10^{-9}cm (menor que o raio de um átomo, como foi visto no Exemplo 4-1). Vemos, então, que nosso ouvido é um detector extraordinariamente sensível, capaz de perceber um deslocamento desta ordem de grandeza. O valor 10^{-12} W/m^2 é usualmente representado por I_0 e tomado como referência para comparações das intensidades dos diversos sons, ou seja, $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2.

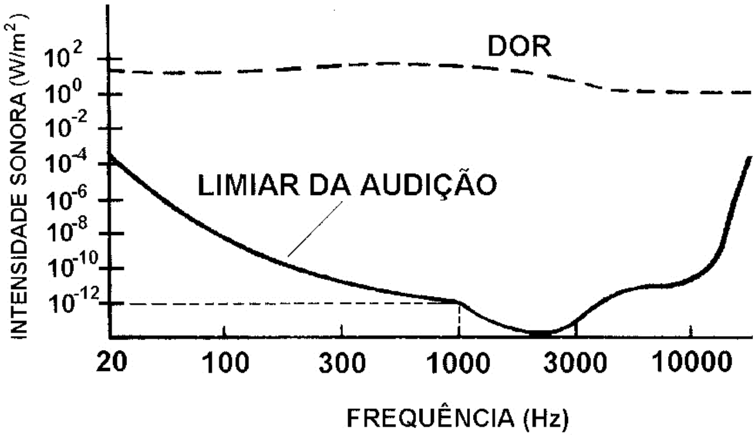


Figura 4.5: Limiar da audição em função da frequência.

Por outro lado, ondas sonoras cujas intensidades possuem valores acima de 1 W/m^2, podem chegar a causar dores e danos ao ouvido. Esta intensidade corresponde a uma amplitude de vibração da ordem de 0,01 mm (reveja o Exemplo 4-9).

Notamos da Figura 4.5 que a sensibilidade do ouvido humano é maior para frequências compreendidas entre 1.000 e 5.000 Hz. A curva cheia na figura indica a intensidade sonora mínima com que um som pode ser ouvido para uma pessoa com audição normal. A curva superior tracejada indica o limiar de dor. À medida que as pessoas se tornam mais idosas a sensibilidade do ouvido diminui. Será necessário aumentar o nível de intensidade sonora para que uma pessoa de idade avançada possa perceber o som. A perda da elasticidade dos tecidos da orelha interna com o aumento da idade é um dos principais fatores que contribuem para esta perda da sensibilidade auditiva. Pessoas que ficam expostas a ruídos intensos e contínuos podem sofrer também perda da sensibilidade auditiva devido à degeneração do órgão de Corti da cóclea. A máxima frequência audível também diminui à medida que as pessoas envelhecem.

4.9 Nível de Intensidade Sonora

Os pesquisadores que estudam os fenômenos relacionados com a intensidade do som, perceberam que a "sensação" produzida em nosso ouvido, pelo som de uma certa intensidade I, não varia proporcionalmente a esta intensidade. Por exemplo, um som de intensidade $I_2 = 2I_1$ não produz, em nosso ouvido, uma "sensação" duas vezes mais intensa do que aquela produzida por I_1. Na realidade, os cientistas verificaram que esta sensação varia com o logaritmo da intensidade sonora.

Por esta razão, para medir esta característica do nosso ouvido, foi definida uma grandeza, β, denominada *nível de intensidade sonora*, da seguinte maneira:

$$\beta = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) , \tag{4.12}$$

onde I é a intensidade da onda sonora e $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2. A unidade para medida dessa grandeza β foi denominada "bel", e o símbolo desta unidade é B (1 bel = 1B). A unidade mais usada, porém, para a medida de β é o "decibel", cujo símbolo é dB (1 dB = 0,1 B). Assim podemos reescrever a Eq. 4.12 como:

$$NIS = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) , \tag{4.13}$$

onde, *NIS* é o nível de intensidade sonora cuja unidade é o dB (decibel).

Observe, então, que:

Se $I = I_0$, temos $NIS = 10\log\left(\frac{I_0}{I_0}\right) = 10\log 1 \Rightarrow NIS = 0\,dB$

Se $I = 10I_0$, temos $NIS = 10\log\left(\frac{10I_0}{I_0}\right) = 10\log 10 \Rightarrow NIS = 10\,\text{dB}$

Se $I = 100I_0$, temos $NIS = 10\log\left(\frac{100I_0}{I_0}\right) = 10\log 100 \Rightarrow NIS = 20\,\text{dB}$

Se $I = 1000I_0$, temos $NIS = 10\log\left(\frac{1000I_0}{I_0}\right) = 10\log 1000 \Rightarrow NIS = 30\,\text{dB}$

e assim, sucessivamente. Observe que quando multiplicamos a intensidade de uma onda sonora por 10, adicionamos 10 dB ao nível de som.

Logo, o som, cujo nível sonoro é de 1 B possui intensidade (I) 10 vezes maior que o som de intensidade I_0, o de nível sonoro 2 B, possui intensidade (I) 100 vezes maior que I_0 etc.

Na Tabela 4.2 apresentamos o nível de intensidade sonora de alguns sons. Os sons de grande intensidade, de maneira geral, são desagradáveis ao ouvido humano e, como mostra a Tabela 4.2, quando atingem uma intensidade próxima de 120 dB, começam a produzir sensações dolorosas.

Tabela 4.2: Níveis sonoros de alguns sons típicos

TIPO DE SOM	*NIS* (dB)
Limiar da audição	0
Sussurro das folhas	10
Murmúrio (a 1m)	20
Rua sem tráfego	40
Conversação normal (a 1m)	60
Tráfego pesado	80
Metrô (a 2 m)	90
Limiar doloroso	120
Decolagem de jato (a 50 m)	140

É interessante neste momento relembrarmos algumas propriedades de logaritmos que serão muito usadas:

$$\log(a.b) = \log(a) + \log(b) \tag{4.14a}$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b) \tag{4.14b}$$

$$\log(a) = x \Rightarrow a = 10^x \tag{4.14c}$$

$$\log(a^x) = x\log(a) \tag{4.14d}$$

$$\log(10) = 1 \tag{4.14e}$$

$$\log(1) = 0 \tag{4.14f}$$

* * * * * * * * * * * * *

<u>*Exemplo 4-11*</u>
Como podemos comparar os níveis de som de duas ondas sonoras que possuem intensidades I_1 e I_2?
SOLUÇÃO:
Vamos escrever a razão entre as duas intensidades como

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_2/I_0}{I_1/I_0}$$

Tomando o logaritmo nos dois membros e multiplicando por 10 dB, temos:

$$10 \ \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = 10 \ \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) - 10 \ \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

Da Eq. 4.13 vemos que

$$10 \ \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = NIS_2 - NIS_1$$

$$NIS_2 - NIS_1 = 10 \ \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

ou

$$\Delta NIS = 10\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \tag{4.15}$$

Portanto, a diferença entre níveis sonoros (ΔNIS) é igual a $10\log\left(I_2/I_1\right)$.

<u>*Exemplo 4-12*</u>
O limiar doloroso (NIS_2 = 120 dB) é 30 dB mais forte que o metrô (NIS_1 = 90 dB). Qual a razão de suas intensidades?

SOLUÇÃO:
Da Eq. 4.15 temos:

$$\Delta NIS = 10\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \Rightarrow 10\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = \Delta NIS \Rightarrow 10\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = 120 - 90$$

ou

$$10\ \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = 30 \Rightarrow \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = \frac{30}{10} \Rightarrow \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = 3$$

Portanto,

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^3 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = 1000\,,$$

ou seja, o início do limiar doloroso (120 dB) é 1000 vezes mais intenso que o metrô.

* * * * * * * * * * * * *

4.10 Nível de Pressão Sonora

Os fenômenos relacionados com a sensação auditiva podem também ser definidos em termos do *nível de pressão sonora* (NPS). Em termos matemáticos, o nível de pressão sonora de um som é dado por

$$NPS = 20\log\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right)\ , \tag{4.16}$$

onde Δp_0 é o padrão de referência que equivale à menor diferença de pressão sonora audível e cujo valor é 20×10^{-6} Pa. A unidade de NPS é também dada em decibel (dB). Pode-se mostrar que no ar NPS = NIS.

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 4-13
Qual o nível de pressão sonora (NPS) para uma diferença de pressão de 20×10^{-4} Pa?
SOLUÇÃO:
Da Eq. 4.16 temos:

$$NPS = 20\log\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right) = 20\log\left(\frac{20 \times 10^{-4}}{20 \times 10^{-6}}\right) = 20 \cdot 2 = 40\,\text{dB}$$

Exemplo 4-14
Qual o nível de pressão sonora (NPS) para uma diferença de pressão de 20×10^{-6} Pa?
SOLUÇÃO:
Da Eq. (4.16) temos:

$$NPS = 20\log\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right) = 20\log\left(\frac{20 \times 10^{-6}}{20 \times 10^{-6}}\right) = 20 \cdot \log(1) = 20 \cdot 0 = 0\,dB$$

* * * * * * * * * * * * *

QUESTIONÁRIO

1) O que é som?

2) Explique porque ondas sonoras não se propagam no vácuo.

3) Explique o que são ondas mecânicas audíveis.

4) Explique porque na região onde o deslocamento longitudinal é máximo a variação de pressão é mínima e vice-versa.

5) Explique a diferença entre infra-som e ultra-som.

6) Uma onda sonora ultra-sônica possui comprimento de onda menor ou maior que uma onda sonora infra-sônica? Justifique sua resposta.

7) Quando uma onda sonora muda de meio, por exemplo, do ar para água, qual das grandezas (velocidade, comprimento de onda e frequência) permanece constante? Explique.

8) Qual é o significado do zero deciBel?

9) Explique a diferença entre intensidade sonora (I) e Nível de Intensidade Sonora (NIS).

PROBLEMAS

1) Determine a faixa de comprimento de onda dos sons audíveis, supondo que a velocidade do som seja de 340 m/s.

2) Determine o maior comprimento de onda dos sons audíveis, supondo que a velocidade do som seja de 345 m/s.

3) Determine o menor comprimento de onda de uma onda sonora audível supondo que a velocidade da onda seja 343 m/s.

4) Determine a velocidade do som no ar para as seguintes temperaturas: a) $10\,^{\circ}$C e b) $20\,^{\circ}$C.

5) Determine a temperatura na qual a velocidade do som no ar seja 346 m/s.

6) Para a madeira de carvalho o módulo de Young é aproximadamente $1,4 \times 10^{10}\,\mathrm{N/m^2}$ e sua densidade de 750 $\mathrm{kg/m^2}$. Qual será a velocidade de propagação do som em uma haste de madeira de carvalho?

7) Uma onda mecânica longitudinal propaga-se no ar com velocidade de 343 m/s e comprimento de onda de 1 m. Esta onda é uma onda sonora audível, um infra-som ou um ultra-som?

8) A faixa de frequência principal da voz humana varia de 300 a 4.000 Hz. Determine, então, a faixa de comprimento de onda principal da voz humana. Considere a velocidade do som igual a 340 m/s.

9) Uma onda sonora progressiva que se propaga com velocidade de 340 m/s possui comprimento de onda igual a 0,02 m. (a) Escreva a equação do deslocamento longitudinal desta onda, supondo que o deslocamento máximo seja 7,6 μm. (b) Escreva a equação de variação de pressão desta onda, supondo que a variação máxima de pressão seja 20 Pa.

10) Considere $I_0 = 10^{-12}\mathrm{W/m^2}$ e determine o Nível de Intensidade Sonora (NIS) para as seguintes intensidades sonoras:
a) $I = 1\,\mathrm{W/m^2}$ b) $I = 10^{-2}\mathrm{W/m^2}$ c) $I = 10^{-4}\mathrm{W/m^2}$ d) $I = 10^{-6}\mathrm{W/m^2}$
e) $I = 10^{-12}\mathrm{W/m^2}$

11) Considere $\Delta p_0 = 20 \times 10^{-6}$ $\mathrm{N/m^2}$ e determine o Nível de Pressão Sonora (NPS) para as seguintes diferenças de pressão:
a) $\Delta p = 20$ $\mathrm{N/m^2}$ b) $\Delta p = 20 \times 10^{-2}$ $\mathrm{N/m^2}$ c) $\Delta p = 20 \times 10^{-4}$ $\mathrm{N/m^2}$
d) $\Delta p = 20 \times 10^{-6}$ $\mathrm{N/m^2}$

12) Uma onda sonora de Nível de Intensidade Sonora de 100 dB e uma frequência de 1000 Hz incide sobre um tímpano de uma pessoa cuja área é igual a $5 \times 10^{-5}\mathrm{m^2}$. Determine a energia absorvida pelo tímpano em 10 minutos.

13) A intensidade de energia (I) de uma onda sonora, de uma fonte pontual, é dada por $I = \frac{P}{4\pi r^2}$, onde P é a potência da fonte e r é a distância do ouvinte à fonte. (a) Qual a intensidade de energia para uma fonte de potência de $16\pi \times 10^{-6}$ W situada a uma distância de 2,0 m do ouvinte? (b) Qual é o nível sonoro (NIS) correspondente a esta distância?

14) Determinar a variação do Nível de Intensidade Sonora (ΔNIS) quando a intensidade é duplicada.

15) Determine a razão entre as intensidades de dois sons cujos níveis sonoros (NIS) diferem de 2 dB.

16) Calcular a intensidade de energia de um som com frequência $f = 1000$ Hz e Nível de Intensidade Sonora $NIS = 120$ dB.

Capítulo 5

Fenômenos Sonoros

5.1 Reflexão do Som

As ondas se comportam de uma forma muito característica. Quando uma onda incide em um obstáculo podem ocorrer três fenômenos distintos: reflexão, refração e difração (reveja as seções 3.8.3 e 3.8.4). A *Reflexão* de uma onda ocorre quando uma onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio original de propagação. A reflexão do som por um obstáculo pode originar dois fenômenos: o eco e a reverberação.

Quando emitimos um som, ele pode refletir-se em um obstáculo qualquer e retornar aos nossos ouvidos. O ser humano só consegue diferenciar o som emitido do som refletido quando o som refletido retorna aos seus ouvidos num intervalo de tempo igual ou superior a 0,1 segundo. Portanto, se a velocidade de propagação do som no ar for de 343 m/s verifica-se que o obstáculo deverá estar situado a uma distância d igual ou superior a 17,15 metros para que haja *eco* (veja Fig. 5.1).

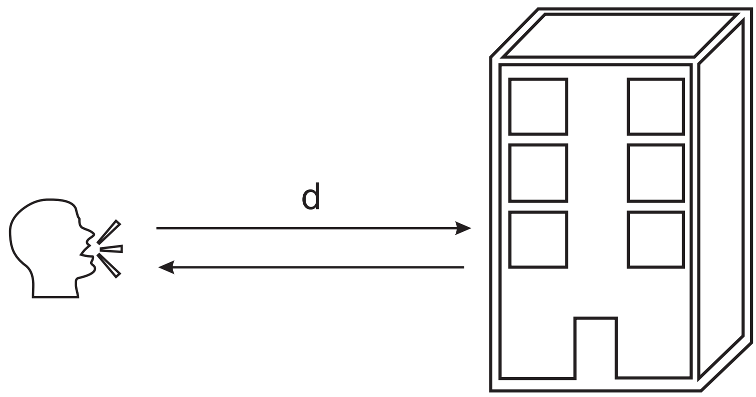


Figura 5.1: Reflexão do som por um obstáculo.

Quando o som refletido retorna à fonte num intervalo de tempo inferior a 0,1 segundo temos o fenômeno da *reverberação*. Portanto, se a velocidade de propagação do som no ar for de 343 m/s, a reverberação ocorrerá quando o obstáculo encontrar-se a uma distância inferior a 17,15 metros. Esta distância pode ter variações dependendo das condições em que se encontra o ar na região (veja Exemplo 5-1). A reverberação funciona como um reforço do efeito sonoro.

A reverberação é um fenômeno característico de recintos fechados, cujo controle é de extrema importância em auditórios, teatros e estúdios de gravação. Resumindo:

Eco - o som refletido retorna após a extinção total do som original.

Reverberação - o som refletido chega ao ouvinte antes da extinção do som emitido originalmente, provocando um reforço do som emitido.

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 5-1

Mostre que, considerando a velocidade do som no ar igual a 343 m/s, o eco só ocorrerá se a distância entre o emissor do som e o obstáculo refletor estiver a uma distância superior ou igual a 17,15 m.

SOLUÇÃO:

Como o ser humano só consegue diferenciar o som refletido do som emitido quando o som refletido retorna ao seu ouvido num intervalo de tempo igual ou superior a 0,1 segundo, o tempo decorrido no processo é $\Delta t = 0,1\,\mathrm{s}$. A distância total ΔS percorrida pela onda é $\Delta S = 2d$ (veja Fig. 5.1).

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{2d}{\Delta t} \Rightarrow d = \frac{v \cdot \Delta t}{2} = \frac{343\,\mathrm{m/s} \cdot 0,1\,\mathrm{s}}{2} = 17,15\,\mathrm{m}$$

Deve-se ressaltar que para diferentes condições do ar (temperatura, pressão, densidade, umidade, etc.) o valor da velocidade de propagação do som se altera mudando o valor desta distância.

* * * * * * * * * * * * *

5.2 Refração do Som

Quando uma onda sonora encontra uma fronteira, tal como uma parede, um teto ou um piso ela é parcialmente refletida e parcialmente absorvida (transmitida). A proporção relativa absorvida e refletida depende da natureza do material formando a fronteira. Uma substância rígida lisa reflete mais a onda sonora incidente enquanto substâncias porosas absorvem uma grande fração de energia acústica. Vimos na seção 3.8.3 que *refração de uma onda* é quando uma onda passa de um meio para outro, com variação da sua velocidade de propagação e de seu comprimento de onda. A onda refratada mantém a mesma frequência da onda incidente. Por exemplo, duas pessoas conversam à beira de uma piscina cheia de água. O som produzido por estas pessoas propaga-se no ar e ao atingir a superfície da piscina passa a se propagar na água. Ou seja, a onda passou de um meio (ar) para outro meio (água) ocorrendo então a refração. Uma pessoa submersa na piscina escutará o som proveniente do ar, porém, o som que ela escuta terá um comprimento de onda e velocidade diferente do som que uma pessoa fora da piscina escutaria. Como vimos na seção 4.5, a velocidade do som nos líquidos (e sólidos) é maior que nos gases, portanto, a velocidade do som na água será maior que no ar, e em consequência disto o comprimento de onda do som na água também será maior que no ar, visto que a frequência se mantém constante (lembre-se que $v = \lambda f$). Ressaltamos que quando a onda proveniente do ar incide na superfície da água ocorre também a reflexão. Parte da onda é transmitida e parte é refletida, não necessariamente em proporções iguais. Notamos que o som não é facilmente transmitido do ar para a água, sofrendo mais reflexão que transmissão. Este efeito é explicado pela diferente “impedância” do ar e da água.

A *impedância* é a propriedade de um meio se opor ao movimento de um corpo devido à resistência do meio ao movimento deste corpo. Isto porque diferentes meios absorvem energia de maneira diferente devido à sua estrutura e constituição. Na computação da impedância deve-se levar em conta também o corpo em si, pois este conforme a sua estrutura e forma interagirá de maneira diferente com o meio. Na mecânica clássica a impedância pode ser expressa por

$$Z = \frac{F}{v}\,, \tag{5.1}$$

onde F é a força aplicada ao corpo e v é a velocidade adquirida por este corpo. Observamos da Eq. (5.1) que quanto maior for a velocidade adquirida por um corpo, para uma determinada força F, menor será a impedância. No caso da acústica a impedância é definida como sendo $Z = p/u$, onde p é a pressão do meio e u é a velocidade da partícula que oscila do meio. Uma outra forma mais apropriada para a física acústica é a *impedância característica*, definida como:

$$Z = \rho \cdot v\,, \tag{5.2}$$

onde ρ é a densidade do meio e v a velocidade do som neste meio. A Eq. (5.2) é a forma mais prática para se definir a impedância para os propósitos da física acústica.

A impedância do ar e da água para uma onda sonora, por exemplo, são bem diferentes devido à grande diferença da velocidade do som na água e no ar. E toda vez que uma onda proveniente de um meio 1 incidir em um meio 2, cuja impedância seja bem diferente, haverá grande reflexão do meio 2 para o meio 1. Para aliviar este efeito de grande reflexão da onda incidente, o que se faz é colocar um material entre os dois meios de impedância intermediária. A isto chamamos de *casamento de impedância*. Um exemplo interessante é o que ocorre no ouvido humano. Uma onda sonora proveniente do ar precisa entrar na orelha interna (cóclea) que possui um fluido, isto é, a onda necessita ser transmitida de um meio (ar) para outro (líquido) de impedância bem diferente. A orelha média, que contém os três ossículos, funciona então como um dispositivo de casamento de impedância. Se não fosse a orelha média a reflexão seria grande e não escutaríamos quase nada (veja Fig. 5.2).

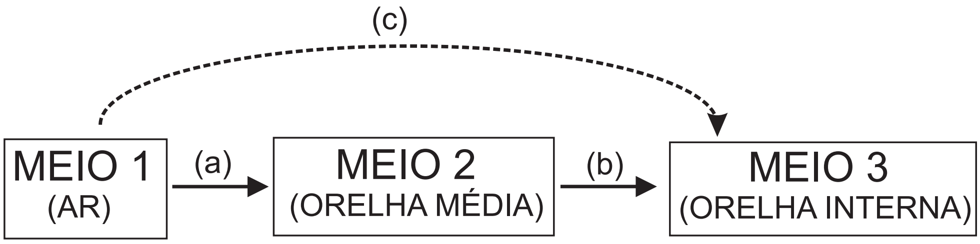


Figura 5.2: Esquema mostrando a transmissão do som: (a) do ar para a orelha média e (b) da orelha média para a orelha interna. Se a transmissão fosse feita diretamente do meio 1 (ar) para o meio 3 (orelha interna) como mostrado em (c) pela linha pontilhada, haveria bastante reflexão com grande perda de potência sonora. Os três ossículos da orelha média funcionam como um sistema mecânico-biológico de acoplamento de impedâncias.

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 5-2
Calcule a impedância característica do ar e da água. Considere no cálculo a velocidade do som no ar de 346 m/s e na água de 1495 m/s. A densidade do ar é 1,21 kg/m^3 e da água de 1000 kg/m^3.
SOLUÇÃO:
Utilizando a Eq. $Z = \rho \cdot v$ para o ar e para a água, temos
- ar: $Z = \rho \cdot v = 346\,\mathrm{m/s} \cdot 1,21\,\mathrm{kg/m^3} \simeq 418,7\,\mathrm{kg/m^2s}$
- água: $Z = \rho \cdot v = 1495\,\mathrm{m/s} \cdot 1000\,\mathrm{kg/m^3} \simeq 1,5 \times 10^6\,\mathrm{kg/m^2s}$

Note que a unidade para a impedância característica é kg/m^{2}s. Esta unidade é conhecida como *rayl* ($1\,\mathrm{rayl} = 1\,\mathrm{kg/m^2s}$).

* * * * * * * * * * * * *

5.3 Materiais Absorvedores de Som

Como comentamos anteriormente, quando uma onda incide em um obstáculo, parte da onda é transmitida e parte da onda é refletida. Ao se estudar os fenômenos de reflexão e transmissão de uma onda, um importante conceito que surge na acústica arquitetônica é o *coeficiente de absorção*. O coeficiente de absorção é definido pela proporção de energia incidente que é dissipada por um material absorvedor, sendo geralmente representado pela letra grega α. Materiais absorvedores de som são frequentemente utilizados para evitar ou reduzir a energia da onda sonora refletida. Os materiais absorvedores são caracterizados por uma impedância superficial e são feitos com uma superfície porosa ou perfurada (veja Fig. 5.3).

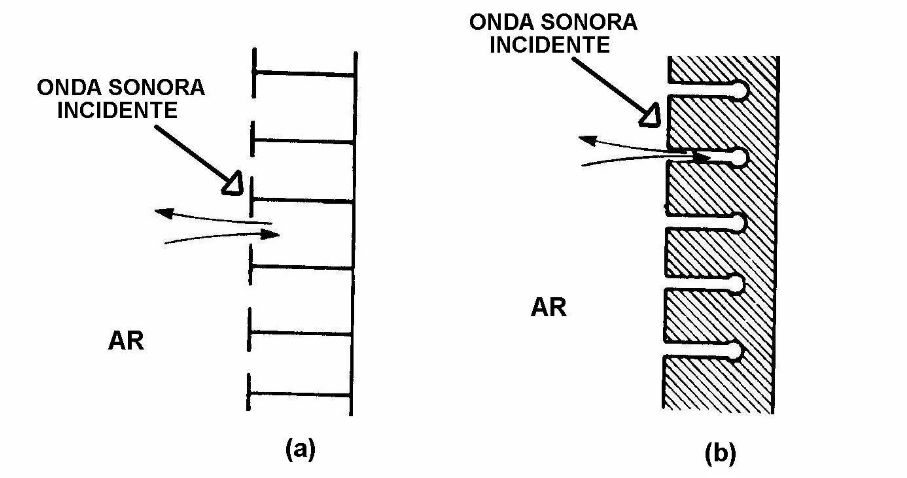


Figura 5.3: Exemplos de materiais absorvedores: (a) parede porosa, (b) parede perfurada.

A onda sonora ao incidir sobre um material poroso provoca a vibração do ar dentro dos poros. O movimento relativo entre o ar e a superfície interna dos poros provoca a dissipação da energia sonora na forma de calor através da fricção. Existe também uma energia perdida devido à troca de calor entre o ar compressado quente (ou o ar rarefeito frio) e a superfície interna dos poros. Exemplos de bons materiais absorvedores são espumas e polistireno distendido. Se tomarmos o coeficiente de absorção de uma porta aberta como sendo máximo (já que o som passa através dela e não volta) e atribuirmos o valor 10, temos os seguintes coeficientes de absorção relativos para alguns materiais conhecidos:

Tabela 5.1: Coeficientes de absorção relativos

MATERIAL	α/m^2
Porta aberta	10,0
Lajota acústica	5,6
Cortina pesada	4,0
Tapetes	2,0
Parede de tijolo	0,3
Mármore	0,1

Notamos pela tabela acima que destes materiais o mármore reflete muito as ondas sonoras incidentes visto que a sua absorção é muito baixa. A medição do coeficiente de absorção é bem difícil sendo necessário equipamentos de alta tecnologia.

5.4 Difração do Som

Ondas podem contornar obstáculos e extremidades. Este comportamento é chamado de *difração*. A extensão do contorno depende do comprimento de onda da onda e da dimensão do obstáculo. Em particular, o grau de difração poderá ser medido em termos da razão entre o comprimento de onda da onda λ e da largura d do obstáculo, isto é:

$$r = \frac{\lambda}{d} \tag{5.3}$$

Quanto maior esta razão maior a extensão da curva de difração. As ondas sonoras têm, em geral, um comprimento de onda da ordem de 1 m, enquanto que a luz visível tem um comprimento de onda da ordem de 10^{-7}m. Suponha agora que estas duas ondas, uma sonora e outra luminosa, com estes comprimentos de onda típicos, incidam em um tronco de uma árvore com diâmetro de 0,5 m. Poderão estas duas ondas sofrerem difração ao redor do tronco desta árvore? Utilizemos a Eq. (5.3) para estas ondas:

- para o som:

$$r = \frac{\lambda}{d} = \frac{1\,m}{0,5\,m} = 2$$

- para a luz:

$$r = \frac{\lambda}{d} = \frac{10^{-7}\,m}{0,5\,m} = 2 \times 10^{-7}$$

Percebemos que a razão λ/d, neste exemplo, é cerca de "dez milhões" de vezes maior para o som que para a luz visível. É por este motivo que podemos escutar atrás de uma árvore uma pessoa que fala do outro lado dela, porém, não podemos ver esta pessoa. Uma porta aberta pode ser considerada um caso especial de obstáculo. O som proveniente de um corredor ao entrar em uma sala poderá ser ouvido se a razão λ/d for apreciável, no entanto, para ondas luminosas λ/d será pequeno. Uma pessoa situada no canto da sala poderá escutar alguém que fala no corredor (Fig. 5.4a), mas não poderá vê-la [Fig. 5.4(b)].

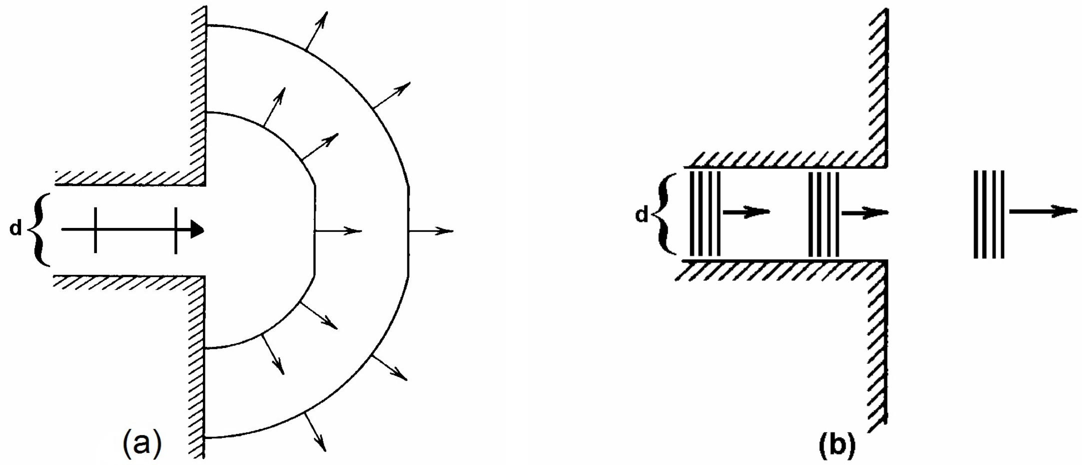


Figura 5.4: (a) Som proveniente de um corredor entrando em uma sala, e (b) uma onda luminosa proveniente de um corredor entrando na mesma sala.

A difração tem um papel importante na montagem de sistemas de alto-falantes. Sons de baixa frequência tem grande comprimento de onda (favoráveis à difração) e sons de grande frequência tem pequeno comprimento de onda (desfavoráveis à difração). Então, à medida que o som emana de um alto-falante os grandes comprimentos de onda (tons baixos) espalham-se com um maior grau que os sons com pequeno comprimento de onda (tons altos). Em outras palavras tons altos tendem a se concentrar mais ao longo do eixo do alto-falante. Para compensar este efeito deve-se fazer um arranjo com "tweeters" (alto-falantes especiais para sons de alta frequência). Um outro exemplo interessante de difração do som ocorre na natureza. Os elefantes quando comunicam entre si a curtas distâncias emitem um som que é audível ao ser humano. Porém, quando os elefantes querem se comunicar a grandes distâncias, eles emitem ondas de baixa frequência inaudíveis ao ser humano. Através da difração estas ondas de baixa frequência se propagam muito mais facilmente, espalhando-se pela floresta.

5.5 Batimentos

Vimos na seção 3.8.3 do Capítulo 3 que quando duas ondas se encontram em uma mesma região do espaço elas se interferem de acordo com o princípio de superposição (veja, por exemplo, as Figuras 3.9 e 3.10). Este tipo de interferência é chamada de *interferência no espaço*.

Devemos lembrar, entretanto, que uma onda possui além de uma dependência espacial uma dependência temporal. Pelo mesmo princípio de superposição, podemos ter então, uma *interferência no tempo* também. Este tipo de interferência no tempo ocorre quando duas ondas de frequências aproximadamente iguais se propagam numa mesma região do espaço.

A Figura 5.5(a) mostra o gráfico dos deslocamentos de duas ondas sonoras (que se propagam numa mesma região do espaço) em função do tempo. A soma das vibrações individuais em função do tempo de cada onda será a oscilação resultante de um determinado ponto do espaço considerado. A vibração resultante é mostrada na Figura 5.5(b). Notamos que a amplitude da onda resultante não é constante. A amplitude da onda resultante, no ponto considerado, varia com o tempo, possuindo momentos de interferência totalmente construtiva e momentos de interferência totalmente destrutiva. Como a intensidade da onda depende da amplitude haverá variações da intensidade da onda sonora. Esta variação da intensidade da onda é denominada *batimento*. Parece que o nome batimento provém do fato que o ruído produzido assemelha-se a um bater.

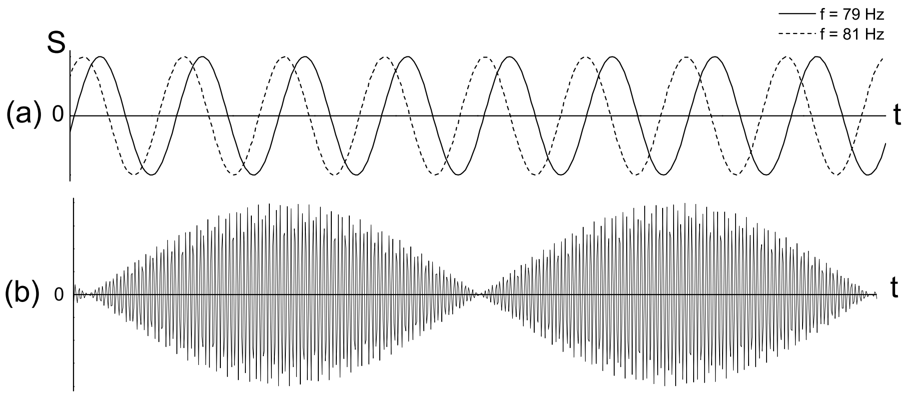


Figura 5.5: Fenômeno de batimento.

Façamos uma análise quantitativa do fenômeno do batimento. Sejam S_1 e S_2 as variações dos deslocamentos longitudinais (das partículas de ar) de duas ondas sonoras:

$$S_1 = S_{m1} \cos(kx + \omega_1 t) \text{ e } S_2 = S_{m2} \cos(kx + \omega_2 t)$$

Vamos supor que estas duas ondas se interferem numa mesma posição x do espaço. Aplicando-se o Princípio da Superposição, o deslocamento resultante S será

$$S = S_1 + S_2 = S_{m1} \cos(kx + \omega_1 t) + S_{m2} \cos(kx + \omega_2 t)$$

Para simplificar os cálculos vamos supor que as duas ondas tenham a mesma amplitude S_m, ou seja, $S_{m1} = S_{m2} = S_m$. Logo teremos

$$S = S_m[\cos(kx + \omega_1 t) + \cos(kx + \omega_2 t)] \tag{5.4}$$

Usando a identidade trigonométrica

$$\cos(a) + \cos(b) = 2\cos[(a - b)/2] \cos[(a + b)/2] ,$$

com $a = kx + \omega_1 t$ e $b = kx + \omega_2 t$, obtemos para a Eq. (5.4)

$$S = 2S_m \cos[(\omega_1 - \omega_2)t/2] \cos[kx + (\omega_1 + \omega_2)t/2]$$

Se fizermos

$$\omega' = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \text{ e } \omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} ,$$

poderemos reescrever a equação anterior como

$$S = 2S_m \cos(\omega' t) \cos(kx + \omega t) \tag{5.5}$$

Se as frequências angulares ω_1 e ω_2 tiverem praticamente o mesmo valor podemos dizer que, $\omega >> \omega'$. Podemos, então, considerar a Eq. (5.5) como uma função cosseno cuja frequência angular é ω e cuja amplitude é $2S_m \cos(\omega' t)$. Notamos, então, que a amplitude não é constante, mas varia com uma frequência ω'.

Um máximo de amplitude, ocorrerá sempre que a quantidade $2S_m \cos(\omega' t)$ tiver o valor $+1$ ou -1. Como estes valores ocorrem duas vezes a cada ciclo, o número de batimentos por ciclo é o dobro da frequência na qual a amplitude varia, ou seja,

$$\omega_b = 2\omega' \Rightarrow \omega_b = 2\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \Rightarrow \omega_b = \omega_1 - \omega_2 \,,$$

onde ω_b é a frequência angular do batimento. Como $\omega = 2\pi f$, podemos reescrever a última expressão como

$$2\pi f_b = 2\pi f_1 - 2\pi f_2 \,,$$

que após ser simplificada se torna simplesmente

$$f_b = f_1 - f_2 \tag{5.6}$$

Esta última equação nos dá então a frequência de batimento f_b. O fenômeno do batimento pode ser utilizado para afinar instrumentos musicais: basta tocar o instrumento e comparar a nota do instrumento com uma frequência padrão. O instrumento deverá então ser ajustado até que o batimento desapareça. Quando não houver mais batimento o instrumento estará afinado.

Um fenômeno interessante, que envolve os batimentos, é o que pode ocorrer quando se tocam simultaneamente duas notas agudas e bem próximas: um ouvido apurado escutará um som grave que não está entre as harmônicas das notas tocadas. É a nota causada pelos batimentos. No rádio constatamos muitas vezes que uma estação desaparece lentamente ou enfraquece, mas pouco depois volta com força normal. Repetindo-se este fenômeno, trata-se então provavelmente de batimentos. Uma outra estação, com uma frequência próxima à primeira, está irradiando ao mesmo tempo, causando o fenômeno. Neste caso as ondas envolvidas não são ondas sonoras, mas ondas eletromagnéticas.

Na vida prática os batimentos são frequentes. Por exemplo: sentado num ônibus velho, parado, mas com o motor ligado, escutamos uma janela ou outra peça do ônibus entrar em vibração de vez em quando. Trata-se de peças cuja frequência natural de oscilação é quase igual ao ritmo de vibração do motor. São, portanto, batimentos.

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 5-3

A corda de um violino está frouxa. Um afinador de instrumentos percebe cinco batimentos por segundo ao tocar conjuntamente a corda do violino e um diapasão de 440 Hz. Qual é a frequência da corda do violino?

SOLUÇÃO:

A frequência f_b do batimento será de 5 Hz. Usando a Eq. (5.6), temos $f_b = f_1 - f_2 \Rightarrow f_1 = f_b + f_2 = 5 + 440 = 445\,\text{Hz}$

* * * * * * * * * * * * *

5.6 O Efeito Doppler

Você já deve ter percebido que quando uma ambulância passa na rua com sua sirene ligada o som escutado por você sofre uma modificação à medida que a ambulância vai se aproximando e depois quando ela se afasta. Esta mudança no som que você verificou foi uma variação na frequência devido ao movimento da fonte sonora. Este efeito é chamado de *Efeito Doppler*. Neste caso a fonte sonora (a sirene da ambulância) está em movimento e o observador (você) está em repouso. A sirene da ambulância em movimento faz com que as frentes de ondas sonoras que ela emite tornem-se mais próximas uma das outras à frente da ambulância e mais separadas na região situada atrás da ambulância (veja a Fig. 5.6). Se um ouvinte se encontrar à frente da ambulância, ele receberá uma onda sonora de menor comprimento de onda (maior frequência), isto é, um som mais agudo. É claro que um ouvinte situado atrás do automóvel receberá uma onda sonora de maior comprimento de onda e, portanto, um som mais grave (menor frequência). Concluímos, então, que quando a ambulância está se aproximando do ouvinte ele perceberá o som com uma frequência maior e quando a ambulância estiver se afastando do ouvinte ele perceberá o som com uma frequência menor.

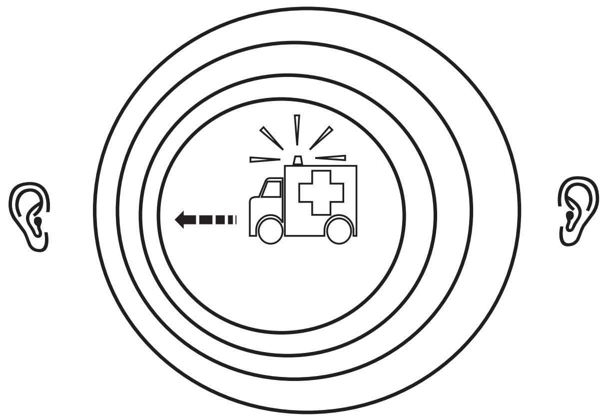


Figura 5.6: Efeito Doppler.

O efeito Doppler pode também ser causado quando a fonte que emite a onda sonora está em repouso e o ouvinte está em movimento. Neste caso quando o ouvinte estiver se aproximando da fonte sonora ele perceberá o som com uma frequência maior e quando o observador estiver se afastando da fonte sonora ele perceberá o som com uma frequência menor. Resumindo, sempre que a fonte e o ouvinte se aproximam a frequência detectada pelo ouvinte será maior, e quando a fonte e o ouvinte se afastam a frequência detectada pelo ouvinte será menor.

5.7 Ressonância em Tubo de Ar

Vimos na seção 3.8.5, do Capítulo 3, que ondas estacionárias podem ser produzidas numa corda elástica esticada que tem suas duas extremidades fixas. A onda gerada em uma das extremidades da corda se propaga por ela numa direção, sendo então refletida na outra extremidade fixa da corda, retornando ao longo da corda na outra direção. Vimos então que se o comprimento da corda for devidamente relacionado ao comprimento de onda das ondas que se propagam em sentidos opostos pela corda, a superposição destas duas ondas produzirá um padrão de ondas estacionárias na corda. A este fenômeno chamamos de ressonância, sendo que nesta condição a corda oscila com grande amplitude.

Se fizermos propagar uma onda sonora através de um tubo contendo ar poderemos obter também ondas sonoras estacionárias, de maneira análoga à que obtemos na corda. Para que isto ocorra o comprimento do tubo deve ser devidamente associado ao comprimento de onda da onda sonora. As ondas estacionárias podem ser obtidas com uma das extremidades do tubo aberta e a outra fechada (tubo fechado) ou com ambas as extremidades abertas (tubo aberto). Vejamos estes dois casos:

5.7.1 Tubo Aberto

As ondas sonoras, propagando-se dentro do tubo em direção à sua extremidade aberta, refletem-se parcialmente dentro do tubo. O fato de podermos ouvir o som fora do tubo é uma evidência de que a reflexão não é total. Como as extremidades do tubo são abertas a pressão nas extremidades será igual à pressão atmosférica e as extremidades sempre serão nós de pressão. Vimos na seção 4.3 que na região onde a variação de pressão Δp é mínima o deslocamento longitudinal dos elementos de volume de ar é máximo, e vice-versa. Assim sendo, nas extremidade do tubo o deslocamento longitudinal sempre será máximo (veja Fig. 5.7).

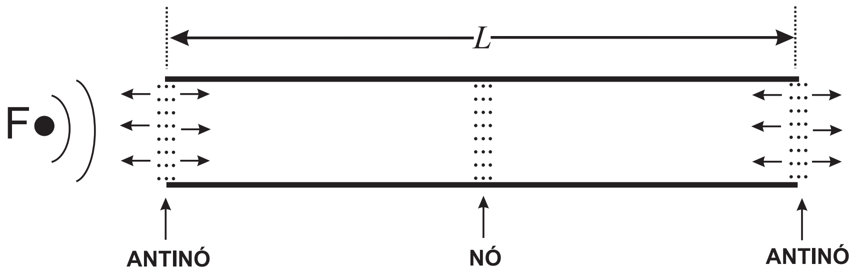


Figura 5.7: Padrão de onda estacionária mais simples que pode ser obtido em um tubo aberto.

A Figura 5.7 mostra o padrão de onda estacionária mais simples que pode ser obtido em um tubo aberto. Note que nesta configuração mais simples temos um nó de deslocamento bem no centro do tubo e um antinó em cada extremidade do tubo. Uma maneira mais simples de exibir os padrões de ressonância em um tubo de ar é fazer uma analogia com as ondas transversais em uma corda. As Figuras 5.8 e 5.9 mostram uma sequência de padrões de ressonância possíveis em um tubo aberto representadas como se fossem uma onda estacionária em uma corda, uma analogia bastante útil para uma melhor visualização do fenômeno. Na Fig. 5.8 é mostrada a variação de pressão no interior do tubo e na Fig. 5.9 é mostrado o deslocamento horizontal dos elementos de volume no interior do tubo. Observamos que os padrões de ressonância ocorrem nas condições:

$$
\begin{aligned}
1^{\text{o}}\,\text{padrão}: \quad L &= 1\frac{\lambda}{2} \\
2^{\text{o}}\,\text{padrão}: \quad L &= 2\frac{\lambda}{2} \\
3^{\text{o}}\,\text{padrão}: \quad L &= 3\frac{\lambda}{2} \\
&\vdots
\end{aligned}
$$

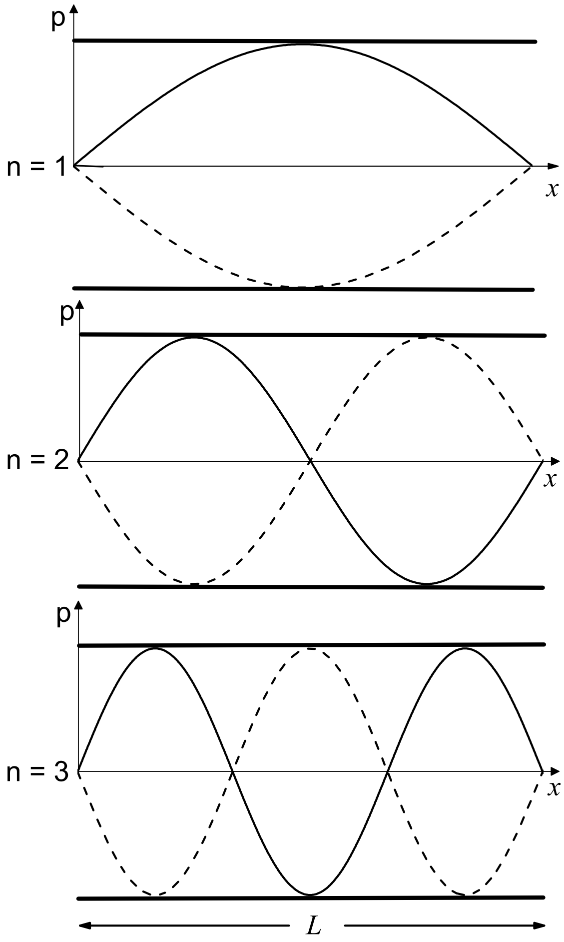


Figura 5.8: Variação da pressão no interior do tubo.

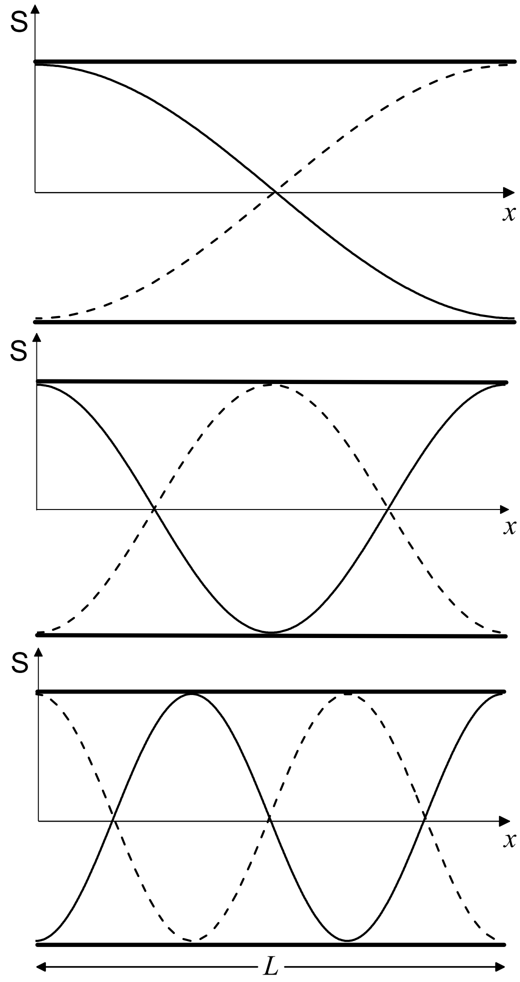


Figura 5.9: Deslocamento horizontal dos elementos no interior do tubo.

que pode ser estendido infinitamente. Notamos, porém, que esta série pode ser generalizada pela seguinte expressão:

$$L = n\frac{\lambda}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots ,$$

onde o índice n indica o *modo de ressonância* ("número harmônico"). Se remanejarmos a equação anterior os comprimentos de ondas permitidos serão

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \;\; n = 1, 2, 3, \dots \tag{5.7}$$

Lembrando que $\lambda = v/f$, a equação anterior pode ser escrita como

$$\frac{v}{f} = \frac{2L}{n}$$

Isolando f na equação anterior temos

$$f = n\frac{v}{2L}, \;\; n = 1, 2, 3 \dots \tag{5.8}$$

A frequência mais baixa que pode ser excitada, correspondendo a $n = 1$ na Eq. (5.8), é chamada de *frequência fundamental* ou *primeiro harmônico*, e as frequências remanescentes sendo designadas de *segundo harmônico* ($n = 2$), *terceiro harmônico* ($n = 3$), *quarto harmônico* ($n = 4$), etc.

5.7.2 Tubo Fechado

Um tubo com uma das extremidades fechada é um nodo de deslocamento (como a extremidade fixa da corda), no qual a amplitude de deslocamento de um elemento oscilante de ar é zero. Na extremidade aberta do tubo, no entanto, encontramos um antinodo de deslocamento, no qual a amplitude de deslocamento dos elementos de ar oscilantes têm um valor máximo. A Figura 5.10 mostra os três primeiros modos de um tubo fechado. A distância da linha central (eixo x) até as linhas senoidais desenhadas, em analogia à corda vibrante, representa a amplitude de deslocamento horizontal dos elementos de volume em cada local do interior do tubo. Quanto à variação de pressão no interior do tubo a extremidade fechada será um nodo de pressão e a aberta um antinodo.

Observamos que os padrões de ressonância ocorrem nas condições:

$$\begin{aligned} 1^{\text{o}}\,\text{padrão}: \quad L &= 1\frac{\lambda}{4} \\ 2^{\text{o}}\,\text{padrão}: \quad L &= 3\frac{\lambda}{4} \\ 3^{\text{o}}\,\text{padrão}: \quad L &= 5\frac{\lambda}{4} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Notamos que esta série pode ser generalizada pela expressão:

$$L = n\frac{\lambda}{4}, \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots ,$$

onde o índice n (que indica o modo de ressonância) deve agora ser um número ímpar. Em termos do comprimento de onda a equação anterior fica

$$\lambda = \frac{4L}{n} \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots \tag{5.9}$$

Usando que $\lambda = v/f$ e isolando f a equação anterior pode ser escrita como

$$f = n\frac{v}{4L} \quad n = 1, 3, 5, 7 \dots . \tag{5.10}$$

Observe que no tubo fechado (confira Eq. 5.10) somente os harmônicos ímpares podem existir: o primeiro harmônico corresponde a $n = 1$, o segundo harmônico a $n = 3$, o terceiro harmônico a $n = 5$, etc.

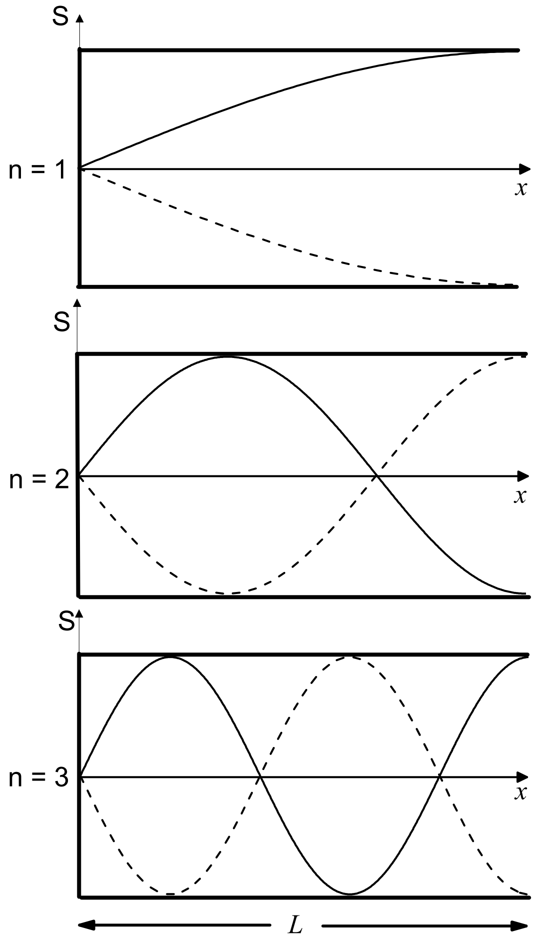


Figura 5.10: Padrões de ressonância em um tubo fechado.

Muitos museus de Ciências fazem uma demonstração que consiste numa coleção de tubos de vários comprimentos, abertos em ambas as extremidades. Colocando a orelha próxima à extremidade de um determinado tubo, podemos ouvir a frequência fundamental que é característica deste tubo. Isto acontece porque o ambiente, no qual os tubos se encontram, contêm sons de fundo, abrangendo todas as frequências para as quais o ouvido é sensível. Cada tubo ressoa em sua própria frequência fundamental característica, permitindo que o nível do som nessa frequência seja produzido. Movendo a orelha de tubo em tubo, podemos ouvir uma melodia simples. O tamanho físico de instrumentos baseados em tubos reflete o intervalo de frequências para as quais o instrumento foi projetado para funcionar.

Resumindo, as frequências de ressonância para tubo aberto e fechado ocorrem nas condições:

$$f = n\frac{v}{2L}\,, \quad n = 1, 2, 3 \ldots \text{(para tubo aberto)}$$

$$f = n\frac{v}{4L}\,, \quad n = 1, 3, 5, 7 \ldots \text{(para tubo fechado)}$$

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 5-4

O canal auditivo do ouvido humano situado na orelha externa pode ser comparado a um tubo de ar que é aberto em uma extremidade e fechado na outra pela membrana timpânica, correspondendo a um tubo fechado. Este canal possui um comprimento de cerca de 2,5 cm. Mostre que isto faz com que o ouvido humano seja mais sensível para sons com frequências próximas a 3.400 Hertz.

SOLUÇÃO:

Sabemos que em um tubo o som é intensificado para as frequências em que ocorre a ressonância. O ouvido comparado a um tubo será então mais sensível para as frequências de ressonância de um tubo fechado. Utilizando a equação (5.10) com $n = 1$, $L = 2{,}5$ cm $= 0{,}025$ m, e para uma velocidade do som no ar de cerca de 343 m/s, temos

$$f = n\frac{v}{4L} = 1\frac{343\,\mathrm{m/s}}{4 \times 0,025\,\mathrm{m}} = 3430\,\mathrm{Hz}$$

* * * * * * * * * * * * *

5.8 Ressonância em Membranas Vibrantes

Membranas são corpos flexíveis que possuem uma de suas dimensões muito menor que as outras duas, ou seja, a espessura bem menor que a largura e o comprimento. As vibrações em membranas não são definidas por nós e antinós de vibração, como nas cordas vibrantes, anteriormente estudadas. Devido ao seu formato característico, as vibrações nas membranas são definidas pelas *linhas nodais*, isto é, linhas cujos pontos permanecem em repouso, ao invés dos nós.

Uma maneira de se obter linhas nodais é mostrada na Fig. 5.11. Uma chapa metálica (circular ou quadrada) é colocada sobre um vibrador, e em cima da chapa despeja-se areia fina ou serragem. Ligando-se o vibrador o estudante poderá perceber linhas em que os grãos de areia não vibram. Estas serão as linhas nodais. O estudante poderá também verificar que para diferentes

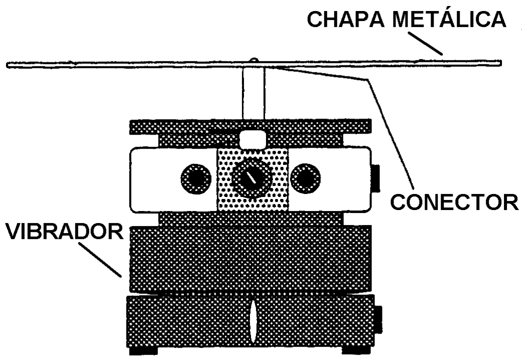


Figura 5.11: Chapa metálica colocada sobre um vibrador.

frequências irão se formar "imagens" diferentes (diferentes linhas nodais), como as mostradas na Fig. 5.12. A Figura 5.12 mostra quatro dos vários padrões de oscilação (ressonância) que a membrana metálica pode ter, para duas membranas quadradas e duas circulares. Nestes padrões dizemos que existem padrões de ondas estacionárias. Não só a frequência, mas a forma da chapa metálica irá influenciar os tipos de linhas nodais formadas. Pode-se perceber também que para frequências elevadas as linhas nodais se tornam bem estreitas enquanto que para frequências baixas praticamente toda a chapa entra em oscilação. Analogamente às chapas metálicas o tímpano também é uma membrana. Quando uma onda sonora atinge a membrana timpânica esta entra em vibração. A membrana timpânica irá, portanto, ter uma resposta diferente para as diferentes frequências de sons que a atingem.

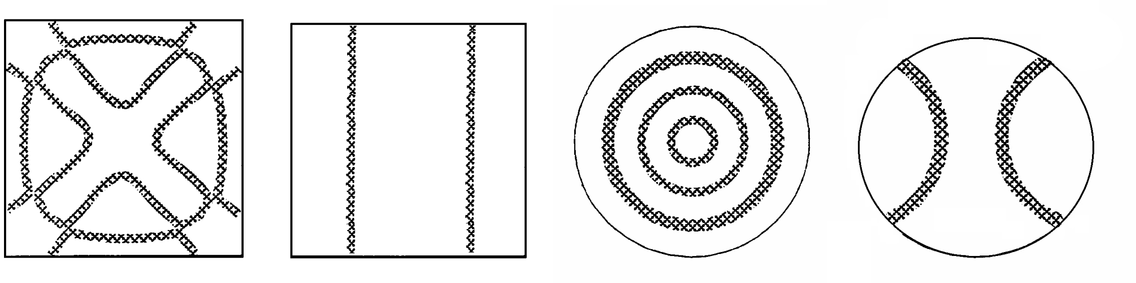


Figura 5.12: Linhas nodais sobre uma chapa.

A frequência fundamental dos instrumentos musicais, que utilizam membranas como fontes de vibração, irá depender da área da superfície e da tensão a que a membrana esteja submetida. Estes instrumentos podem ser afinados esticando ou afrouxando a membrana que os recobre. Instrumentos de percussão, tais como pandeiro, bumbo, tambor, tamborim, cuíca, são exemplos de instrumentos musicais que utilizam membranas. Estes instrumentos contêm membranas prensadas em um anel ou linha de suporte, o qual sempre será uma linha nodal.

QUESTIONÁRIO

1) Quando uma onda incide em um obstáculo quais os fenômenos que podem ocorrer?

2) O que é reflexão?

3) O que é eco?

4) O que é reverberação?

5) O que é refração?

6) Explique o que é impedância.

7) Explique o *casamento de impedância* existente no ouvido humano.

8) O que são materiais absorvedores de som?

9) Explique porque paredes porosas ou perfuradas absorvem o som.

10) Explique o que é difração.

11) Explique o fenômeno sonoro de batimento.

12) Cite uma utilidade do fenômeno de batimento.

13) O que é o efeito Doppler?

14) O que é frequência fundamental ou primeiro harmônico?

15) O que são membranas?

16) O que são linhas nodais?

17) Que relação existe entre o tímpano e membranas vibrantes?

PROBLEMAS

1) Determine a frequência de batimento (f_{bat}) de dois sons cujas frequências são: $f_1 = 500$ Hz e $f_2 = 498$Hz.

2) Determine a frequência de batimento de dois sons cujas frequências são: $f_1 = 100$ Hz e $f_2 = 99$ Hz.

3) Se os dois sons da questão anterior atingirem nossos ouvidos simultaneamente, ouviremos um único som. Qual é a frequência deste som?

4) Determine a frequência fundamental de um som emitido em um tubo aberto de 2 m de comprimento. Considere a velocidade do som no ar de 340 m/s.

5) Determine a frequência fundamental de um som emitido em um tubo fechado de 2 m de comprimento. Considere a velocidade do som no ar de 340 m/s.

6) Sabemos que uma criança possui um canal auditivo menor que um adulto. Determine qual será a frequência de ressonância fundamental para uma criança que possui um canal auditivo de 2 cm de comprimento. (veja o Exemplo 5-4).
Dado: considere a velocidade do som no ar igual a 340 m/s.

Capítulo 6

Produção e Sensação do Som

6.1 Introdução

O som pode ser produzido por corpos materiais que são colocados em vibração. Esta vibração é transferida para o ar ao redor do corpo material e transmitida de molécula a molécula do ar, até chegar aos nossos ouvidos. Sempre que escutamos um som, é porque um corpo (meio) material executou uma vibração. O som consiste de ondas de pressão que atingem o ouvido. Dentre as principais características do som podemos citar a *intensidade*, a *altura* e o *timbre*.

6.2 O Som e Suas Características

6.2.1 Intensidade

A intensidade do som é causada pela pressão exercida pela onda de pressão sobre o ouvido ou algum instrumento medidor, como por exemplo, um decibelímetro ou um dosímetro. Quanto maior a pressão, mais intenso é o som. A intensidade também está intimamente relacionada com a taxa de transmissão de energia (reveja a seção 4.6).

6.2.2 Altura

A altura do som está relacionada com a *frequência*, f, da onda sonora, de tal modo que quanto mais agudo for o som, maior é a sua frequência. Podemos definir, então, a altura como sendo a qualidade do som que nos permite classificá-lo como *grave* ou *agudo*. De um modo geral, os homens têm voz grave (voz "grossa") e, as mulheres, voz aguda (voz "fina"). Assim, podemos concluir que a frequência da voz masculina é, em geral, menor que a frequência da voz feminina (as pregas vocais dos homens vibram com frequência menor que as pregas vocais das mulheres, o motivo disto será explicado na seção 6.4). Em linguagem técnica, dizemos que um som agudo é *alto* e um som grave é *baixo*. Observamos, no entanto, que no cotidiano as pessoas erroneamente utilizam os termos "alto" e "baixo" para referir-se à intensidade do som, o que deve ser evitado. Em resumo, temos: a altura de um som é caracterizada pela frequência da onda sonora. Um som de pequena frequência é grave (baixo) e um som de grande frequência é agudo (alto).

6.2.3 Timbre

A maioria dos instrumentos tem mais de um corpo vibrante. No violão, por exemplo, não só as cordas, mas também todo o "corpo" do instrumento participa inteiramente do som que escutamos.

Se tocarmos uma certa nota em um violão e se esta mesma nota (mesma frequência) for emitida, com a mesma intensidade, por uma guitarra, seremos capazes de distinguir uma da outra, isto é, saberemos dizer claramente qual instrumento emitiu a nota. Dizemos, então, que estas notas têm *timbres* diferentes. A rigor o timbre não é uma característica do som, mas sim da fonte que o emitiu.

Isto acontece porque a nota emitida pelo violão é o resultado da vibração não só da corda acionada, mas também de várias outras partes do violão (madeira, do ar em seu interior, outras cordas etc.) que vibram juntamente com ela. Assim, a onda sonora emitida terá uma forma própria, característica do violão. De modo semelhante, a onda sonora emitida pela guitarra é o resultado de vibrações características deste instrumento e, por isto, apresenta uma forma diferente da onda emitida pelo violão. O que dissemos para o violão e a guitarra se aplica também aos demais instrumentos musicais: a onda sonora resultante que cada instrumento emite, correspondente a uma dada nota musical, tem uma forma própria, característica do instrumento, isto é, cada um possui o seu próprio timbre. Na Figura 6.1 mostramos a forma resultante de uma onda sonora, para uma mesma frequência, emitida por diferentes instrumentos musicais.

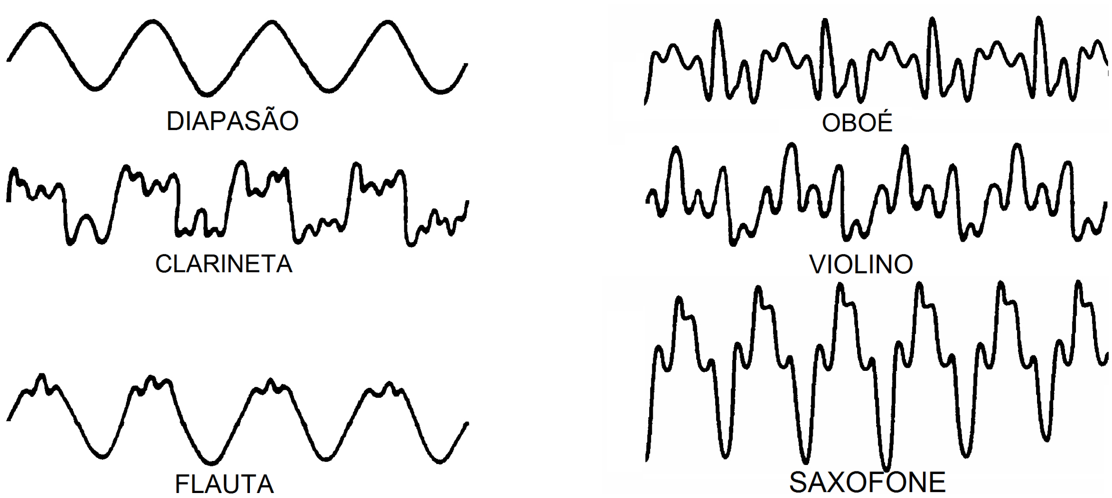


Figura 6.1: Formato da onda produzida por diferentes instrumentos para uma mesma nota musical.

Notamos, então, que sons de mesma frequência, mas de timbres diferentes, correspondem a ondas sonoras cujas formas são diferentes. Portanto, podemos dizer que nosso ouvido é capaz de distinguir dois sons, de mesma frequência e mesma intensidade, desde que as formas das ondas sonoras correspondentes a estes sons sejam diferentes.

A voz de uma pessoa também tem um timbre próprio, porque a forma da onda sonora que a pessoa emite é determinada por características pessoais. É por este motivo que podemos identificar uma pessoa pela sua voz. Instrumentos de análise de voz podem determinar por comparação com muita precisão (como uma impressão digital) se uma voz gravada em uma fita, por exemplo, realmente pertence à uma determinada pessoa.

6.3 Tom, Ruído e Barulho

6.3.1 Tom

O *tom* é uma oscilação audível de uma única frequência. Enquanto que o som pode ser a somatória de diversas frequências (diversos tons). Quando empregamos o termo tom estamos nos referindo a uma onda harmônica senoidal cuja frequência é única e muito bem definida como, por exemplo, 400 Hz. Uma nomenclatura redundante, porém, muito utilizada no lugar de *tom* é a de *tom puro*. Na natureza é praticamente impossível encontrar tons puros. O som produzido por um diapasão é o que mais se assemelha ao tom puro (veja na Fig. 6.1 o formato da onda produzida por um diapasão).

6.3.2 Ruído

O *ruído* é uma oscilação acústica aperiódica originada da soma de várias oscilações audíveis com diferentes frequências. As frequências do ruído não podem ser discriminadas porque elas diferem entre si por valores inferiores aos que podem ser detectados pelo aparelho auditivo. Apesar do ruído ser a superposição de vários movimentos de vibração com diferentes frequências, poderá haver a predominância de frequências altas, médias ou baixas caracterizando os ruídos como agudos ou graves. A Fig. 6.2 mostra a amplitude de um ruído em função da frequência para um determinado instante de tempo.

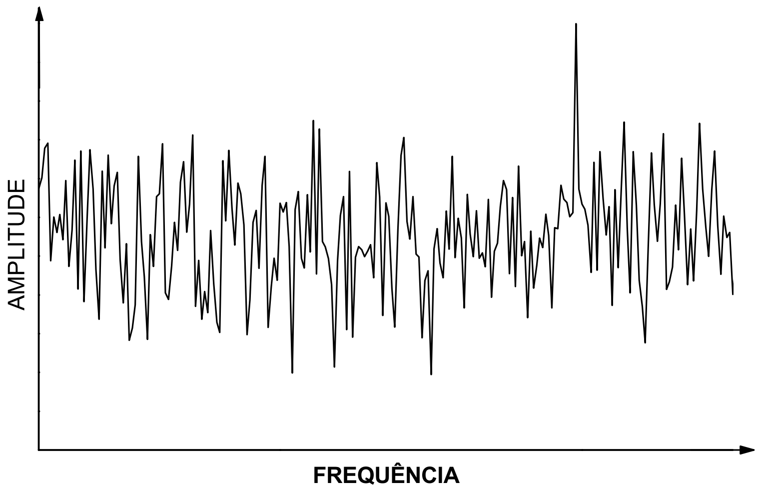


Figura 6.2: Figura típica de ruído.

6.3.3 Barulho

Quando o som se torna indesejável ele é classificado como *barulho*. A diferença fundamental entre barulho e som é o aspecto “indesejado”. A classificação do barulho é, portanto, subjetiva. O que é música para uma pessoa pode ser barulho para outra. Deve ser notado aqui que tecnicamente a utilização de ruído e barulho como sinônimos não é correta, visto que as suas definições são bem diferentes.

6.4 Sons Musicais

Os sons musicais podem ser produzidos por *membranas vibrantes*, por *cordas vibrantes*, por *tubos* que possuem colunas de ar, por barras e ainda de muitas outras formas.

6.4.1 Cordas Vibrantes

Denomina-se *corda vibrante* a um fio elástico tensionado, com as extremidades fixas entre dois pontos fixos. Quando postas a vibrar as cordas geram ondas estacionárias que transmitem esta vibração às partículas de ar ao seu redor, provocando uma onda sonora de igual frequência à da onda estacionária na corda. Vimos na seção 3.8.5 que esta frequência depende do comprimento da corda. Pressionando a corda em diferentes pontos podemos, então, variar a frequência do som emitido, pois fazendo isto estamos diminuindo ou aumentando o comprimento da corda. Além do comprimento da corda ressaltamos que a frequência natural ou de ressonância irá depender da densidade da corda vibrante. Exemplos de instrumentos musicais que utilizam cordas são: guitarra, piano, violino, harpa, violão, viola, cavaquinho, contrabaixo etc.

6.4.2 Membranas

Membranas são corpos flexíveis que possuem uma de suas dimensões muito menor que as outras duas, ou seja, a espessura bem menor que a largura e o comprimento. Exemplo de instrumentos musicais que utilizam membranas são: timbale, tarol, pandeiro, bumbo, tambor, tamborim, cuíca etc. Na sua confecção é muito comum a utilização de couro curtido. O princípio para a geração do som é idêntico ao das cordas. Quando batemos em uma membrana esta entra em oscilação produzindo ondas sonoras. A frequência das ondas sonoras emitidas irá depender da superfície da membrana e da tensão em que ela se encontra. Se a membrana estiver completamente afrouxada nenhum som é produzido. O afinamento deste tipo de instrumento pode ser realizado afrouxando ou esticando a membrana (reveja a seção 5.7).

6.4.3 Tubos Sonoros

Conforme vimos na seção 5.6 do Capítulo 5 podemos fazer com que o ar no interior de um tubo oscile produzindo ondas sonoras. De maneira análoga às cordas vibrantes as ondas sonoras geradas por tubos irão depender da forma e do comprimento do tubo. Os tubos sonoros são encontrados nos instrumentos musicais de sopro, tais como: corneta, saxofone, trombone, clarim, flauta, oboé, órgão de tubo etc.

6.4.4 Barras

O som pode ser produzido também por *barras* como blocos de madeira vibrante ou barras de aço. Exemplos de instrumentos musicais que utilizam barras são a marimba e o xilofone. A denominação de *barra* é dada a todo corpo sólido que possui uma dimensão sensivelmente maior que as outras, ou seja, o comprimento é maior que a largura e a espessura. Como uma barra possui grande rigidez ela poderá vibrar mesmo que uma de suas extremidades se encontre livre. Notamos que é impossível uma corda vibrar com uma de suas extremidades livre.

Uma barra muito utilizada na área de fonoaudiologia é o *diapasão*. O diapasão é uma barra metálica em forma de U (veja Figura 6.3). O diapasão é por natureza um emissor de som fraco por ser constituído sempre de dois emissores. Cada extremidade é um emissor e estes dois sempre estão em oposição, porque um vibra contra o outro, anulando-se (mas não completamente) o som por interferência. O diapasão é utilizado na realização de testes com o intuito de comparar a acuidade auditiva por via aérea e óssea. Para este fim são utilizados diapasões de 512 Hz, 1.024 Hz e 2.048 Hz. Por ser um instrumento cujo som produzido mais se assemelha a um tom puro o diapasão é utilizado na música para a afinação de instrumentos. Para esta finalidade o diapasão mais utilizado é o de 440 Hz. Para se extrair o som de um diapasão basta bater um objeto contra uma de suas barras como mostra a Figura 6.3. No entanto isto deve ser feito de preferência com um material macio, por exemplo, um martelo com uma ponta de borracha; se for utilizado um material rígido isto poderá deformar o diapasão alterando a sua frequência padrão.

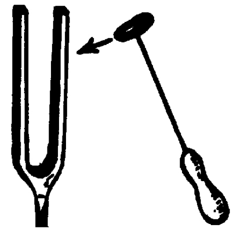


Figura 6.3: Diapasão.

6.4.5 Nota Musical e Intervalo

Uma nota musical é caracterizada por sua frequência, isto é, quando um instrumento musical emite notas diferentes, ele está emitindo sons de "frequências diferentes". Em um piano, por exemplo, a cada tecla corresponde um som de frequência diferente. Os cantores de música clássica são classificados de acordo com as frequências das notas que eles são capazes de emitir: os baixos (voz grave-homem), os tenores (voz aguda-homem), os sopranos (voz aguda-mulher) etc. As frequências das notas que estes cantores são capazes de emitir variam desde cerca de 100 hertz (baixo) até cerca de 1.200 hertz (soprano). Um conceito importante em música é o *intervalo*. Sejam dois sons cujas frequências são f_1 e f_0, respectivamente, com f_1 maior ou igual a f_0. Damos o nome de intervalo (i) entre esses sons a razão entre as suas frequências, isto é:

$$i = \frac{f_1}{f_0}\,, \tag{6.1}$$

desde que $f_1/f_0 \geq 1$. Se $i = 1$ (ou seja, quando $f_1 = f_0$) o intervalo recebe o nome de uníssono. Se $i = 2$ (quando $f_1 = 2f_0$) o intervalo recebe o nome de *intervalo de oitava*. Uma oitava refere-se, então, ao dobro da frequência. Ressaltamos que uma oitava não se refere à diferença de frequência, mas sim à razão entre elas. Deste modo, 200 Hz está uma oitava acima de 100 Hz e duas oitavas acima de 50 Hz, enquanto que 100 Hz está uma oitava acima de 50 Hz e duas oitavas acima de 25 Hz. Uma fórmula geral pode ser obtida observando-se que $f_1 = 2f_0$, $f_2 = 2 \times 2f_0$, $f_3 = 2 \times 2 \times 2f_0$ e de forma generalizada

$$f_n = 2^n f_0\,, \tag{6.2}$$

com $n \geq 0$.

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 6-1
Sabemos que a frequência da nota Lá$_1$, mais grave de um piano é 27,5 Hz. Quais são os valores das frequências das outras notas (Lá$_2$, Lá$_3$,...,Lá$_8$)?
SOLUÇÃO:
Fazendo $f_1 = 27,5$ Hz e utilizando a Eq. (6.2) temos:

Lá$_2$: $f_2 = 2^1 \times 27,5 = 55\,\mathrm{Hz}$
Lá$_3$: $f_3 = 2^2 \times 27,5 = 110\,\mathrm{Hz}$
Lá$_4$: $f_4 = 2^3 \times 27,5 = 220\,\mathrm{Hz}$
Lá$_5$: $f_5 = 2^4 \times 27,5 = 440\,\mathrm{Hz}$
Lá$_6$: $f_6 = 2^5 \times 27,5 = 880\,\mathrm{Hz}$
Lá$_7$: $f_7 = 2^6 \times 27,5 = 1760\,\mathrm{Hz}$
Lá$_8$: $f_8 = 2^7 \times 27,5 = 3520\,\mathrm{Hz}$

Exemplo 6-2
Sabe-se que a frequência da nota Dó$_3$ vale 256 Hz. Qual é o valor da frequência Dó$_1$?
SOLUÇÃO:
Fazendo $f_3 = 256$ Hz e utilizando a Eq. (6.2) temos:

$$f_3 = 2^2 f_1 \Rightarrow 256 = 4 \cdot f_1 \Rightarrow f_1 = 64\,\mathrm{Hz}$$

O valor da nota Dó$_1$ é, portanto, 64 Hz.

* * * * * * * * * * * * *

6.5 Produção da Fala

A produção da fala, processo conhecido como fonação, envolve regiões específicas da fala no córtex cerebral e as funções mecânicas para produção de um som audível que irá constituir a voz. Através do controle desse som será possível produzir um fonema bem definido.

A voz é produzida através de uma corrente de ar proveniente dos pulmões, passando pela laringe e pela boca. Nesta passagem da corrente de ar, entra o papel fundamental da vibração das *pregas vocais* (o termo *cordas vocais* está em desuso) na direção lateral do fluxo de ar. As cordas vocais são pregas situadas ao longo das paredes laterais da laringe. Estas pregas são posicionadas e tencionadas por vários músculos específicos.

A frequência dos pulsos sonoros emitidos irá depender da tensão e da massa das cordas vocais. Uma pessoa poderá, portanto, alterar a frequência de sua voz variando a tensão em suas cordas vocais. A análise dos espectros de frequência da voz humana mostra que o som emitido está compreendido entre 100 e 8.000 Hz, sendo a faixa de maior concentração entre 300 e 3.000 Hz. A frequência fundamental típica da voz masculina é de 125 Hz, enquanto que a feminina é de 250 Hz. Esta diferença ocorre porque em geral as cordas vocais de um homem são mais densas e compridas que as de uma mulher.

A fala difere de um idioma para outro, no entanto, todos os sinais de fala têm diversas características comuns. A fala não é um sinal constante, mas sim flutuante porque os seus componentes variam de um momento para o outro. Um som de fala possui estruturas de tempo e frequência característicos que permitem que ele seja diferenciado em relação a outros sons de fala. As vogais possuem um determinado número de picos no espectro e as frequências destes picos permitem identificar a vogal. Já as consoantes possuem uma duração menor sendo influenciadas pelas vogais em seu redor.

Em sua totalidade a produção da fala envolve também o palato mole, a língua, os lábios e as cavidades ressonantes compostas pela cavidade torácica, faringe, boca, nariz e seios nasais associados. A função dessas cavidades é amplificar o som produzido. A importância do ressonador nasal, quando falamos, pode ser verificada quando estamos resfriados ou quando tampamos o nariz com os dedos.

$*\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *$

Exemplo 6-3

Ondas estacionárias são produzidas em duas cordas diferentes. Uma delas tem um comprimento de 0,5 m e a outra um comprimento de 1,0 m. Sabendo-se que as duas cordas possuem a mesma densidade linear de 0,0005 kg/m e estão sob uma tensão de 1 N, qual das duas cordas emitirá sons com uma frequência menor? Considere n = 1.

SOLUÇÃO:

Utilizando a Eq. (3.33) com $L = 0{,}5$ m e $L = 1$ m temos:

$$f = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \frac{1}{2\cdot 0,5\,\mathrm{m}}\sqrt{\frac{1\,\mathrm{N}}{0,0005\,\mathrm{kg/m}}} \simeq 44,7\,\mathrm{Hz}$$

$$f = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \frac{1}{2\cdot 1\,\mathrm{m}}\sqrt{\frac{1\,\mathrm{N}}{0,0005\,\mathrm{kg/m}}} \simeq 22,4\,\mathrm{Hz}$$

Verificamos, então, que a corda de maior comprimento produz uma onda com menor frequência.

Exemplo 6-4

Ondas estacionárias são produzidas em duas cordas diferentes. Uma delas tem uma densidade linear de 0,0005 kg/m e a outra uma densidade linear de 0,0009 kg/m. Sabendo-se que as duas cordas possuem o mesmo comprimento de 0,5 m e estão sob uma tensão de 1 N, qual das duas cordas emitirá sons com uma menor frequência? Considere n = 1.

SOLUÇÃO:

Para $\mu = 0,0005\,\mathrm{kg/m}$ e $L = 0{,}5$ m o resultado é o mesmo do exemplo anterior, ou seja $f \simeq 44,7\,\mathrm{Hz}$. Para $\mu = 0,0009\,\mathrm{kg/m}$ temos:

$$f = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \frac{1}{2\cdot 0,5\,\mathrm{m}}\sqrt{\frac{1\,\mathrm{N}}{0,0009\,\mathrm{kg/m}}} \simeq 33,3\,\mathrm{Hz}$$

Verificamos, então, que a corda com maior densidade linear produz uma onda com menor frequência.

$*\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *\ *$

6.6 Audição

A função do ouvido é captar ondas mecânicas, geralmente fracas, que se propagam no ar e converte-las em estímulos nervosos que serão decodificados e interpretados por uma região do cérebro conhecida como córtex auditivo. A Figura 6.4 mostra as principais partes do aparelho auditivo. O ouvido é composto por três partes: orelha externa, orelha média e orelha interna. Vejamos com mais detalhes cada uma destas três partes.

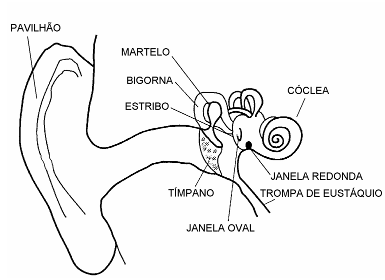


Figura 6.4: Aparelho auditivo.

6.6.1 Orelha Externa

A orelha externa é constituída pelo *pavilhão auricular* e pelo *meato acústico externo*, (veja Figura 6.5). O pavilhão auricular (ou pina) é cartilaginoso e graças à sua anatomia capta as ondas sonoras e as converge para o canal auditivo. O meato acústico externo, também conhecido como canal auditivo, tem um formato irregular e curvo possuindo um comprimento de aproximadamente 2,5 cm e um diâmetro de aproximadamente 8 mm (reveja o Exemplo 5.2 do Capítulo 5). No final do meato acústico externo encontra-se a *membrana timpânica*. A membrana timpânica separa a orelha externa da orelha média. A forma curva do meato acústico externo impede que água ou outros corpos estranhos se acumulem nele. A porção externa do meato acústico é cartilaginosa e a porção interna é óssea. Uma importante função do meato acústico é a produção de uma secreção, de cor amarela ou marrom, conhecida como *cera* que protege o ouvido médio. Além de ser uma proteção para a orelha média, a orelha externa tem a finalidade de direcionar e amplificar os sons recebidos pelos nossos ouvidos.

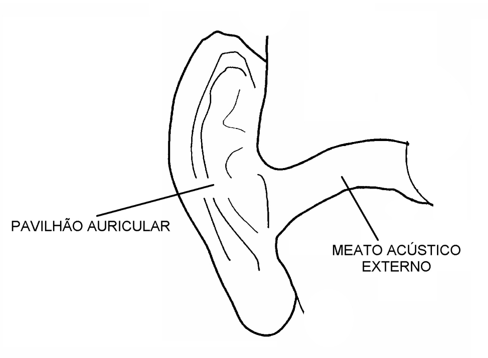


Figura 6.5: Orelha externa.

6.6.2 Orelha Média

A orelha média situa-se entre a membrana timpânica e a janela oval (veja Figura 6.6). Os três ossículos da orelha média (martelo, bigorna e estribo) formam uma cadeia mecânica responsável pela transmissão do som proveniente da membrana timpânica para a orelha interna (neste ponto é recomendável que o leitor reveja o conceito de impedância exposto na seção 5.2). Ligados a esta cadeia de ossículos estão dois pequenos músculos: o *estapédio* e o *tensor do tímpano*. O estapédio se origina na parede do tímpano e se insere no colo do estribo por um tendão, servindo para retrair o estribo e amortecer as suas vibrações. A pressão dentro do ouvido médio é mantida igual à pressão atmosférica através da *trompa de Eustáquio* (ou tuba auditiva). A pressão do ar sobre ambos os lados do tímpano deve ser equivalente à pressão atmosférica para que a transmissão do som seja adequada. A tuba de Eustáquio é um canal que conecta a cavidade do ouvido médio ao nariz e garganta. A tuba se encontra normalmente fechada e se abre quando engolimos ou assoamos o nariz. A tuba poderá se abrir também em decorrência de uma variação brusca de pressão. Uma das causas mais comuns de problemas no ouvido médio é a disfunção da tuba de Eustáquio.

6.6.3 Orelha Interna

A orelha interna consiste dos labirintos auditivo e vestibular. A palavra labirinto é usada como referência a seu formato tortuoso. É na orelha interna que se situa a cóclea, a qual está localizada numa cavidade do osso temporal (veja Figura 6.6).

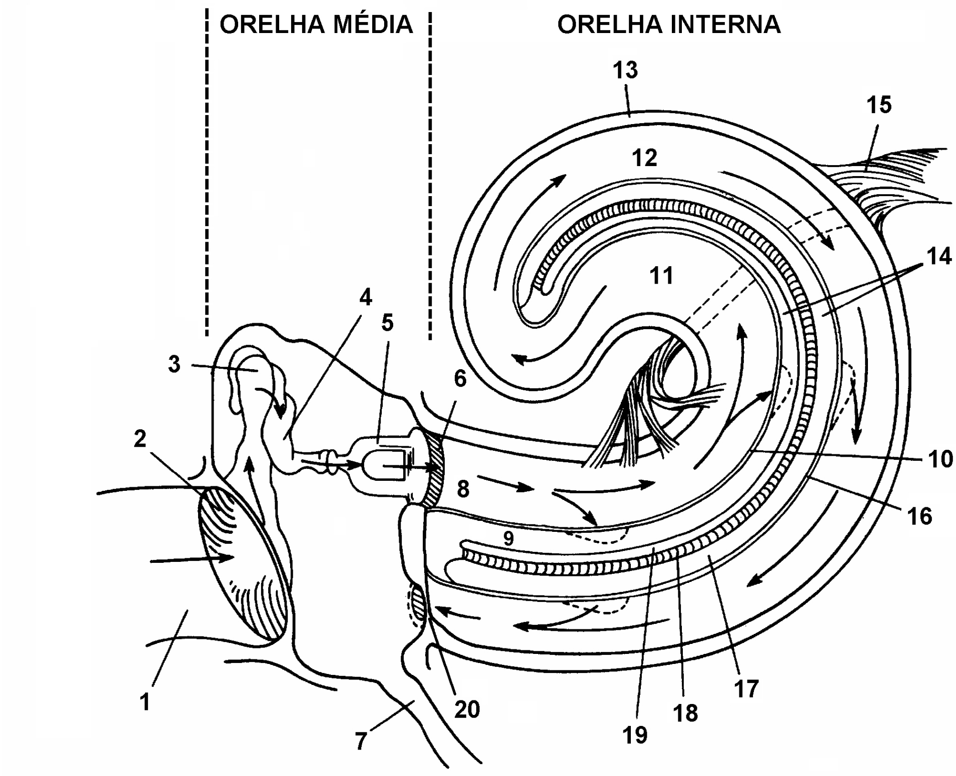


Figura 6.6: Principais partes da orelha: (a) orelha externa: 1-meato acústico externo; (b) orelha média: 2-membrana timpânica, 3-martelo, 4-bigorna, 5-estribo, 6-janela oval, 7-trompa de Eustáquio; (c) orelha interna: 8-perilinfa, 9-endolinfa, 10-membrana vestibular, 11-rampa vestibular, 12-rampa timpânica, 13-cóclea, 14-rampa média ou ducto coclear, 15-nervo vestibular, 16-membrana basilar, 17-órgão de corti, 18-cílios, 19-membrana tectorial, 20-janela redonda.

A cóclea (que tem um formato de caracol) possui dois tipos de fluidos: a endolinfa (que possui grande concentração de potássio e baixa de sódio) e a perilinfa (que possui grande concentração de sódio e baixa de potássio). As vibrações sonoras provenientes da base do estribo entram pela janela oval na escala vestibular. A base do estribo está conectada às laterais da janela oval por um ligamento anular relativamente frouxo, de tal forma que a base do estribo pode mover-se para dentro e para fora conforme as vibrações sonoras. A cóclea, mais especificamente as células ciliadas, é responsável pela conversão do som em impulsos elétricos, que serão recebidos pelo córtex auditivo que decodifica e interpreta estes impulsos.

6.7 Sensibilidade do Ouvido Humano

Existe um valor mínimo do nível de pressão sonora capaz de sensibilizar o aparelho auditivo. Este valor mínimo depende da frequência do som, como mostra a Figura 6.7, variando levemente também de uma pessoa para outra. Para uma frequência aproximada de 1.000 Hz e para um ouvido normal, este limite mínimo foi definido como 0 dB. Verificou-se também que as frequências audíveis estão aproximadamente entre 16 e 20.000 Hz.

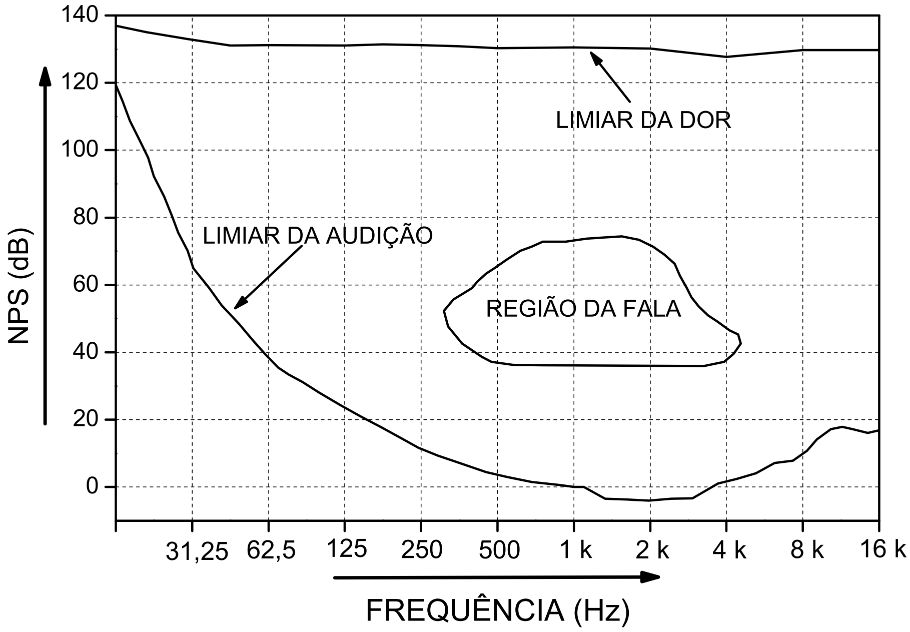


Figura 6.7: Curva de sensibilidade do ouvido humano.

A curva inferior na Figura 6.7 indica o nível de pressão sonora mínimo com que um som pode ser sentido para uma pessoa com audição normal. Abaixo desta curva encontra-se a região não audível. Notamos pela figura que a sensibilidade do ouvido humano é maior para frequências compreendidas entre 1.000 e 5.000 Hz. A curva superior indica o limiar de dor. Níveis de pressão sonora acima desta curva podem trazer sérios problemas à audição. A figura mostra também a região principal da fala compreendida entre 300 e 4.000 Hz, com níveis de pressão sonora variando de 40 a 70 dB.

Para a obtenção da curva do limiar da audição mostrada na Fig. 6.7, devem ser feitos testes com várias pessoas jovens (entre 18 e 25 anos) com audição normal fazendo uma média dos valores obtidos do NPS mínimo capaz de sensibilizar o ouvido para cada frequência respectiva. Deve ser feita uma média porque os valores variam levemente de um indivíduo para outro. A Fig. 6.7 representa, portanto, a média da população[1].

Um audiograma é a representação gráfica do limiar auditivo em função da frequência, em intervalos de oitavas ou meias-oitavas, de frequências entre 125 Hz e 8.000 Hz. O audiograma é

[1]veja, por exemplo, as referências: I. J. Sivian, *On minimum audible sound fields*, Journal Acoust. Soc. Am., vol. 4, p. 288 (1933); T. M. M. Santos e I. C. P. Russo, *A prática da audiologia clínica*, ed. Cortez, SP (1993); H. Davis, *Acoustic and psychoacoustics*, ed. Holt, NY (1970); H. Davis e S. R. Silverman, *Hearing and deafness*, ed. Holt, NY (1970).

obtido através de procedimentos realizados por um profissional habilitado da área de audição. O limiar auditivo deverá ser medido individualmente para cada orelha apresentando ao paciente uma série de tons puros, verificando o som mais fraco que o paciente pode ouvir. Podem ser constatados três níveis principais: o limiar auditivo (que se refere aos sons mais fracos que podem ser ouvidos), o nível mais confortável (que se refere à melhor percepção da fala pelo indivíduo em teste) e o limiar do desconforto (que se refere aos níveis em que o som trás incômodo ao indivíduo em teste). Para representar a redução na sensibilidade auditiva o audiograma apresenta apenas o nível de pressão sonora adicional, em relação à média da população, necessário para sensibilizar o ouvido de um paciente. Contudo, a audição de um paciente será considerada normal quando o seu limiar de audição estiver até 20 dB acima da curva do limiar da audição mostrada na Fig. 6.7. Dois exemplos de audiogramas são mostrados na Figura 6.8: (a) um paciente com audição normal e (b) um paciente com perda auditiva.

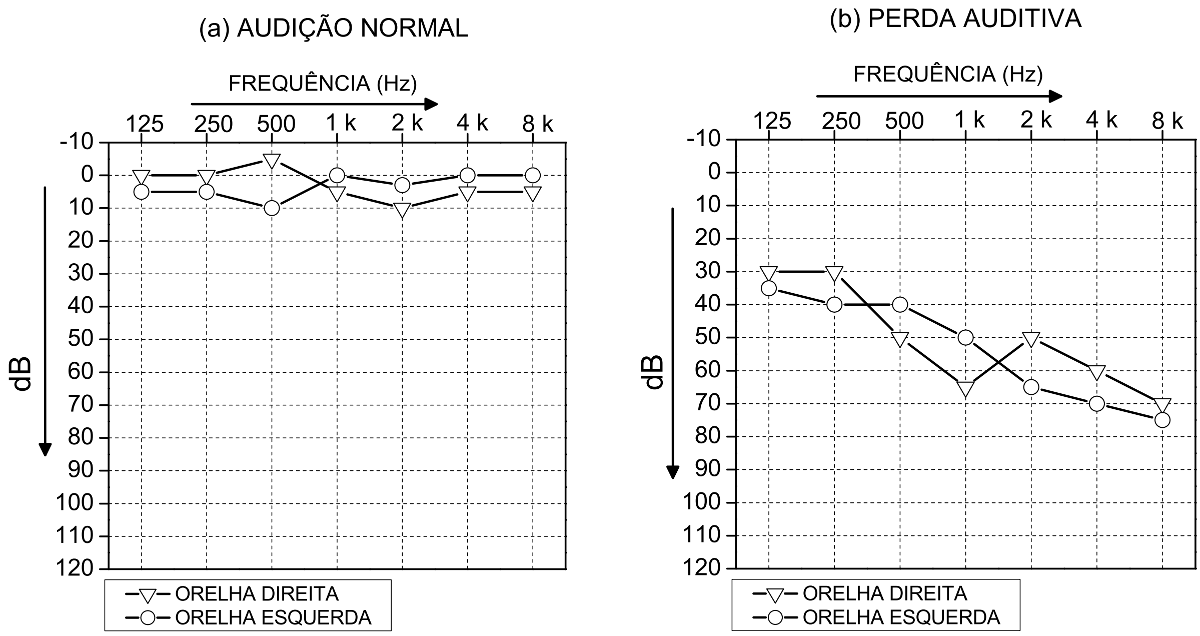


Figura 6.8: Audiograma de dois indivíduos: (a) um com audição considerada normal e (b) outro com perda auditiva considerável.

* * * * * * * * * * * * *

Exemplo 6-5

Analisando a Fig. 6.8(b), qual é a perda auditiva, para cada orelha, para as frequências de 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 e 8.000 Hz?

SOLUÇÃO:

FREQUÊNCIA (Hz)	PERDA AUDITIVA (dB) (orelha direita)	PERDA AUDITIVA (dB) (orelha esquerda)
125	30	35
250	30	40
500	50	40
1 k	65	50
2 k	50	65
4 k	60	70
8 k	70	75

* * * * * * * * * * * * * *

Existem duas definições importantes no estudo da percepção auditiva. São elas:

- *Loudness*: é a sensação subjetiva de intensidade.
- *Pitch*: é sensação subjetiva de frequência.

Tanto o loudness quanto o pitch são aspectos psicológicos do som, pois tratam da avaliação que um indivíduo faz de um som, referindo-se à escuta direta da intensidade e da frequência avaliadas por respostas discriminatórias de um indivíduo com audição normal.

A fim de tornar quantitativa a medida do loudness foi criada uma unidade conhecida como *fone* (ou fon), que é a sensação de intensidade (medida em decibéis) produzida por um tom de 1.000 Hz a partir de curvas isofônicas, ou seja, curvas de igual audiabilidade, determinadas através de experimentos[2] (veja Figura 6.9). Note pela figura que quanto mais se aumenta a intensidade, as curvas isofônicas tendem a se achatarem.

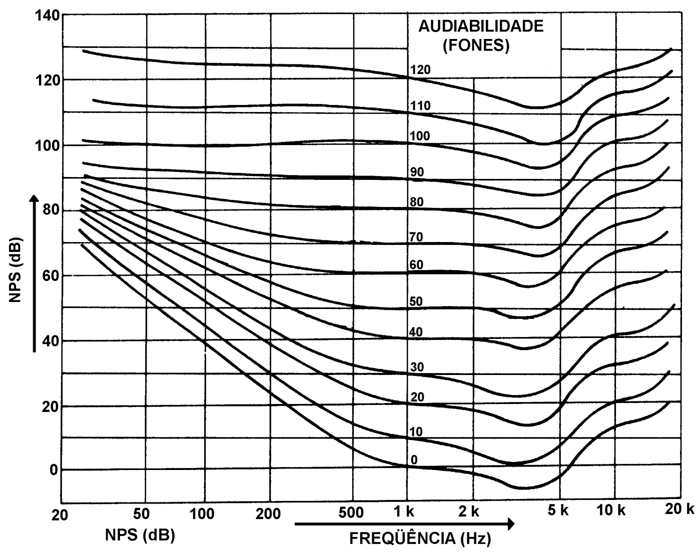


Figura 6.9: Curvas isofônicas.

[2]veja, por exemplo, as referências: H. Fletcher e W. A. Munson, *Loudness, its definition, measurement and calculation*, Journal Acoust. Soc. Am., vol. 5, p. 82 (1933); H. Fletcher, *Speech and hearing*, D. van Nostrand Company, NY (1943).

Através de testes com pacientes, verificou-se que um aumento de 10 dB no nível de pressão sonora de um som correspondia aproximadamente a dobrar o loudness. Com isto criou-se uma nova unidade, o *sone*. Por definição 1 sone equivale a 40 fones. O sone é uma forma prática para se medir proporções de loudness.

6.8 Binauralidade

A binauralidade é a capacidade das duas orelhas na localização dos sons, ou seja, é o poder de reconhecer de qual direção provém o som. As duas orelhas estão separadas por uma distância de aproximadamente 21 cm e é bem sabido que realmente é necessário que se possua duas orelhas para sabermos de onde provém o som. Não é preciso que uma pessoa perca totalmente a audição de uma orelha para não localizar uma fonte sonora, basta que haja uma diferença significativa na acuidade entre as duas orelhas para que o indivíduo não consiga mais localizar a procedência do som. Existem três fatores independentes e não auto-suficientes que contribuem para a localização de uma fonte sonora: o *efeito do tempo*, o *efeito da fase* e o *efeito da intensidade*:

- *Efeito do tempo*: as duas orelhas não estão localizadas à mesma distância de uma fonte sonora, ocorrendo uma diferença no tempo de chegada do som às duas orelhas.

- *Efeito da fase*: quando o som atinge as duas orelhas existe uma diferença de fase no som recebido por cada orelha. A crista da onda sonora atinge uma orelha antes da outra, promovendo a localização do som.

- *Efeito da intensidade*: a cabeça representa um obstáculo de interferência ao som criando uma sombra acústica, a qual faz com que o som atinja as orelhas com intensidades diferentes.

6.9 Poluição Sonora

É bem sabido que as *ondas eletromagnéticas* (como os raios X, raios gama, raios ultravioleta, etc.) sob certas condições podem causar danos à saúde do homem, como por exemplo, o câncer. Além das ondas eletromagnéticas as *ondas sonoras* também podem causar mal-estar ou afetar a saúde do homem de forma física ou psicológica. Como vimos na seção 6.1 o som é transmitido por ondas de pressão através do ar ao viajar de um objeto em vibração até a orelha de um ouvinte. As ondas de pressão podem ser produzidas em qualquer material que tenha elasticidade. O som consiste, portanto, em ondas de pressão em um meio elástico. Quanto maior a pressão mais intenso é o som. O som ao atingir o ouvido de uma pessoa causa uma variação de pressão no ouvido desta pessoa. Quando o som se torna indesejável ele é classificado como *barulho*. Essa definição de barulho, como "som indesejável", incorpora dois elementos inseparáveis do barulho: *preferência opinativa* (indesejável) e o *fenômeno físico* (som). A diferença fundamental entre barulho e som é o aspecto "indesejado". A classificação do barulho é, portanto, subjetiva. O que é música para uma pessoa pode ser barulho para outra.

Foi comprovado que os barulhos podem provocar distúrbios nervosos, neurose, insônia, perda da audição, ansiedade e desvio da atenção. O sono pode ser afetado pelo barulho mesmo quando a pessoa não acorda, ficando o indivíduo com uma sensação de uma "noite mal dormida". O barulho também diminui a eficiência de um indivíduo no trabalho. Inúmeros testes realizados mostraram que as taxas de acidentes e a produtividade geralmente podem melhorar quando se diminuem os níveis de barulho. Outros testes demonstraram que os habitantes rurais têm audição mais apurada que os habitantes urbanos, o que leva a crer que o excessivo barulho urbano realmente prejudica a audição. Sabe-se ainda que os efeitos dos barulhos podem ser acumulativos. Deve ser enfatizado, no entanto, que os barulhos afetam cada pessoa de uma forma: diferentes indivíduos expostos aos mesmos barulhos podem não mostrar as mesmas reações.

Devido aos vários efeitos nocivos que os barulhos podem trazer ao ser humano, sejam fisiológicos ou psicológicos, torna-se, então, muito importante o seu monitoramento e controle. A perda da audição é uma das maiores justificativas para controlar o barulho.

Um padrão de avaliação do barulho (*no nível de fenômeno físico - som*) é a determinação do nível de intensidade sonora. Através do levantamento do nível sonoro é possível identificar as fontes primárias de barulho. Apesar do barulho possuir um caráter subjetivo, existe um limite fisiológico máximo, em torno de 120 dB, acima do qual a onda sonora provoca sensação de dor (veja Tabela 4.2, seção 4.9). Devemos ressaltar, porém, que variando a frequência, a intensidade do som é suportada de maneira variável, visto que a sensibilidade do ouvido varia com a frequência do som (reveja a seção 4.8 sobre a sensibilidade do ouvido humano). Em função disto, o limite de sensação de dor depende não só da intensidade do som, mas também de sua frequência. Com frequências baixas (0 a 350 Hz), sons de até 120 dB são suportados relativamente bem, e na faixa de 1.500 a 4.000 Hz, as emissões sonoras não devem ultrapassar 80 dB. Exposições prolongadas acima de 120 dB (na faixa de 1.500 a 4.000 Hz) podem provocar distúrbios nervosos, insônia e até mesmo a perda auditiva. O nível de pressão sonora recomendável depende do tipo de atividade que será realizada (veja Tabela 6.1). Ambientes em que se desenvolverão tarefas que exigem grande concentração mental devem ser mais silenciosos que aqueles em que irão se desenvolver atividades de concentração menor.

Tabela 6.1: Níveis de pressão sonora recomendáveis

TIPO DE ATIVIDADE	NPS (dB)
Quartos para dormir	25-30
Trabalho que exige concentração permanente	25-45
Clínicas de repouso	45-55
Trabalho que envolve baixa concentração	50-60
Salas de estar	45-65

Deve ser notado que como o barulho é em parte devido à preferência opinativa, sons com níveis de intensidades sonoras menores que 80 dB podem ser classificados como barulhos se forem desagradáveis ao ouvinte.

Um fator agravante ao barulho é quando a fonte sonora não pode ser eliminada. Neste caso o indivíduo se sente indefeso em relação ao barulho e o som se torna extremamente irritante. Exemplos seriam o rádio ou os latidos do cachorro do vizinho, gritos de crianças na rua, o barulho do trânsito.

Levantamentos de perturbação para a avaliação do barulho (quanto à *preferência opinativa - indesejável*) consistem em entrevistas com os habitantes da comunidade para determinar os barulhos que eles consideram perturbadores e, se possível, estabelecer os graus de aborrecimento. Uma forma de se estabelecer padrões de barulho seria, por exemplo, verificar a interferência funcional do barulho nas atividades de uma pessoa.

Sabe-se que os barulhos associados a situações desagradáveis perturbam mais que os barulhos sem associações, como por exemplo, a broca de um dentista, o som de uma sirene de ambulância.

Verifica-se também que um barulho inesperado quando um indivíduo realiza uma determinada atividade é mais perturbador que um barulho esperado, como por exemplo, um indivíduo que tenta dormir e é acordado à noite por um caminhão de coleta de lixo.

6.10 Redução e Prevenção da Poluição Sonora

Podemos mencionar quatro medidas principais para a redução do barulho: *i*) eliminação da fonte sonora causadora do barulho, *ii*) isolamento da fonte sonora, *iii*) construção de fontes sonoras que produzam menos barulhos, *iv*) proteção contra os barulhos. É óbvio que a medida *i*) é a mais eficaz, porém, nem sempre é possível eliminar a fonte causadora do barulho! Neste caso devemos adotar uma ou mais de uma das formas alternativas de *ii*) a *iv*).

A isolação do barulho pode ser feita de duas formas: temporal e espacial. Como medidas de caráter temporal podemos citar: desvio do trânsito somente à noite, diminuição de entregas noturnas, proibição do uso à noite de aparelhos na construção civil, reescalonamento das coletas de lixo de madrugada. Quanto às medidas espaciais um determinado aparelho que produz barulho em um ambiente pode ser colocado longe do ouvinte, os aeroportos poderiam ser construídos em locais distantes do centro urbano, e o tráfego aéreo em direções pré-determinadas reduziria a poluição sonora nas localidades próximas ao aeroporto.

A modificação na estrutura de aparelhos barulhentos também pode reduzir o barulho produzido por eles. Correias de transmissão causam menos barulho que engrenagens, e mancais causam menos barulho que rolamentos. Máquinas de rotação geralmente são mais silenciosas que máquinas a pistão. Painéis trepidantes podem ser fixados em estruturas com enchimentos macios de forma a eliminar ou pelo menos aliviar a trepidação. O barulho produzido pelo atrito de veículos em movimento com o ar pode ser reduzido através de uma mudança na aerodinâmica dos veículos e a inclusão de silenciadores nos escapamentos também diminuiria em muito o barulho produzido pelos veículos. Os veículos movidos por energia elétrica são bem mais silenciosos que os tradicionais veículos a combustão. Vias em traçado elevado ou rebaixado também ajudariam em muito o barulho de ruas movimentadas.

Se, apesar de tudo, não for possível modificar o equipamento barulhento, podemos utilizar blindagens acústicas. A blindagem acústica pode ser colocada diretamente na máquina ou como uma proteção entre o aparelho e o ouvinte. Caso isto não possa ser feito, o ouvinte deve ser colocado em um recinto fechado. Um bom exemplo de blindagem é a utilização de vegetações densas como fileiras de árvores ao longo de uma rodovia eliminando boa parte dos barulhos.

Em casas ou edifícios, o fechamento de portas e janelas reduz em até 10 dB a intensidade sonora dos barulhos. A utilização de janelas com vidro grosso ou vidro duplo e paredes mais espessas aumentam significativamente a proteção contra barulhos externos. Em ambientes em que são necessárias divisões de salas, deve-se usar técnicas de construção que não permitam que as paredes entrem em ressonância com o som, contribuindo, por conseguinte para a diminuição de barulhos internos.

Uma técnica que também pode ser usada em algumas circunstâncias para a diminuição de barulho interno é o *mascaramento do som*. Esta técnica é utilizada em fábricas e mercados onde os barulhos operacionais são “disfarçados” com uma música de fundo.

Em ambientes de trabalho deverá ser observado o “Limite de Tolerância Sonora”, que é o nível de pressão sonora máximo relacionado com o tempo de exposição do trabalhador que não causará dano à sua saúde, durante a sua vida laboral. A Tabela 6.2 mostra os limites impostos pelo Ministério do Trabalho (Norma Regulamentadora 15, anexo 1). As leituras deverão ser feitas próximas ao ouvido do trabalhador com um *decibelímetro*, um aparelho que mede o nível de pressão sonora em decibéis. Entende-se por *Barulho Contínuo* ou *Intermitente*, para os fins de aplicação de Limites de Tolerância, o barulho que não seja barulho de impacto (barulho de impacto é aquele que apresenta picos de energia acústica de duração inferior a um segundo, a intervalos superiores a um segundo). As atividades ou operações que exponham os trabalhadores a níveis de barulho, contínuo ou intermitente, superiores a 115 dB, sem proteção adequada, oferecerão risco grave e iminente.

Tabela 6.2: Limites de tolerância para barulho contínuo ou intermitente

NPS (dB)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 h
86	7 h
87	6 h
88	5 h
89	4 h 30 min
90	4 h
91	3 h 30 min
92	3 h
93	2 h 40 min
94	2 h 15 min
95	2 h
96	1 h 45 min
98	1 h 15 min
100	1 h
102	45 min
104	35 min
105	30 min
106	25 min
108	20 min
110	15 min
112	10 min
114	8 min
115	7 min

Em ambientes de trabalho, onde existem excessos de barulho, deve ser elaborado um programa de diminuição do barulho. Para avaliar a exposição individual do trabalhador a níveis elevados de barulho, durante sua jornada de trabalho, deve-se utilizar o *dosímetro* o qual é um aparelho que registra os níveis de intensidade sonora com o transcorrer do tempo. Caso a eliminação dos barulhos seja impossível os empregados devem utilizar durante o trabalho *equipamentos de proteção individual* (EPI) como fones, plugs de inserção etc. e realizar testes regulares de audição (*avaliação audiométrica*). Considera-se EPI, todo dispositivo ou produto, de uso individual utilizado pelo trabalhador, destinado à proteção de riscos suscetíveis de ameaçar a sua segurança e saúde no trabalho. Uma eficiente proteção do indivíduo contra a poluição sonora só será possível adaptando-se o limite superior de intensidade de som à sua exposição diária durante toda sua vida.

6.11 Perda Auditiva

A perda da audição pode ter muitas causas. Entre elas, o sistema mecânico que transmite as pressões do tímpano para os centros nervosos pode estar com defeito. Uma segunda categoria é a perda perceptiva (neural), o que significa que células nervosas não conseguem mais transmitir a sensação de pressão do ouvido interno para o cérebro. A terceira categoria é a perda funcional: um indivíduo não tem deficiência física, mas, por motivos psicológicos, não consegue fazer com que o cérebro perceba os sinais. Em linguagem vulgar, ele está “fora de sintonia”. Destas três categorias, o barulho excessivo afeta somente a segunda categoria, a perda perceptiva ou neural, causando atrofia nas células nervosas.

A perda auditiva acarreta uma deficiência na inteligibilidade da fala. Uma especial atenção deve ser dada às crianças, pois a deficiência auditiva pode acarretar dificuldade ou até mesmo a impossibilidade do aprendizado da linguagem e dificuldades escolares. É bem sabido que a quase totalidade dos indivíduos mudos não possuem problema no aparelho fonador, mas sim no aparelho auditivo.

A perda auditiva pode ocorrer em qualquer região do ouvido, podendo ser dividida em duas classes: *perda condutiva* e *perda neurossensorial*. Quando a perda auditiva ocorre na orelha externa ou média ela é denominada perda condutiva e quando a perda auditiva ocorre na orelha interna ela é denominada perda neurossensorial.

6.11.1 Perda Condutiva

A *perda condutiva* é uma denominação genérica para designar a diminuição da audição devida a uma patologia no ouvido externo ou médio. Pode ser uma infecção na orelha média, uma lesão no meato acústico, na membrana timpânica, nos três ossículos, na tuba auditiva, ou lesões múltiplas em mais de uma destas áreas. Uma lesão em uma destas regiões causa um mau funcionamento do órgão dificultando a transmissão do som para o ouvido interno. Entre as patologias condutivas mais comuns podemos citar: obstrução por cera, disfunção da tuba auditiva, otites médias e otosclerose. As perdas condutivas podem atingir todas as frequências.

A superfície interna do meato acústico contém glândulas que secretam *cera*. A cera é uma secreção de cor amarela ou marrom. Esta secreção mantém a umidade do meato acústico dificultando a entrada de objetos estranhos. A cera tende a migrar para o exterior do meato acústico e quando tomados os devidos cuidados com a higiene ela não irá interferir na audição. O acúmulo excessivo de cera pode bloquear o meato acústico ocasionando perda auditiva leve, zumbido e até mesmo tonturas. Neste caso a pessoa deve procurar um especialista (um otorrino) para a remoção da cera.

Uma das causas mais comuns de problemas no ouvido médio é a disfunção da tuba auditiva (ou trompa de Eustáquio) que tem como função ventilar o ouvido médio e igualar a pressão em ambos os lados da membrana timpânica.

A *otosclerose* é um crescimento ósseo excessivo ao redor da janela oval e do estribo. Progressivamente, o estribo se fixa na janela oval, ocasionando uma perda condutiva. A otosclerose é hereditária e atinge em 80% dos casos as duas orelhas. A correção pode ser feita utilizando aparelho auditivo ou através de cirurgia. A Fig. 6.10 mostra o audiograma de um paciente com otosclerose na orelha esquerda.

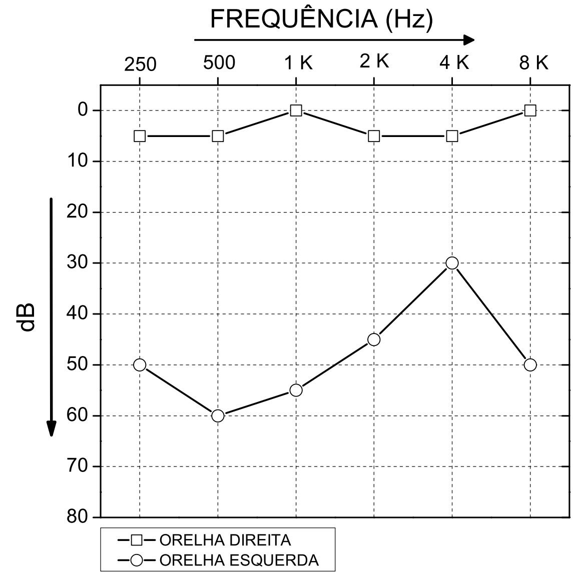


Figura 6.10: Audiograma de um paciente com otosclerose.

6.11.2 Perda Neurossensorial

A perda *neurossensorial* é devida a lesões nas células sensoriais da cóclea ou nas fibras dos nervos auditivos, ou em ambos. A perda neurossensorial pode ser devida a um trauma acústico, presbiacusia, sequela de outras doenças, uso de drogas, ou de origem congênita hereditária ou genética. O principal motivo de perda neurossensorial é a redução da sensibilidade das células receptoras da cóclea. Entre as principais consequências da perda neurossensorial podemos citar: perda do discernimento de frequências, sensação anormal do aumento da intensidade sonora, redução da faixa dinâmica[3]. A redução da faixa dinâmica e do discernimento de frequências afetam diretamente na percepção da fala.

Um tipo de perda que ocorre na orelha interna devido principalmente a exposições prolongadas a barulhos intensos ou por exposições rápidas e abruptas é a *rampa em ski*. Este tipo de perda recebe este nome porque o seu audiograma tem o formato que lembra uma rampa de ski como mostrado na Figura 6.11. Neste tipo de perda auditiva existe uma grande perda em frequências mais altas, enquanto que em frequências mais baixas praticamente não há perda apreciável.

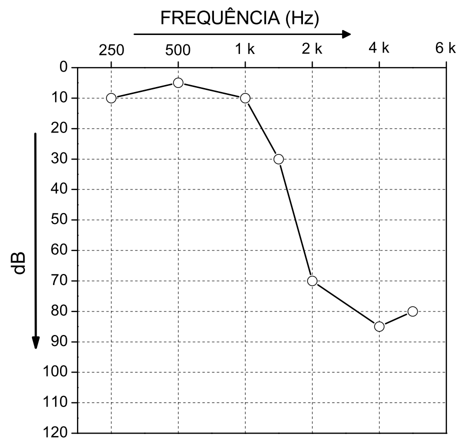


Figura 6.11: Rampa em ski.

A sensibilidade auditiva sofre uma diminuição gradativa após os 18 anos, tornando-se bem perceptível ao redor dos 60 anos. O tipo de perda auditiva mais comum é a *presbiacusia* que é a perda auditiva induzida pela idade causada pelo desgaste natural das células ciliadas. A presbiacusia é mais comum nos homens que nas mulheres

[3]faixa dinâmica é a região entre o limiar auditivo e o limiar de desconforto.

dependendo muito em particular do indivíduo: alguns apresentam os sintomas com 50 anos, outros com 60 anos e existem ainda aqueles que nunca chegam a ter este tipo de problema auditivo. Na Figura 6.12 é mostrada separadamente para homens e mulheres a perda de sensibilidade auditiva com a idade para grupos de pacientes de três idades: 40, 60 e 80 anos. Note pelos audiogramas da Fig. 6.12 que em frequências altas a presbiacusia assume uma configuração de rampa nos homens e configurações mais planas nas mulheres.

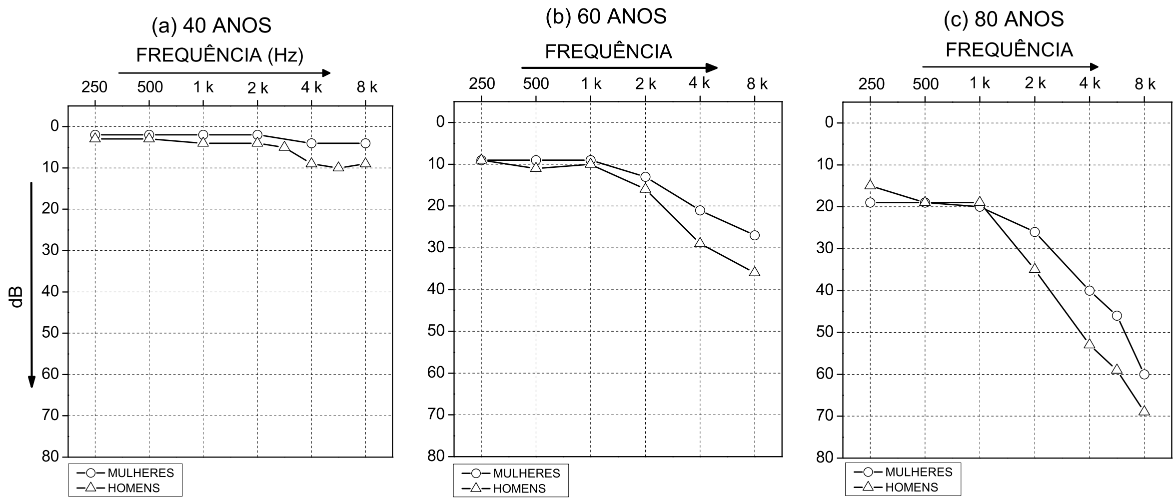


Figura 6.12: Audiogramas para grupos de pessoas de três idades: (a) 40 anos, (b) 60 anos e (c) 80 anos.

Ainda quanto à perda neurossensorial devemos destacar a *Síndrome de Ménière*, uma doença de origem desconhecida e que afeta a fisiologia dos líquidos da orelha interna, mais especificamente a endolinfa. A Síndrome de Ménière se caracteriza por crises periódicas que se iniciam com o aumento da pressão intra-auricular seguidas de zumbido e vertigem.

6.12 Aparelhos Auditivos

Na maioria dos casos a perda auditiva não é reversível. A utilização de aparelhos auditivos pode ser, então, uma solução. Os *aparelhos auditivos* são dispositivos que amplificam os sons na faixa de frequência em que houve a perda auditiva. Os aparelhos auditivos são mais utilizados em perdas neurossensoriais. No entanto ele é também utilizado em perdas condutivas quando uma cirurgia corretiva não é recomendável. Os aparelhos auditivos são compostos basicamente dos seguintes componentes: bateria, bobina de indução, microfone, amplificador e receptor. Os modelos de aparelhos auditivos mais comuns disponíveis são:

Aparelho de bolso: com o formato e o tamanho aproximado de um maço de cigarros pode ser usado no bolso de uma camisa com os fones conectando o aparelho à orelha do indivíduo. Atualmente este tipo de aparelho só é usado por pacientes com perda auditiva extremamente elevada.

BAHA: BAHA significa aparelho auditivo embutido no osso (acrossemia do inglês: *Bone Anchored Hearing Aids*). Este tipo de aparelho é utilizado no caso de perdas auditivas severas, sendo inserido por cirurgia na mastóide do paciente. Constitui-se de um anel de titânio (material facilmente assimilado pelo organismo) com um pequeno vibrador, conduzindo sons para a orelha interna através do osso.

Aparelho retroauricular: este tipo de aparelho é o mais utilizado atualmente, sendo encaixado atrás do pavilhão auricular do usuário. O microfone se situa no lado de trás ou no topo do aparelho, sendo o som direcionado ao meato acústico por um tubo e um molde que se encaixa anatomicamente na orelha do usuário.

Aparelho intra-canal: neste aparelho todos os componentes necessários estão em um molde que é adaptável à concha do pavilhão auricular.

Aparelho micro canal: este tipo de aparelho é colocado de um a dois milímetros dentro do meato acústico do paciente, existindo um fio conectado ao aparelho para a sua retirada. A vantagem do aparelho micro canal e do intra-canal é que o som é captado na posição natural do pavilhão auricular.

A impressão do meato acústico deve ser tomada para a fabricação da concha dos aparelhos micro canais e intra-canais e do molde dos aparelhos retroauriculares. Para se tirar a impressão do meato acústico o médico injeta um tipo de silicone no ouvido do paciente.

QUESTIONÁRIO

1) Estabelecer a relação entre as grandezas físicas: frequência com altura e amplitude com intensidade do som.

2) Podemos distinguir a voz de duas pessoas pela frequência, pela intensidade ou pelo timbre? Explique.

3) As mulheres, em geral, falam mais alto que os homens. Explique.

4) Reconhecemos a voz das pessoas pelo timbre. Explique.

5) Uma flauta e uma clarineta estão emitindo sons de mesma altura, sendo a amplitude do som da clarineta maior do que a amplitude do som da flauta. Considere uma pessoa situada a uma mesma distância dos dois instrumentos. (a) Qual dos dois sons será percebido, pela pessoa, com maior intensidade? (b) A frequência do som emitido pela flauta é maior, menor ou igual à frequência do som emitido pela clarineta? (c) Os dois instrumentos estão emitindo a mesma nota musical ou notas diferentes? (d) As formas das ondas sonoras emitidas pelos dois instrumentos são iguais ou diferentes? (e) A pessoa perceberá sons de mesmo timbre ou de timbres diferentes?

6) O que é tom, e qual a diferença entre ruído e barulho?

7) O que é uma oscilação aperiódica?

8) O que é intervalo de oitava?

9) Como é produzida a voz?

10) Qual é a faixa de frequência da voz humana? Qual é a faixa de frequência de maior concentração da voz humana?

11) Por que em geral os homens têm voz mais grave que as mulheres?

12) Em que favorece a forma curva do meato acústico?

13) O que é a cera e para que serve?

14) Qual a função dos três ossículos da orelha média?

15) Qual a função da cóclea?

16) O que é um audiograma?

17) Defina loudness e pitch.

18) O que é binauralidade? Quais são os fatores necessários para a localização de um som?

19) Cite efeitos nocivos que o barulho pode trazer ao homem.

20) Cite medidas preventivas que podem ser tomadas quanto ao barulho.

21) Quais os dois tipos de perda auditiva? Explique cada uma delas.

PROBLEMAS

1) Uma nota musical cuja frequência é f_4 =125 Hz está duas oitavas acima de uma nota f_2. Qual é o valor de f_2?

2) Sabe-se que a frequência da nota Dó$_3$ vale 128 Hz. Qual é o valor da frequência Dó$_1$?

3) Sabe-se que a frequência da nota Dó$_1$ vale 32 Hz. Quais são os valores das frequências Dó$_5$ e Dó$_7$?

4) Um audiograma é a representação gráfica do limiar auditivo em função da frequência (entre 125 Hz e 8.000 Hz). Se começarmos um audiograma em 125 Hz quais serão as próximas frequências em intervalos de oitavas?

5) A figura abaixo mostra o audiograma de um paciente com perda neurossensorial. Qual é a perda auditiva, para cada uma das orelhas, para as frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz, 4.000 Hz e 8.000 Hz?

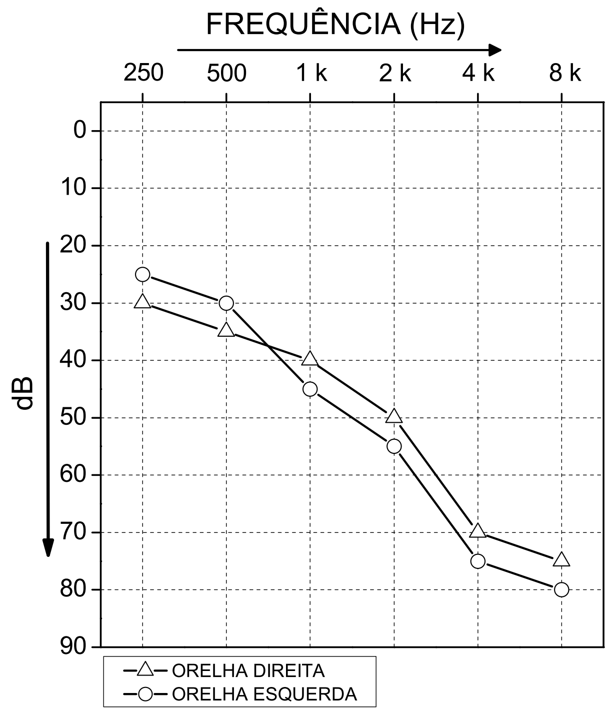


Figura 6.13: Audiograma de um paciente com perda neurossensorial.

Bibliografia

- J. W. Strutt, B. Rayleigh, *The theory of sound*, Vol. 1, Dover Publications (1945).
- P. Dowling, J. E. F. Williams, *Sound and sources of sound*, John Wiley & Sons.
- J. S. Rigden, *Physics and the sound of music*, John Wiley & Sons.
- I. C. P. Russo, *Acústica e psicoacústica aplicadas à fonoaudiologia*, ed. Lovise, São Paulo (1999).
- L. A. Nepomuceno, *Elementos de acústica física e psicoacústica*, ed. Edgard Blücher (1994).
- J. G. Roederer, *Introdução à física e psicofísica da música*, ed. USP (1998).
- E. Okuno, I. L. Caldas, C. Chow, *Física para ciências biológicas e biomédicas*, ed. Harbra (1982).
- M. Alonso, E. J. Finn, *Física - um curso universitário*, Vol. 2, ed. Edgard Blücher (1972).
- M. Ference Jr., H. B. Lemon, R. J. Stephenson, *Curso de física*, ed. Edgard Blücher.
- D. Halliday, R. Resnick, *Física*, Vol. 2, ed. Livros Técnicos e Científicos (1989).
- Meima G. S. Pires, Paloma H. Rodrigues, Carmen C. C. Sampaio, Clóves G. Rodrigues, *Measure of the Sound Pressure Level in an Urban Center*, Jornal Brasileiro de Fonoaudiologia, Vol. 3, pp. 263-266 (2002).

Respostas

Capítulo 1

Problema 1
a)$1,23 \times 10^{10}$ b) $7,21 \times 10^{-2}$ c) $1,2 \times 10$ d) $1,04 \times 10^{-12}$

Problema 2
a) 3×10^4g   b) $1,3 \times 10^{-4}$kg   c) $7,78 \times 10^{-2}$kg   d) 5×10^3m $= 5 \times 10^5$cm
e) 2×10^{-3}km   f) $2,7 \times 10^0$m

Problema 3
a) 34000 cm/s   b) 0,34 km/s

Capítulo 2

Problema 1
a) $T = 28$ dias $= 2419200$ s   b) $f \simeq 4,13 \times 10^{-7}$ Hz

Problema 2
a) $T = 0{,}5$ s   b) $f = 2$ Hz

Problema 3
a) $T = 2$ s   b) $f = 0{,}5$ Hz

Problema 4
$T = 0{,}5$ s

Problema 5
$f = 4$ Hz

Problema 6
a) $T \simeq 2,2$s   b) $f \simeq 0,45$Hz

Problema 7:
a) $T \simeq 2,8\,$s   b) $f \simeq 0,36\,$Hz

Capítulo 3

Problema 1
a) $T = 0,04\,\mathrm{s}$ b) $f = 25\,\mathrm{Hz}$ c) $v = 12,5\,\mathrm{m/s}$

Problema 2
$\lambda = 0,345\,\mathrm{m}$

Problema 3
$v = 200\,\mathrm{m/s}$

Problema 4
$f = 1750\,\mathrm{Hz}$

Problema 5
a) $f = 20\,\mathrm{Hz}$ b) $t = 10\,\mathrm{s}$ c) $\lambda = 0,1\,\mathrm{m}$
d) A velocidade não se altera e o comprimento de onda passa a ser: $\lambda \simeq 0,07\mathrm{m}$

Problema 6
$y = 0,02\mathrm{sen}(\pi x + 400\pi t)$ (SI)

Problema 7
$y = 0,05\mathrm{sen}(4\pi x - 1600\pi t)$ (SI)

Problema 8
a) $f = 10\,\mathrm{Hz}$ b) $v = 5\,\mathrm{m/s}$

Problema 9
a) $A =$ 0,2 m b) $k =$ 20 rad/m c) $\omega = 600\,rad/s$ d) $v = 30\,\mathrm{m/s}$ e) $\lambda \simeq 0,314\,m$
f) $T \simeq 0,01\,\mathrm{s}$ g) $f \simeq 95,5\,\mathrm{Hz}$ h) y = 0

Problema 10
a) $f = 1\,\mathrm{Hz}$ b) $\Delta t = 1\,\mathrm{s}$ c) 1 vibração/s d) $f = 1\,\mathrm{Hz}$

Problema 11
$\lambda = 0,2\,m$

Problema 12
$\Delta t = 6\,\mathrm{s}$

Problema 13
a) $\mu = 0,2\,\mathrm{kg/m}$ b) $v = 22,4\,\mathrm{m/s}$

Problema 14
a) veja Fig. 3.14(b) b) $\lambda = 0,2\,\mathrm{m}$ c) $f =$ 50 Hz

Problema 15
a) $\lambda = 0,1\,\mathrm{m}$
b) Como a tração (tensão) na corda mudou a velocidade da onda na corda também irá mudar, pois $v = \sqrt{\tau/\mu}$

Problema 16
a) $v \simeq 346,4\mathrm{m/s}$ b) $\lambda = 20\,\mathrm{m}$ c) $f \simeq 17,3\,\mathrm{Hz}$

Problema 17
a) $v \simeq 223,6\,\mathrm{m/s}$ b) $\lambda = 0,25\,\mathrm{m}$ c) $f \simeq 894,4\,\mathrm{Hz}$

Problema 18
$f = 500$ Hz

Capítulo 4

Problema 1
de $0,017\,\mathrm{m}$ até $17\,\mathrm{m}$

Problema 2
$17,25\,\mathrm{m}$

Problema 3
$0,01715\,\mathrm{m}$

Problema 4
a) $337\,\mathrm{m/s}$ b) $343\,\mathrm{m/s}$

Problema 5
25°C

Problema 6
$v \simeq 4320,5\,\mathrm{m/s}$

Problema 7
$f = 343\,\mathrm{Hz}$ (onda audível)

Problema 8
0,085 m a 1,13 m

Problema 9
a) $S = 7,6 \times 10^{-6}\cos(100\pi x - 34000\pi t)$ (SI)
b) $\Delta P = 20\mathrm{sen}(100\pi x - 34000\pi t)$ (SI)

Problema 10
a) 120 dB b) 100 dB c) 80 dB d) 60 dB e) 0 dB

Problema 11
a) 120 dB b) 80 dB c) 40 dB d) 0 dB

Problema 12
$\Delta E = 0,0003\,\mathrm{J}$

Problema 13
a) $I = 10^{-6}\mathrm{W/m^2}$ b) $NIS = 60\,\mathrm{dB}$

Problema 14
$\Delta NIS \simeq 3\,\mathrm{dB}$

Problema 15
$I_2/I_1 = 1,58$

Problema 16
$I = 1\,\mathrm{W/m^2}$

Capítulo 5

Problema 1
$f_{bat} = 2$ Hz

Problema 2
$f_{bat} = 1$ Hz

Problema 3
ouvimos um som cuja freqüência é a média das duas freqüências combinadas, ou seja, $f = 99{,}5$ Hz

Problema 4
$f = 85$ Hz

Problema 5
$f = 42{,}5$ Hz

Problema 6
$f = 4287{,}5$ Hz

Capítulo 6

Problema 1
$f_2 = 31{,}25$ Hz

Problema 2
$Dó_1$= 32 Hz

Problema 3
$Dó_5$= 512 Hz e $Dó_7$= 2048 Hz

Problema 4
125 Hz; 250 Hz; 500 Hz; 1.000 Hz; 2.000 Hz; 4.000 Hz; 8.000 Hz.

Problema 5

FREQUÊNCIA (Hz)	PERDA AUDITIVA (dB) (orelha direita)	PERDA AUDITIVA (dB) (orelha esquerda)
250	30	25
500	35	30
1 k	40	45
2 k	50	55
4 k	70	75
8 k	75	80

Apêndice

Unidades Mais Utilizadas

Grandeza	Nome da Unidade	Símbolo
comprimento	metro	m
massa	quilograma	kg
tempo	segundo	s
temperatura	grau celsius	^oC
força	newton	N
velocidade	metro por segundo	m/s
pressão	pascal	Pa
potência	watt	W
intensidade de energia sonora	watt por metro quadrado	W/m^2
energia	joule	J
frequência	hertz	Hz
nível de pressão sonora (NPS)	decibel	dB
nível de intensidade sonora (NIS)	decibel	dB

Fatores de Conversão

- De centímetro para metro ($\div$ 100)
- De centímetro^2 para metro^2 ($\div$ 10000)
- De metro para centímetro ($\times$100)
- De metro^2 para centímetro^2 ($\times$10000)

Valores Úteis

- gravidade: $g \simeq 9,78\,\mathrm{m/s^2}$
- $\pi \simeq 3,14$
- velocidade do som no ar = 343 m/s (a pressão normal e 20 °C)
- densidade do ar = $1,21\,\mathrm{kg/m^3}$ (a pressão normal e 20 °C)
- $\Delta p_0 = 20 \times 10^{-6}\mathrm{N/m^2}$
- $I_0 = 10^{-12}\mathrm{W/m^2}$
- $\log 1 = 0$
- $\log 2 \simeq 0.301$
- $\log 5 \simeq 0.699$
- $\log 10 = 1$
- $\log 100 = 2$
- $\log 1000 = 3$

Propriedades de Logaritmos

$$\log(a.b) = \log(a) + \log(b)$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b)$$

$$\log(a) = x \Rightarrow a = 10^x$$

$$\log(a^x) = x\log(a)$$

Principais Fórmulas

Capítulo 1 - Medidas Físicas e Notação Científica

- Velocidade escalar média: $v = \frac{d}{\Delta t}$
- Aceleração: $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$
- Força: $\vec{F} = m\vec{a}$
- Trabalho: $\mathcal{T} = Fd\cos\alpha$
- Potência: $P = \frac{\mathcal{T}}{\Delta t}$
- Pressão: $p = \frac{F}{A}$

Capítulo 2 - Movimentos Periódicos

- Frequência: $f = \frac{N}{\Delta t}$, $f = \frac{1}{T}$
- Período: $T = \frac{1}{f}$, $T = \frac{\Delta t}{N}$
- Período do pêndulo simples: $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$
- Período do Oscilador Harmônico Linear Simples: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\kappa}}$

Capítulo 3 - Movimento Ondulatório

- Equação de uma onda progressiva: $y(x,t) = A\mathrm{sen}(kx - \omega t)$
- Número de onda angular: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
- Frequência angular: $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega = 2\pi f$
- Velocidade com que a onda se propaga: $v = \frac{\omega}{k}$, $v = \frac{\lambda}{T}$, $v = \lambda f$
- Velocidade com que a onda se propaga em uma corda: $v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}}$
- Densidade linear da corda: $\mu = \frac{m}{L}$

- Modos de ressonância na corda: $\lambda = \frac{2L}{n}$, $\quad n = 1, 2, 3, \ldots$

$$f = n\frac{v}{2L} \ , \quad n = 1, 2, 3 \ldots$$

$$f = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \ , \quad n = 1, 2, 3 \ldots$$

Capítulo 4 - Som

- Deslocamento longitudinal do elemento oscilante: $S = S_m \cos(kx - \omega t)$
- Número de onda angular: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
- Frequência angular: $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$
- Velocidade de onda da onda: $v = \omega/k$.
- Variação de pressão numa posição x: $\Delta p = \Delta p_m \text{sen}(kx - \omega t)$
- Amplitude da pressão: $\Delta p_m = v\rho\omega S_m$
- Velocidade do som no ar: $v = 331 + 0,6\,\theta$ (m/s)
- Velocidade das ondas mecânicas longitudinais em um meio: $v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$
- Intensidade de energia sonora: $I = \frac{P}{A}$, $I = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$, $I = \frac{1}{2}\rho v(\omega S_m)^2$
- Potência: $P = \Delta E/\Delta t$
- Intensidade de energia de uma fonte pontual: $I = \frac{P}{4\pi r^2}$
- Área da superfície esférica: $\mathcal{A} = 4\pi r^2$
- Nível de intensidade sonora: $NIS = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$, com $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2
- Nível de pressão sonora: $NPS = 20 \log\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right)$, com $\Delta p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa

Capítulo 5 - Fenômenos Sonoros

- Impedância: $Z = \frac{F}{v}$
- Impedância acústica: $Z = p/u$
- Impedância característica: $Z = \rho \cdot v$
- Grau de difração: $r = \frac{\lambda}{d}$
- Frequência de batimento: $f_b = f_1 - f_2$
- Padrões de ressonância em tubo de ar:
  a) aberto: $\lambda = \frac{2L}{n}$, $n = 1, 2, 3, \ldots$

  $$f = n\frac{v}{2L},\ n = 1, 2, 3 \ldots$$

  b) fechado: $L = n\frac{\lambda}{4}, \quad n = 1, 3, 5, 7, \ldots$

  $$\lambda = \frac{4L}{n}\ , \quad n = 1, 3, 5, 7, \ldots$$

  $$f = n\frac{v}{4L}\ ,\ n = 1, 3, 5, 7 \ldots$$

Capítulo 6 - Produção e Sensação do Som

- Intervalo: $i = \frac{f_1}{f_0}$
- $f_n = 2^n f_0$

Símbolos Empregados e Suas Unidades no SI

α ângulo (rad)

A amplitude (m)

$\mathcal{A}$ área (m^2)

B módulo de elasticidade volumétrico (nos fluidos) e módulo de Young (nos sólidos)

d distância (m)

E energia (J)

ρ densidade volumétrica (kg/m^3)

f frequência (Hz)

f_b frequência de batimento (Hz)

F força (N)

ϕ ângulo de fase (rad)

g gravidade (m/s^2)

I intensidade de energia (W/m^2)

k número de onda angular (rad/s)

κ constante elástica da mola (N/m)

λ comprimento de onda (m)

μ densidade linear (kg/m)

m massa (kg)

N número de oscilações

NIS nível de intensidade sonora (dB)

NPS nível de pressão sonora (dB)

ω frequência angular (rad/s)

Δp variação de pressão (Pa)

Δp_m variação máxima da pressão (amplitude de pressão) (Pa)

p pressão (Pa)

P potência (W)

S_m amplitude de deslocamento (m)

t tempo (s)

T período (s)

τ tensão ou tração (N)

$\mathcal{T}$ trabalho (J)

θ temperatura (K), (neste livro texto usamos na prática apenas °C)

v velocidade (m/s)

x posição (m)

Índice Remissivo

Absorção, 68
Aceleração, 10
Acuidade auditiva, 93
Agudo, 81
Altura do som, 81
Amortecimento, 20
Amplitude, 19, 26, 49
Ângulo de fase, 29
Antinó, 39
Antinodo, 39
Aparelhos Auditivos, 99
Audição, 88
Audição normal, 91
Audiograma, 90

Barra, 84
Barulho, 83, 93
Barulho contínuo, 96
Barulho de impacto, 96
Barulho intermitente, 96
Batimento, 70, 71
bel, 58
Bigorna, 88
Binauralidade, 93

Canal auditivo, 88
Casamento de impedância, 67
Células ciliadas, 89
Cera, 88
Cílios, 89
Cóclea, 89
Coeficiente de absorção, 68
Compressão, 48, 49
Comprimento de onda, 28, 48
Constante de fase, 36
Corda Vibrante, 84
Corda vocal, 86
Córtex auditivo, 89
Cristas, 26
Curva isofônica, 92

Decibel, 58, 60
Decibelímetro, 96
Densidade linear, 34
Densidade volumétrica, 49
Diapasão, 85
Diferença de fase, 36
Difração, 39, 69
Doppler, 73
Dosímetro, 96

Eco, 65
Efeito Doppler, 73
Elasticidade volumétrica, 52
Endolinfa, 89
Energia, 11
Equação de uma onda, 29
Equipamentos de proteção individual, 96
Escala vestibular, 89
Estapédio, 88
Estribo, 88

Faixa dinâmica, 98
Fala, 86
Fase da onda, 29
Fon, 92
Fonação, 86
Fone, 92
Fonte sonora, 47
Fonte sonora pontual, 55
Força, 11
Força restauradora, 20
Frequência, 17, 26, 28
Frequência angular, 32, 49
Frequência audível, 47
Frequência de ressonância, 21

Frequência fundamental, 41, 76
Frequência natural, 21

Grandeza física, 10
Grave, 81

Harmônico, 41, 75, 76
hertz, 18

Impedância, 67, 88
Impedância característica, 67
Infra-som, 50
Intensidade, 81
Intensidade de energia sonora, 54
Interferência, 35, 36
Interferência construtiva, 37
Interferência destrutiva, 37
Intervalo, 85
Intervalo audível, 47, 48
Intervalo de oitava, 85

Janela oval, 88
Janela redonda, 89
joule, 11

Kelvin, 10

Labirinto auditivo, 89
Limiar auditivo, 90, 91
Limiar do desconforto, 91
Limite de tolerância sonora, 95
Linhas nodais, 77
Loudness, 92

Martelo, 88
Meato acústico externo, 88
Membrana, 77, 84
Membrana timpânica, 88
Modo de ressonância, 41
Módulo de elasticidade volumétrico, 52
Módulo de Young, 52
Movimento harmônico, 17
Movimento oscilatório, 17
Movimento periódico, 17
Movimento vibratório, 17

newton, 11
Nível de intensidade sonora, 58
Nível de pressão sonora, 60
Nodos, 39
Nós, 39
Nota musical, 85
Notação científica, 14
Notação exponencial, 14
Número de onda angular, 31, 49
Número harmônico, 75

Oitava, 85
Onda, 25
Onda bidimensional, 27
Onda eletromagnética, 27
Onda estacionária, 39
Onda longitudinal, 27
Onda material, 27
Onda mecânica, 26
Onda progressiva, 33
Onda sonora, 47
Onda transversal, 27
Onda tridimensional, 27
Onda unidimensional, 27
Ondas mista, 28
Orelha externa, 88
Orelha interna, 89
Orelha média, 88
Oscilação amortecida, 20
Oscilação forçada, 21
Oscilação livre, 21
Oscilação natural, 21
Oscilação própria, 21
Oscilador harmônico, 19
Osso temporal, 89
Ossos do ouvido, 88
Otosclerose, 97
Ouvido, 88

Padrões de ressonância, 41
pascal, 12, 49
Pavilhão auricular, 88
Pêndulo simples, 19
Período, 17, 18, 32
Perda auditiva, 94, 97
Perda condutiva, 97
Perda funcional, 97
Perda neural, 97

Perda Neurossensorial, 98
Perda perceptiva, 97
Perilinfa, 89
Perturbação, 25
Pina, 88
Pitch, 92
Poluição sonora, 93
Potência, 12, 54
Prefixos, 14
Prega vocal, 86
Presbiacusia, 98
Pressão, 12, 49
Princípio de superposição, 35
Produção da fala, 86
Pulso, 25

Rampa em ski, 98
Rarefação, 48, 49
Reflexão, 38, 65
Reflexão não rígida, 38
Reflexão rígida, 38
Refração, 37, 38, 66
Ressonância, 21, 40, 74, 76
Ressonador nasal, 87
Reverberação, 66
Ruído, 83

Sensibilidade auditiva, 57, 90, 98
Sensibilidade do ouvido, 90
Síndrome de Ménière, 99
Sistema Internacional de Unidades, 9
Som, 47
Som agudo, 81
Som alto, 81
Som baixo, 81
Som grave, 81
Som Musical, 84
Sone, 93
Superposição, 35

Tensão, 34
Tensor do tímpano, 88
Timbre, 82
Tom, 83
Três ossículos, 88
Tração, 34
Trabalho, 11
Trompa de Eustáquio, 88
Tuba auditiva, 88
Tubo sonoro, 84

Ultra-som, 50
Uníssono, 85
Unidade, 9, 10

Vales, 26
Velocidade, 10
Velocidade de onda, 33, 49
Velocidade do som, 51, 52
Ventre, 39
Vibração, 17
Voz, 86
Voz humana, 86

watt, 12, 54

Young, módulo de, 52