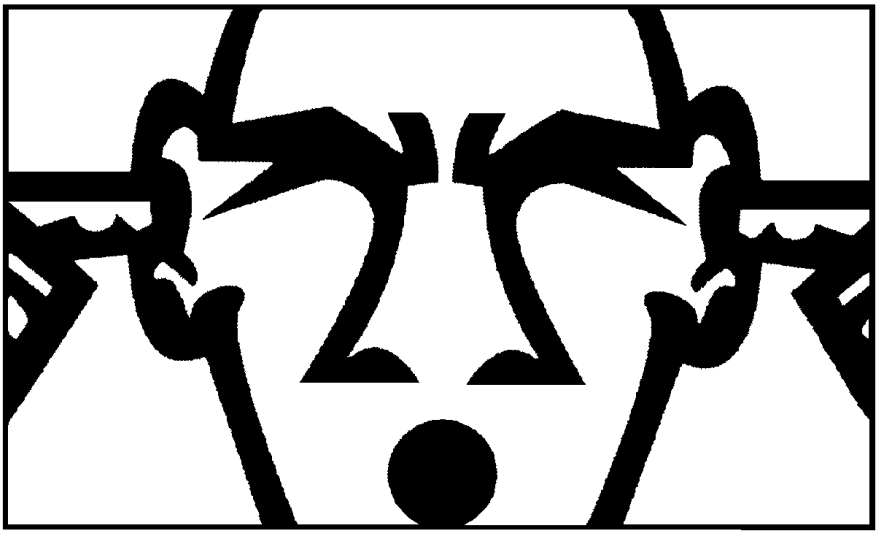
Acústica e Ruídos



Prof. Dr. João Candido Fernandes

2002

Apostila desenvolvida para as disciplinas:

- **Acústica e Ruídos (Graduação em Eng. Mec)**
- **Ruídos (Especializ. Engenharia Segurança do Trabalho)**
- **Acústica e Ruídos (Curso de Aperfeiçoamento)**
- **Ruídos Urbanos (Curso de Extensão)**

Faculdade de Engenharia – Unesp – Bauru

Depto de Engenharia Mecânica

Laboratório de Acústica e Vibrações - *LAV*

João Candido Fernandes

Prof. Livre-docente do Departamento de Engenharia Mecânica

Prof. Doutor em Vibrações e Acústica

Prof. Mestre em Vibrações e Acústica

Coordenador do Laboratório de Acústica e Vibrações [LAV]

Setembro - 2002

UNESP - Câmpus de Bauru - Faculdade de Engenharia
Depto de Engª Mecânica - Lab. de Acústica e Vibrações: http://email.feb.unesp.br/~jcandido
Av. Luiz E. Coube S/Nº - Bauru - CEP 17.033-360 - Fax (14) 221.6101 - Bauru – SP
Prof. João C. Fernandes: Depto Eng. Mec. – Fone: 221.6119 ou 221.6120
E-mail: jcandido@feb.unesp.br ou j-candido@uol.com.br

Sumário

1. – Movimento Vibratório e Ondulatório
1. – Conceitos sobre Movimento Vibratório, 1
1.1 – Definições, 1
1.2 – Elementos do MHS, 1
2. – Movimento ondulatório, 4
2.1 – Formas de propagação, 4
2.2 – Comprimento de Onda, 8
2.3 – Propriedades da propagação das ondas, 9

2. - Propriedades Físicas do Som, 12
1. – Introdução, 12
2. – Freqüência, 13
3. – Intensidade, 15
4. – Timbre, 20
5. – Análise Espectral, 21
5.1 – Espectro, 21
5.2 – Densidade Espectral, 22
6. – Ruído, 22

3. - Princípios do Som, 26
1. – Princípio de Huygens, 26
2. – Propagação Livre, 26
3. – Propagação com obstáculos, 29
3.1. – Reflexão, 30
3.2. – Absorção, 30
3.3. – Transmissão, 32
4. – Difração, 32
5. – Reverberação e Tempo de Reverberação, 33
6. – Eco, 134
7. – Refração , 34
8. – Ressonância, 34
9. – Mascaramento , 34
10 – Ondas Estacionárias, 34
11 – Eco Pulsatório, 35
12 – Efeito Dopler-Fizeau, 35

4. - O ouvido Humano e a Audição, 36
1. – Conceitos Básicos sobre a anatomia do ouvido humano, 36
2. – Fisiologia da Audição, 39
2.1 – Audição via aérea, 39
2.2 – Audição via óssea, 40

5. – Psicoacústica, 41
1. – Lei de Weber-Flechner, 41
2. – Audibilidade, 42
3. – Audição Binaural, 44
3.1 – Localização da fonte sonora, 44
3.2 – Ângulo de máxima intensidade, 46
3.3 – Efeitos Estéreo e Surround, 46
3.4 – Efeitos no plano vertical, 47.

6. – O Ruído Ambiental, 48
1. – Avaliação do Ruído Ambiental, 48
2. – Avaliação da Perturbação da Comunidade, 52
Aplicação da Norma NBR 10.151, 53

7. – A Acústica no Interior de Ambientes, 54
1. – Isolamento contra o Ruído, 54
2. – Controle dos sons no interior do ambiente, 58
3. – Cálculo do Tempo de Reverberação de Ambientes, 59

8. - O Ruído e sua Medição, 61
1. – Introdução, 61
2. – O Medidor de Pressão Sonora (decibelímetro), 62
3. – Precauções durante as medições, 65
4. – Alguns Métodos de Medição do Ruído, 66
4.1. – Percepção Subjetiva do Ruído, 66
4.2. – Medição de Ruídos Contínuos, 66
4.3. – Medição de Ruídos Flutuantes, 66
4.4. – Medição de Ruídos de Impacto, 68
4.5. – Análise de Freqüência, 68
5. – Os Métodos Usados no Brasil, 69

9. - Avaliação dos Efeitos dos Ruído sobre o Homem, 70
1. – Efeitos sobre a Saúde e Bem Estar das Pessoas, 70
2. – Efeitos sobre o Aparelho auditivo, 74
7.2.1. – Mecanismo da Perda Auditiva, 74
7.2.2. – Fatores que Influem na Perda Auditiva, 77
3. – Níveis de Ruído Confortáveis e Perigosos, 77
4. – Exposições Permissíveis ao Ruído, 77
5. – Critérios usados no Brasil, 79.

10. - Controle do Ruído, 81
1. - Controle do Ruído na Fonte, 82
2. - Controle do Ruído no Meio de Propagação, 83
2.1. - Redução da Propagação do Som pelo ar, 83
2.1.1. - Isolamento da Fonte, 84

2.1.2. - Mudança das Condições Acústicas do Local, 84
2.1.3. - Isolamento do Receptor, 84
2.2. - Redução da Propagação do Som pela Estrutura, 85
3. - Controle do Ruído no Receptor, 85
3.1. - Os Protetores Individuais, 85
3.2. - Comparação entre os Protetores Auditivos, 86

11. - Programa de Redução do Ruído Ambiental e Proteção Auditiva, 88
9.1. - Guia de detecção do problema, 88
9.2. - Programa de Redução do Ruído, 91
9.3. - Controle do Ruído, 94

Bibliografia, 97

Capítulo 1

Movimento Vibratório e Ondulatório

1. Conceitos básicos sobre Movimento Vibratório

1.1 – Definições

🡸 ***Movimento Vibratório ou Oscilatório:*** Movimento repetitivo genérico, correspondente a qualquer trepidação ou tremor de um corpo (que se aproxime de um movimento de vai-e-vem). Por exemplo, o movimento das marés, da água do mar na praia, a trepidação de um terremoto, ou de um impacto.

🡸 ***Movimento Periódico :*** Forma particular do Movimento Vibratório, em que as oscilações se realizam em tempos (períodos) iguais. São os mais comuns, por exemplo, o movimento de um pêndulo, de um navio, a vibração de um motor elétrico ou de combustão interna, o movimento das cordas de um violão ou piano, o movimento da membrana de um bumbo, e o movimento de vibração do ar na presença de um som.

🡸 ***Movimento Harmônico Simples (MHS) :*** É a forma mais particular do Movimento Vibratório. Corresponde ao movimento periódico retilíneo, equivalente à projeção de um movimento circular uniforme num plano, cuja amplitude em função do tempo é representada por uma senóide. São poucos os MHS encontrados na natureza, mas corresponde aos tons puros, como o diapasão e geradores de sinal.

1.2. Elementos de um MHS

A Figura 1.1 mostra a obtenção de MHS a partir do Movimento Circular Uniforme (MCU).

ω = velocidade angular [rad/s]

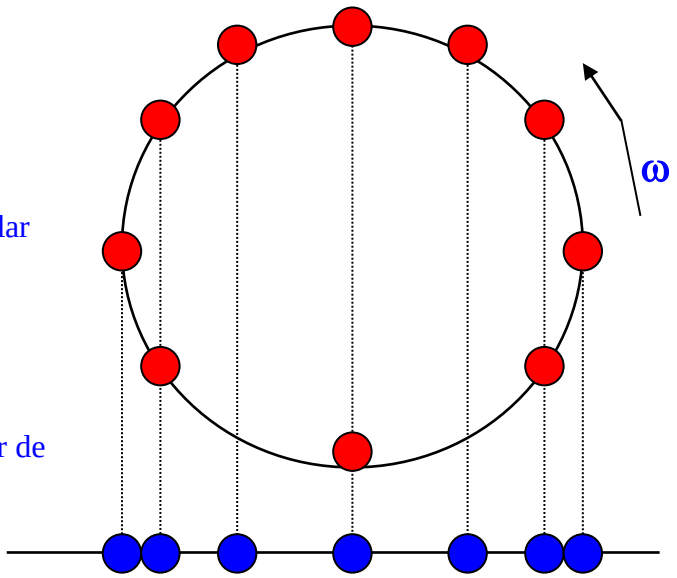


Fig. 1 – MHS a partir de um MCU

O Sistema composto por uma mola e uma massa da Figura 1.2 apresenta um MHS.

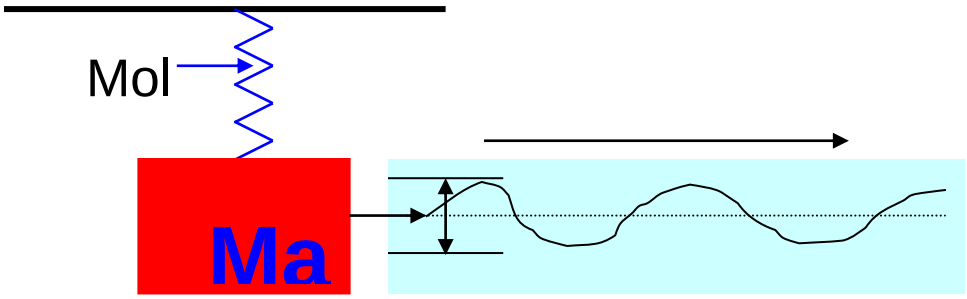


Figura 1.2 : Movimento Harmônico Simples

A representação gráfica do MHS em função do tempo é mostrada na Figura 1.3.

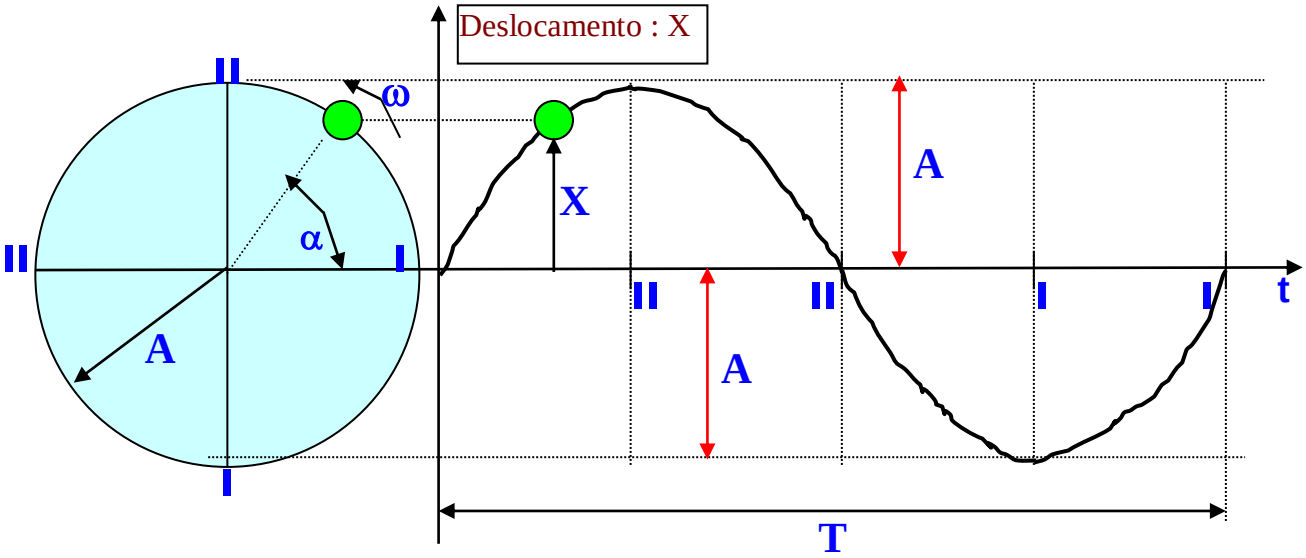


Figura 1.3 : Deslocamento de um MHS em função do tempo.

Considerando-se a velocidade angular ω e o raio da circunferência A, podemos escrever:

$$\alpha = \omega \cdot t$$

o deslocamento 'X' será:

$$X = A \cdot \text{sen}\, \alpha \rightarrow X = A \cdot \text{sen}\, [\omega . t]$$

Definições :

✓ Deslocamento (X) : é a distância que separa a partícula da posição média da trajetória num tempo t. Também pode ser chamado de elongação.

✓ Amplitude (A) : é a distância que separa o ponto médio e os extremos da trajetória.

✓ Período (T) : é o tempo gasto pela partícula para realizar uma oscilação completa.

✓ Freqüência (f) : é o número de oscilações completas realizada pela partícula em cada unidade de tempo.

As seguintes relações são válidas:

$$T = 1/f \; ; \quad \omega = 2\,\pi f \; ; \quad \omega = 2\pi/T.$$

As unidades são: T → segundo, minuto, hora, etc.
f → oscilações/segundo, ciclos/segundo, Hz, etc.
ω → radianos/segundo, rotações/segundo, rotações/minuto (rpm), etc.
X, A → metros, milímetros, centímetros, etc.

o deslocamento 'X' pode ser escrito:

$$X = A \,.\, sen\,[\omega.t] \rightarrow X = A \,.\, sen\,[2\,\pi\, t\,/\,T]$$

Análises importantes:

- Forças
- Trocas de Energia
- Perdas

A Velocidade da partícula no MHS é mostrada na Figura 1.4.

$$dX/dt = V = A\omega \,.\, \cos\,[\omega.t]$$

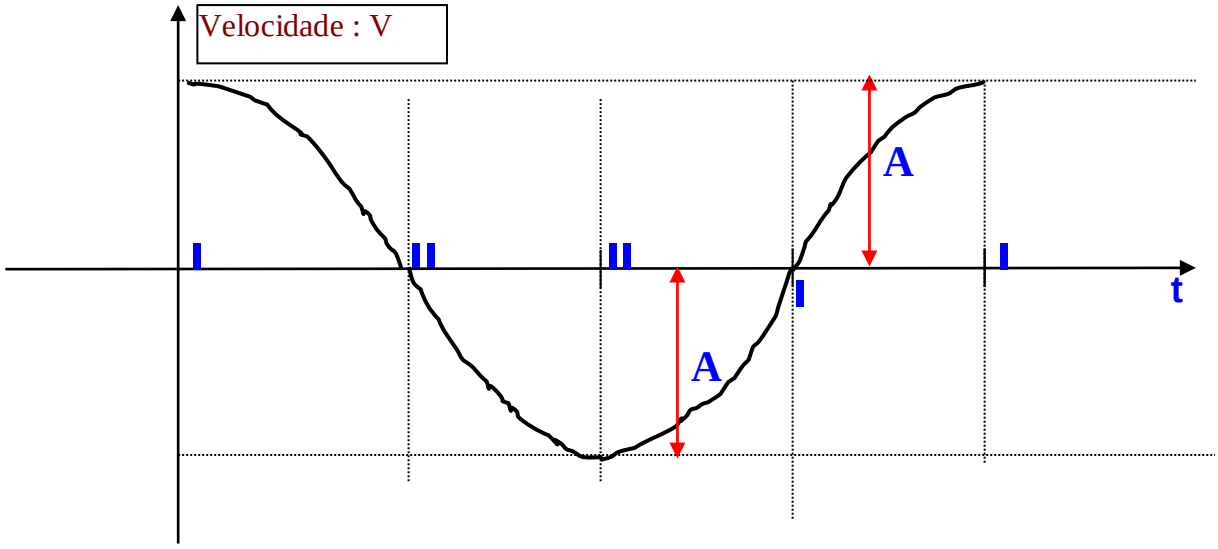


Figura 1.4 : Velocidade de um MHS em função do tempo.

A aceleração da partícula no MHS é mostrada na Figura 1.5.

$$dV/dt = a = - A\omega^2 \,.\, sen\ \omega.t$$

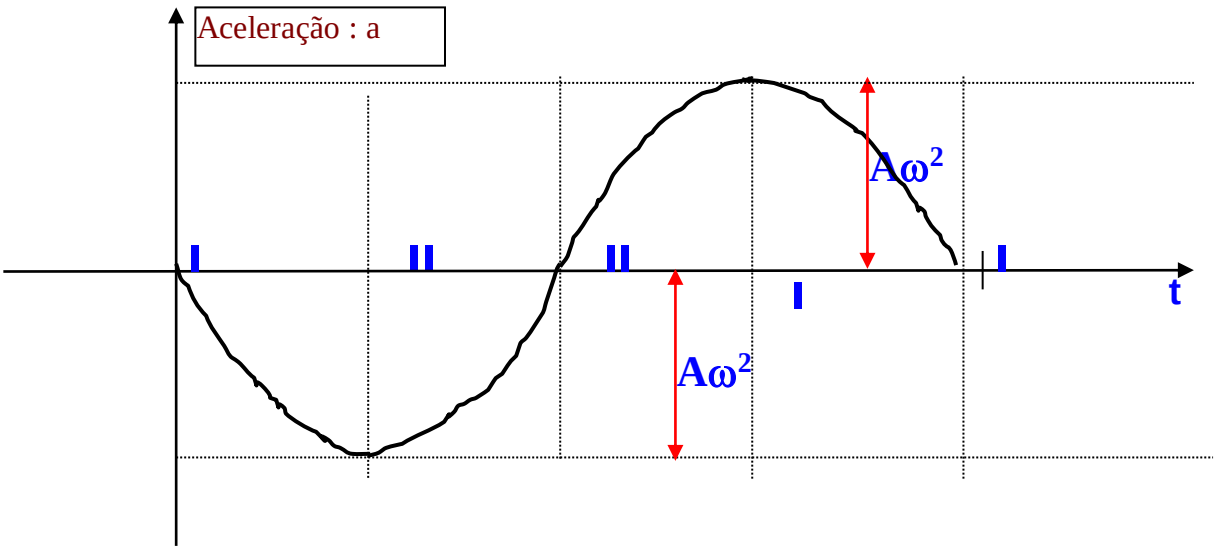


Figura 1.5 : Aceleração de um MHS em função do tempo.

2. – O Movimento Ondulatório

Definição: Movimento Ondulatório é o Movimento Vibratório que se propaga em meios elásticos. Por meio elástico entendemos aquele que deformado, volta ao seu estado primitivo, logo que cessa a causa deformadora. Ex.: gases, líquidos e sólidos.

Abalo ou perturbação: se um ponto de um meio elástico contínuo recebe uma modificação qualquer em suas condições físicas (por ex. um movimento, um impulso, uma vibração) diz-se que houve uma 'perturbação' ou um 'abalo'. A energia da perturbação se propaga através desse meio em forma de ondas, em todas as direções. Eis alguns exemplos de perturbação em meios elásticos: ao tocarmos a corda de um violão, causamos um abalo, que se propaga por toda a corda; ao jogarmos uma pedra na superfície da água, a perturbação (em forma de ondas circulares) se propaga por toda superfície; numa explosão no ar, as ondas sonoras se propagam em todas as direções.

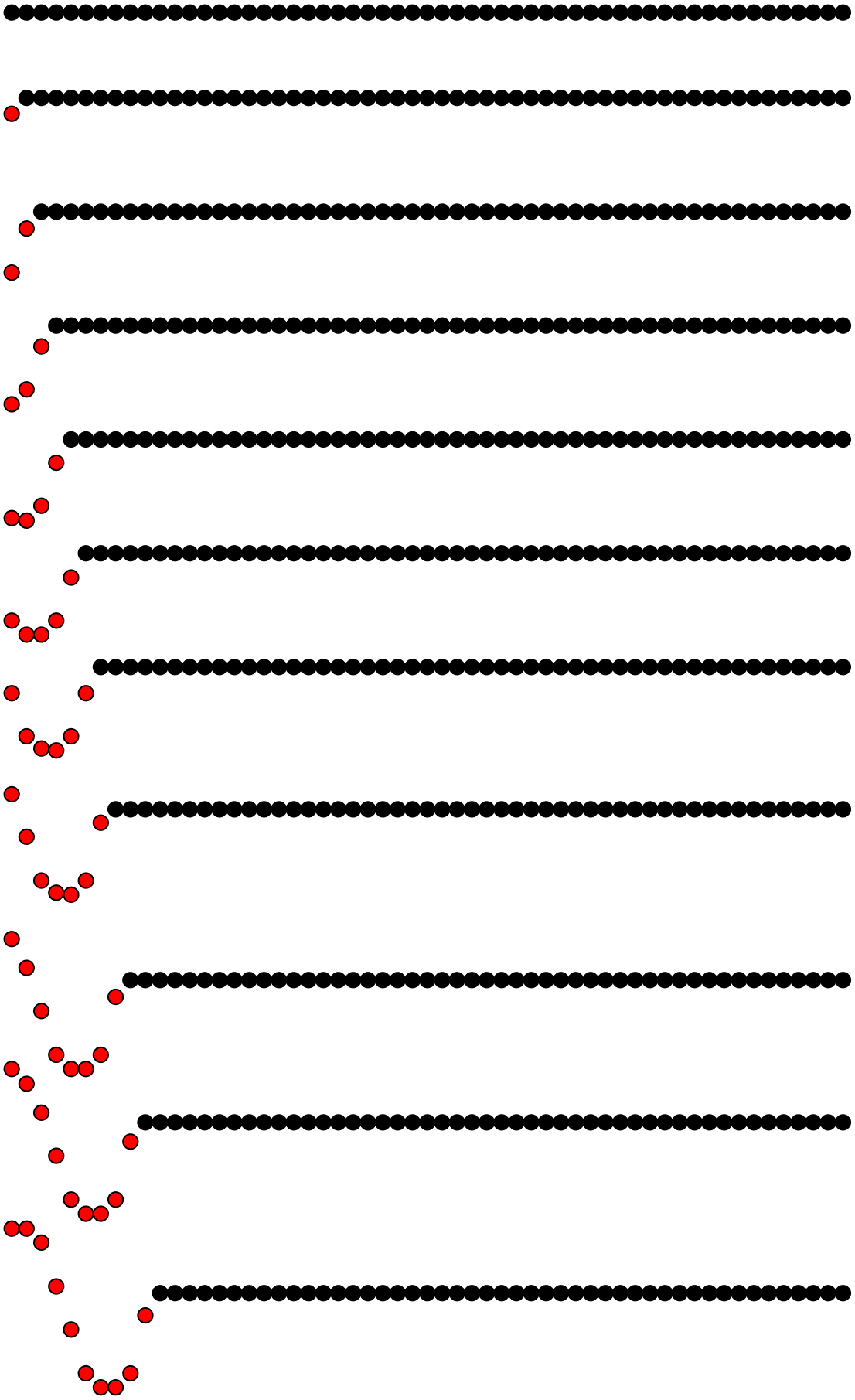
2.1. – Formas de Propagação

A propagação da perturbação pelo meio elástico pode acontecer de duas formas: transversal e longitudinal.

Propagação Transversal

É aquela em que o movimento das partículas (em função do abalo) é perpendicular à direção de propagação. A Figura 1.6 mostra uma perturbação se propagando transversalmente num meio elástico.

- ● pontos ainda não alcançados pelo abalo;
- ● pontos em movimento;
- ○ deixaram de vibrar.



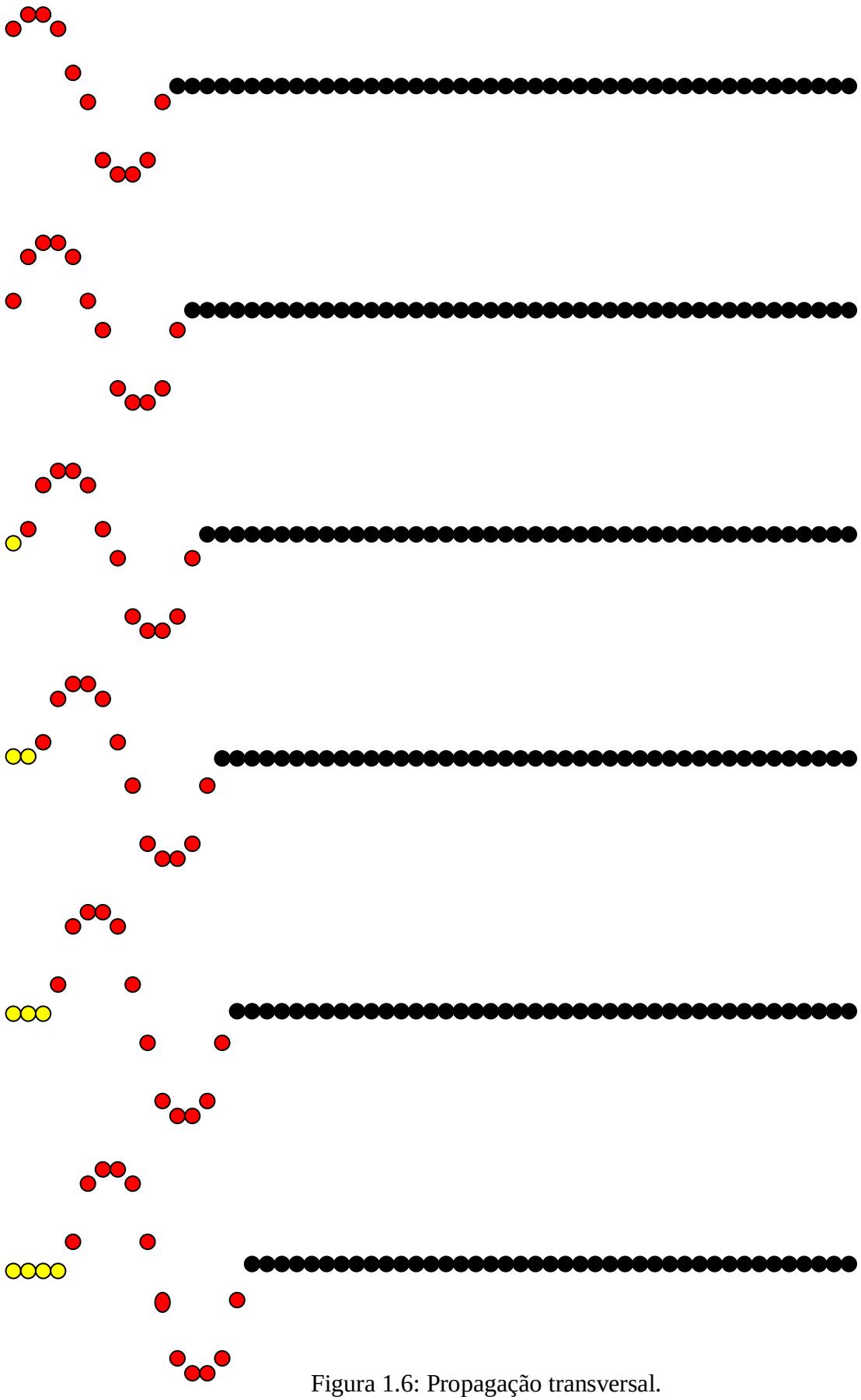


Figura 1.6: Propagação transversal.

Propagação Longitudinal

É aquela em que o movimento das partículas coincide com a direção da propagação (Figura 1.7.).

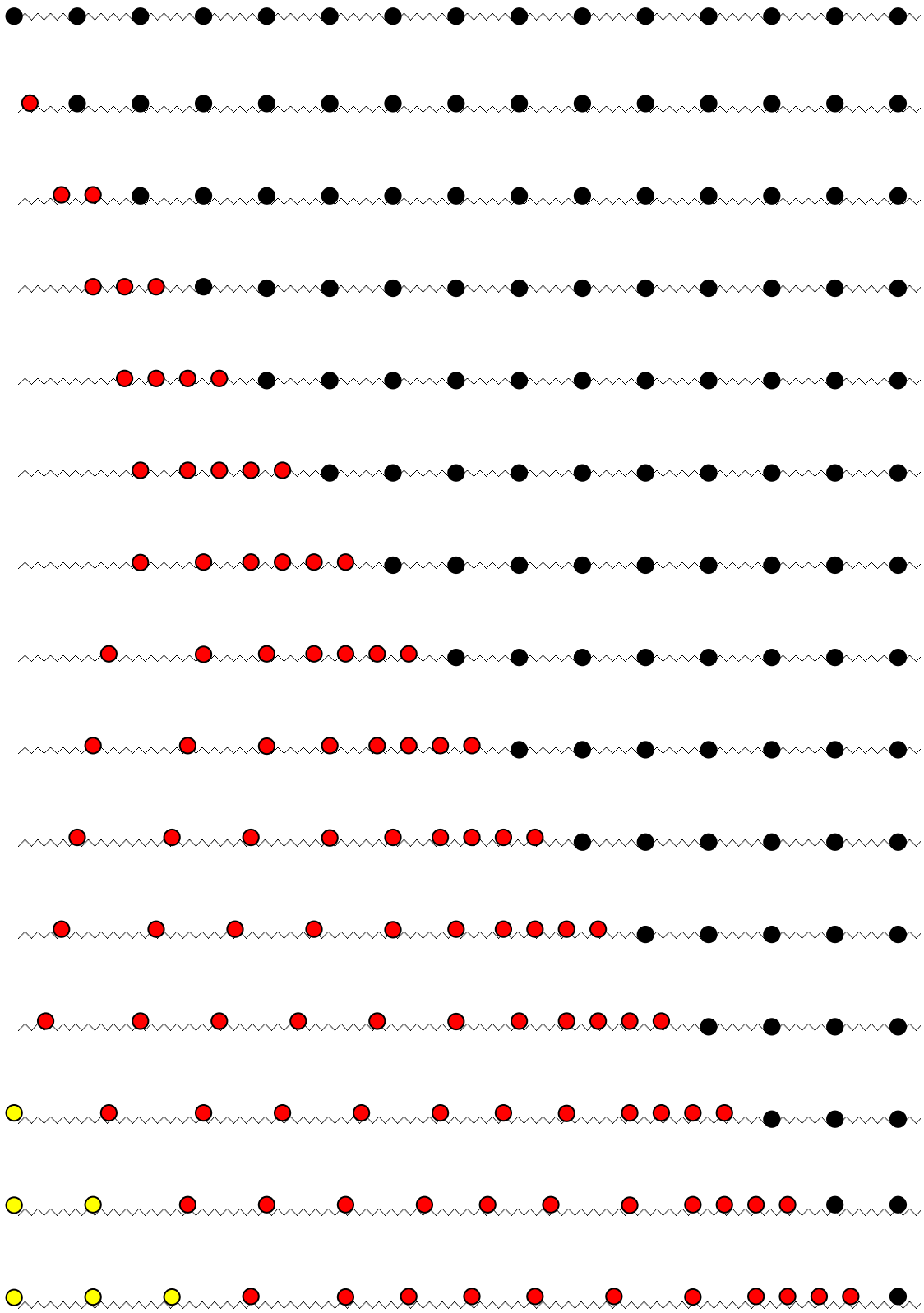


Figura 1.7 : Propagação longitudinal

Portanto, existem dois tipos de propagação de ondas : transversal e longitudinal.

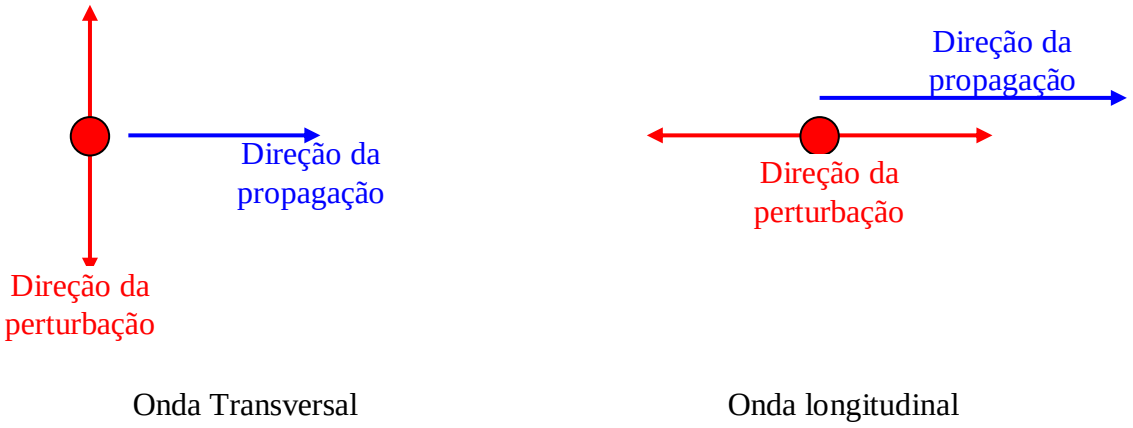


Figura 1.8 : Esquema de propagação de uma onda.

2.2. – Comprimento de onda (λ)

É o espaço percorrido pela perturbação, até o ponto em que a partícula passe a repetir o movimento. Também pode ser definido como a distância correspondente a uma oscilação completa. O ***comprimento de onda*** é representado por **λ.** (Figura 1.9).

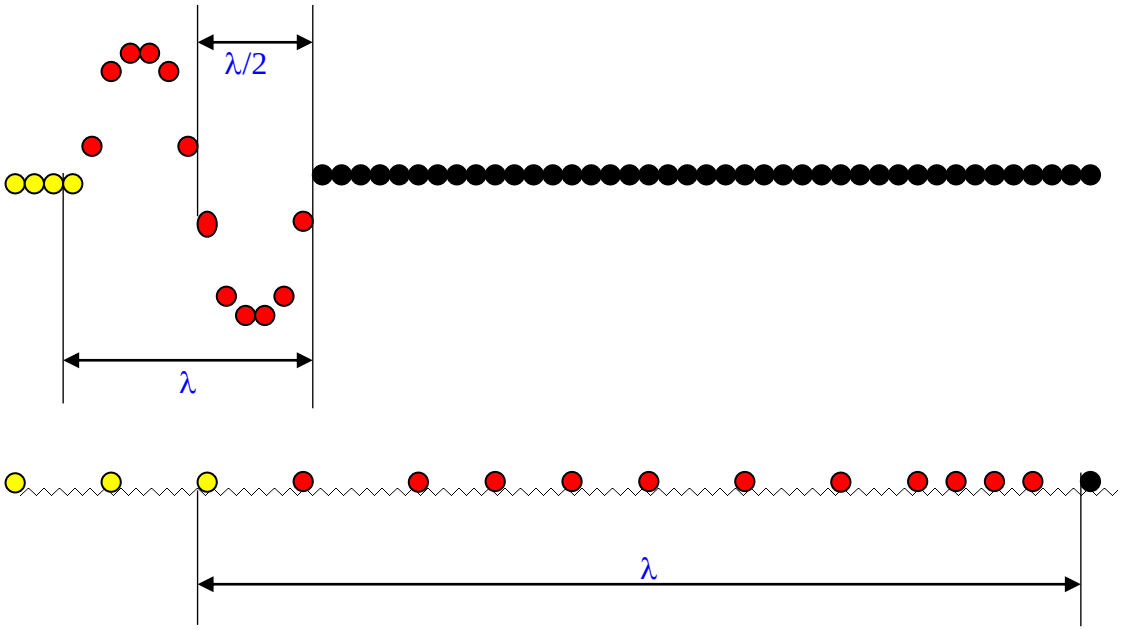


Figura 1.9 : Comprimento de onda

2.3. – Propriedades da propagação das ondas

☒ Reflexão

Quando a propagação de um trem de ondas é interrompida por uma superfície delimitadora do meio elástico, ele volta ao meio primitivo, mudando sua direção. Este fenômeno é chamado de ***reflexão***.

Quando o trem de ondas volta sobre a direção de incidência, acontece uma sobreposição das ondas. O sistema de ondas resultante é chamado de ***ondas estacionárias***. A onda estacionária apresenta alternadamente pontos onde se anula (nós ou nodos), e pontos onde alcança o valor máximo (ventres). Esta onda é dita estacionária porque os nodos e os ventre aparecem sempre nas mesmas posições ao longo da onda (Figura 1.10).

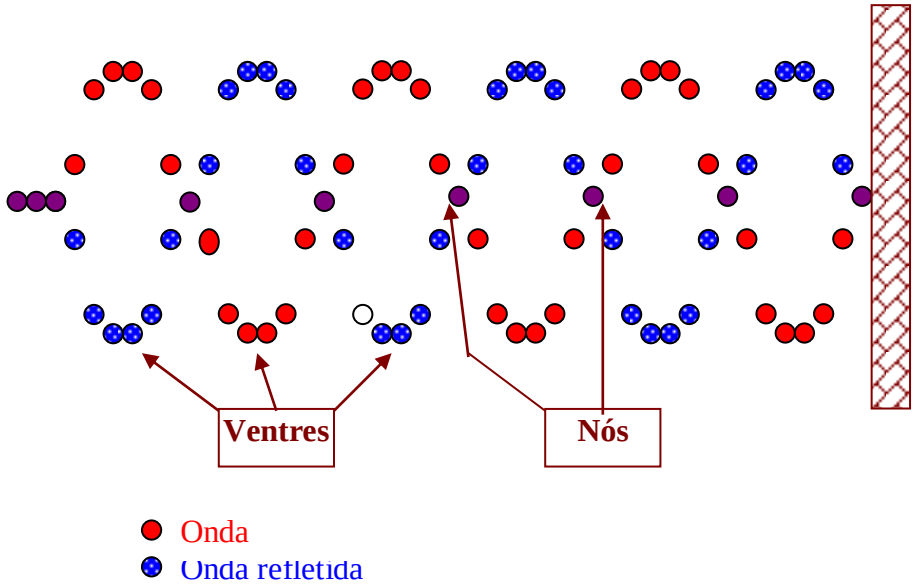


Figura 1.10: Reflexão de uma onda e formação da onda estacionária

☒ Batimento

É o fenômeno resultante da sobreposição de dois trens de ondas com freqüências muito próximas, se propagando na mesma direção. O trem de onda resultante assume, periodicamente, amplitudes máximas e mínimas, podendo estas serem nulas quando a amplitude dos dois movimentos forem iguais.

☒ Ressonância

É o fenômeno pelo qual um corpo em movimento vibratório induz outros corpos, nas proximidades, a vibrarem em concordância com ele. Esta concordância corresponde a freqüência e fase.

☒ Princípio de Huyghens-Fresnel

Num movimento ondulatório, cada partícula em vibração se constitui como uma fonte de novas ondas de igual período, chamadas de ondas elementares. A perturbação, num ponto qualquer do meio elástico, é resultante da sobreposição das ondas elementares.

A Figura 1.11 ilustra o princípio de Huyghens-Fresnel:

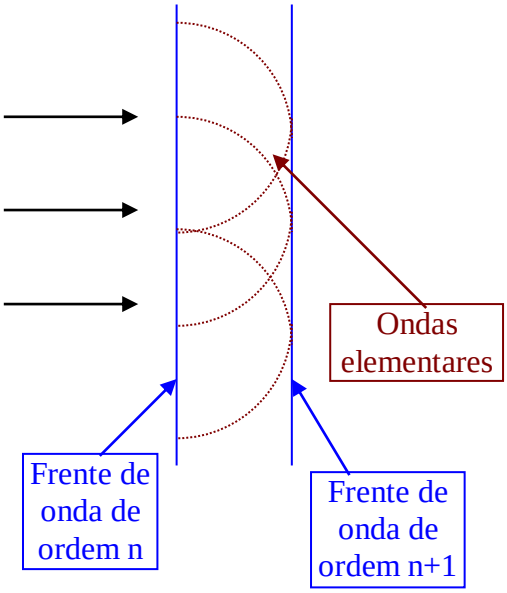


Figura 1.11: Princípio de Huyghens-Fresnel.

☒ Difração

Difração é a propriedade do movimento ondulatório de contornar obstáculos. Esta propriedade se baseia no princípio de Huyghens-Fresnel.

Vamos considerar um trem de ondas que avança sobre um obstáculo (Figura 1.12):

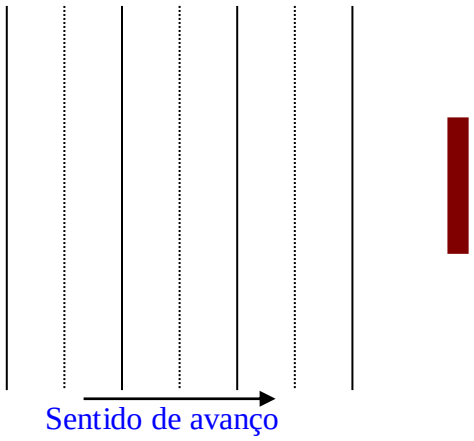


Figura 1.12: Um trem de ondas avançando sobre um obstáculo.

Ao encontrar o obstáculo, as ondas deveriam continuar sua propagação em linha reta, ou seja, as partículas posicionadas atrás do obstáculo não deveriam ser afetadas pela perturbação da onda (Figura 1.13).

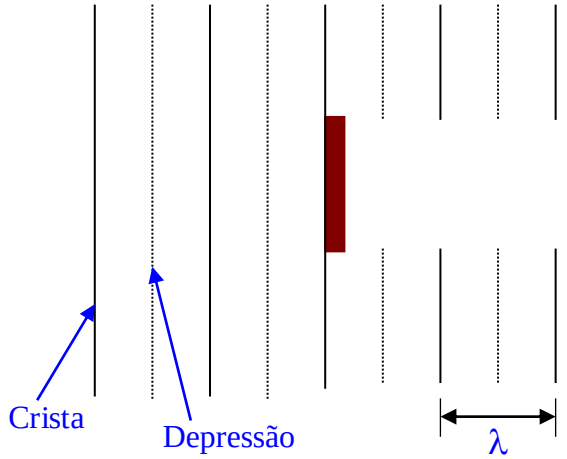


Figura 1.13: Propagação de uma onda em linha reta, contra o princípio de Huyghens-Fresnel.

Porém isso (Fig. 1.13) não acontece. Na realidade as ondas se recompõem após o obstáculo, como na Figura 1.14.

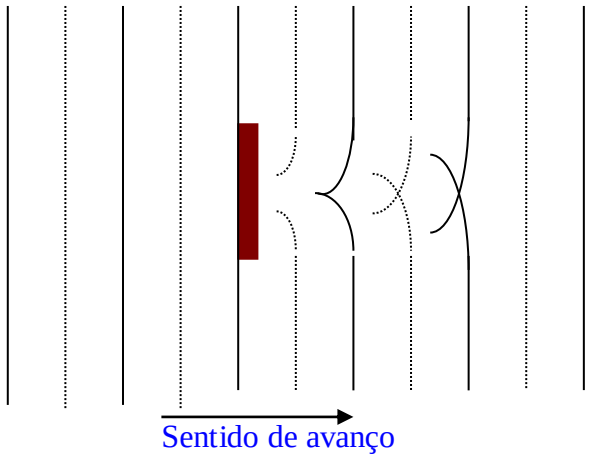


Figura 1.14: Recomposição da onda após o obstáculo.

◆ ◆ ◆

Capítulo 2

Propriedades Físicas do Som

1. - Introdução

O som é um fenômeno vibratório resultante de variações da pressão no ar. Essas variações de pressão se dão em torno da pressão atmosférica e se propagam ***longitudinalmente***, à velocidade de 344 m/s para 20 º C (fig. 2.1).

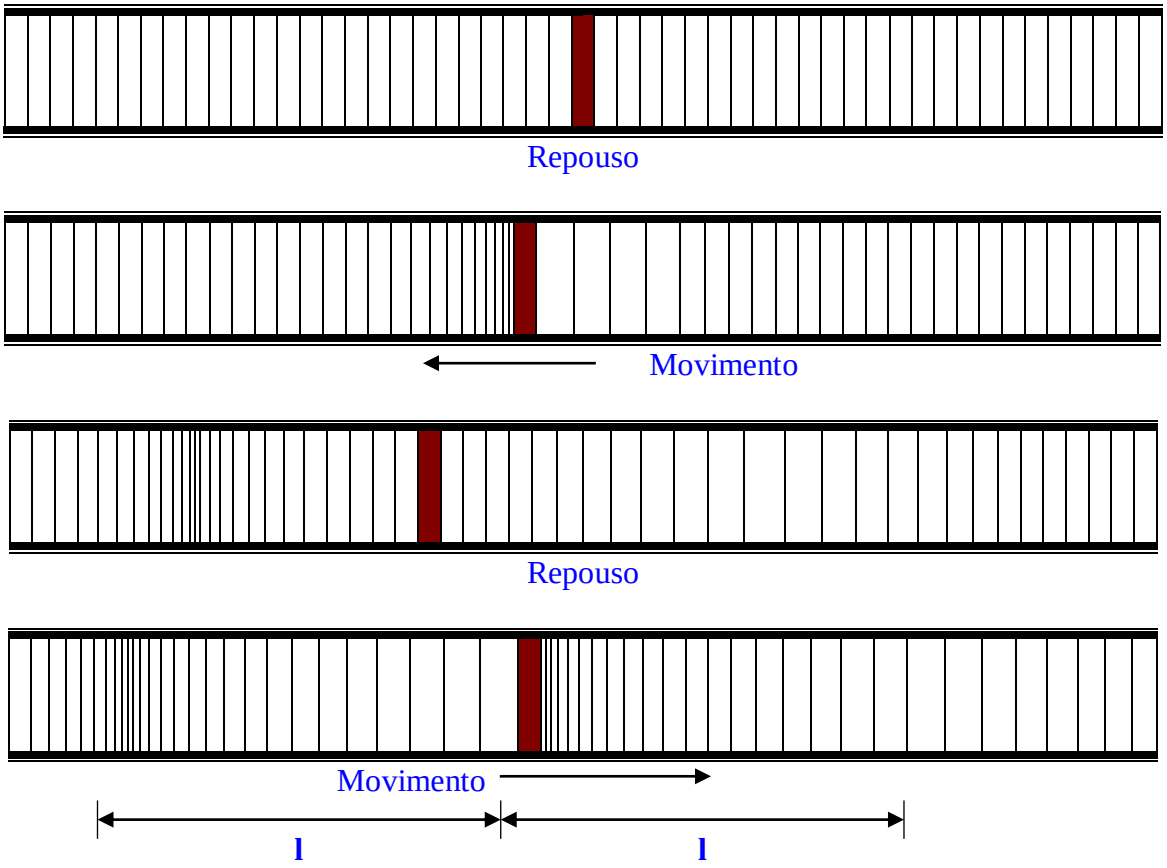


Figura 2.1 - Propagação do Som por ondas longitudinais.

Qualquer fenômeno capaz de causar ondas de pressão no ar é considerado uma fonte sonora. Pode ser um corpo sólido em vibração, uma explosão, um vazamento de gás a alta pressão, etc.

Basicamente, todo som se caracteriza por três variáveis físicas : freqüência, intensidade e timbre. Vamos fazer um estudo mais detalhado de cada uma delas.

2. - Freqüência

Freqüência (**f**) é a número de oscilações por segundo do movimento vibratório do som. Para uma onda sonora em propagação, é o número de ondas que passam por um determinado referencial em um intervalo de tempo. Chamando de **l** o comprimento de onda do som e **V** a velocidade de propagação da onda, pode-se escrever :

$$V = l \cdot f$$

A unidade de freqüência (**SI**) é ciclos por segundo, ou **Hertz** (**Hz**). Portanto, um som de 32 Hz tem uma onda de 10,63 m e, um som de 20.000 Hz tem um comprimento de onda de 1,7 cm (fig. 2.1).

O nosso ouvido é capaz de captar sons de 20 a 20.000 Hz. Os sons com menos de 20 Hz são chamados de infra-sons e os sons com mais de 20.000 Hz são chamados de ultra-sons. Esta faixa de freqüências entre 20 e 20kHz é definida como ***faixa audível de freqüências*** ou ***banda audível***.

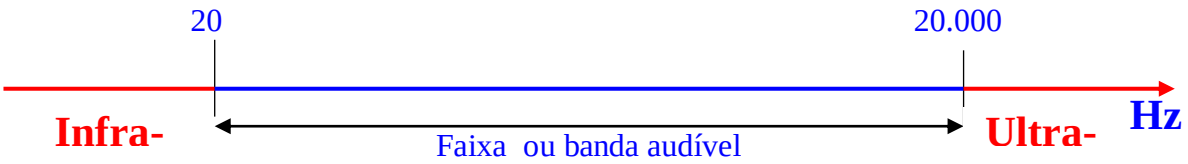


Fig. 2.2 – Faixa audível de freqüências

Dentro da faixa audível, verificamos que o ouvido percebe as freqüências de uma maneira não linear. Experiências demonstram que o ouvido humano obedece a **Lei de Weber** *(ver Capítulo 5*), de estímulo/sensação, ou seja, as sensações como cor, som, odor, dor, etc., variam como o logaritmo dos estímulos que as produzem.

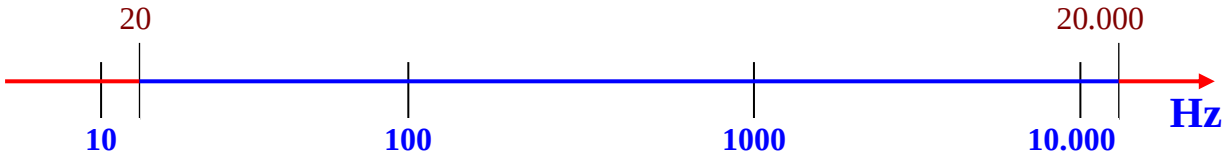


Fig. 2.3 – Sensação da audição das freqüências do som

Assim, os intervalos entre os sons de 100 e 200 Hz, 200 e 400 Hz, 400 e 800 Hz parecerão iguais ao nosso ouvido. Portanto, pela Lei de Weber, concluímos que o intervalo entre freqüências não se mede pela diferença de freqüências, mas pela relação entre elas. Desta maneira, se define **uma oitava** como sendo o intervalo entre freqüências cuja relação seja igual a 2.

$$\frac{200}{100} = \frac{400}{200} = \frac{800}{400} = 2 \Rightarrow 1 \text{ oitava}$$

Esta é a razão que intervalos entre as notas **DÓ** sucessivas de um teclado de piano parecem sempre iguais, constituindo o intervalo de uma oitava (fig. 2.4). Em qualquer representação gráfica (figuras ou gráficos) colocamos a freqüência em escala logarítmica, por ser a forma que mais se aproxima da sensação do nosso ouvido.

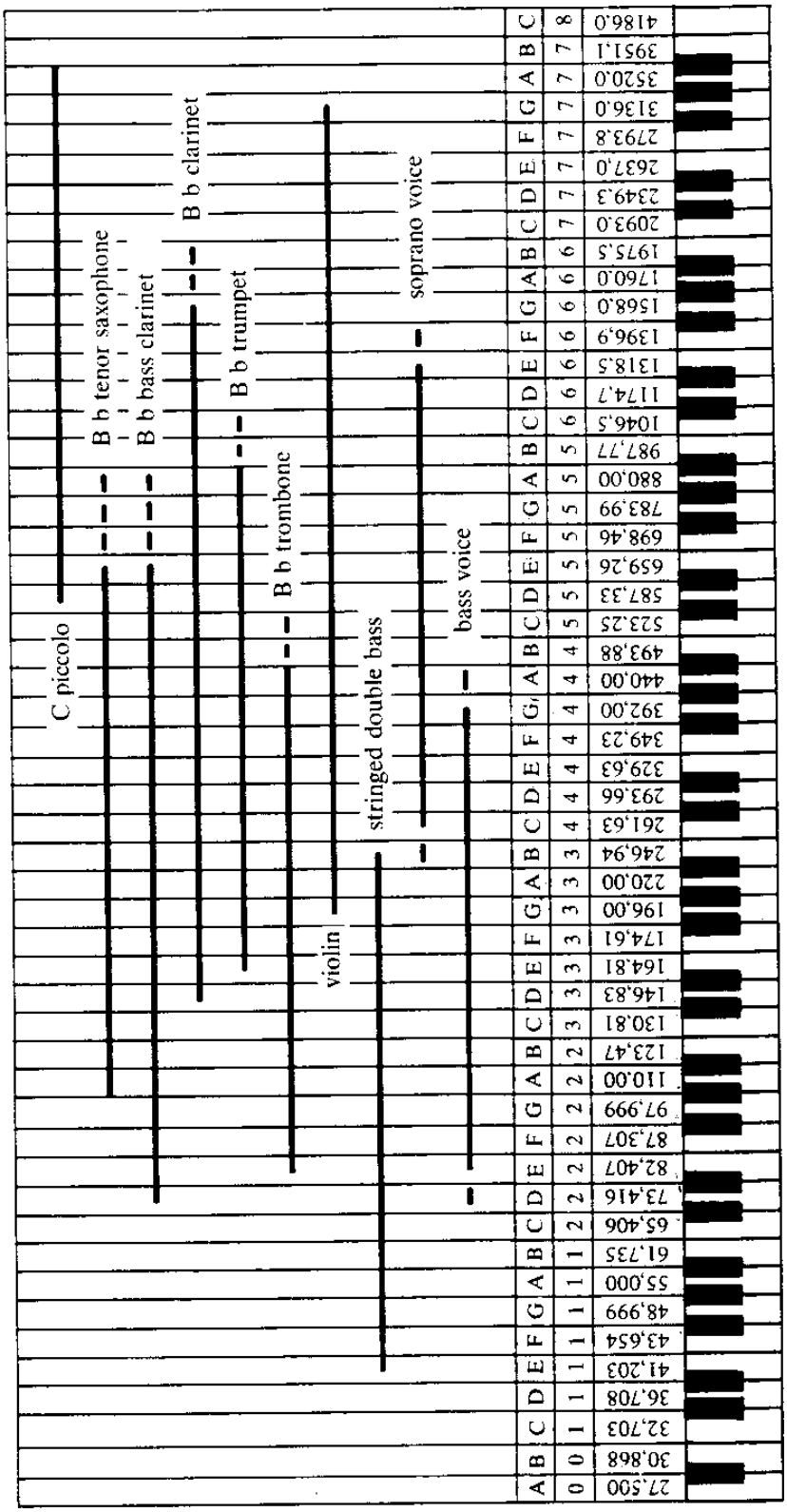


Figura 2.4. - Freqüências do piano

Atualmente, usamos como freqüência de referência (padronizada pelo SI), o valor de 1000 Hz, ficando as oitavas com freqüência central em 500, 250, 125, 62,5, 31,25, e 2.000, 4.000, 8.000 e 16.000 Hz.

As freqüências audíveis são divididas em 3 faixas :

- ***Baixas freqüências ou sons graves*** ← as 4 oitavas de menor freqüência, ou seja, 31,25 , 62,5 125 e 250 Hz.
- ***Médias freqüências ou sons médios*** ← as três oitavas centrais, ou seja, 500, 1000 e 2000 Hz.
- ***Altas freqüências ou sons agudos*** ← as três oitavas de maior freqüência, ou seja, 4.000, 8.000 e 16.000 Hz.

3. - Intensidade

A intensidade do som é a quantidade de energia contida no movimento vibratório. Essa intensidade se traduz com uma maior ou menor amplitude na vibração ou na onda sonora. Para um som de média intensidade essa amplitude é da ordem de centésimos de milímetros.

A **intensidade** de um som pode ser medida através de dois parâmetros :

- a **energia** contida no movimento vibratório (**W/cm^2**)
- a **pressão do ar** causado pela onda sonora (**BAR = 1 dina/cm^2**)

Como valor de referência para as medições, fixou-se a menor intensidade sonora audível. Esse valor, obtido da média da população, foi de :

- para energia = 10^{-16} W/cm^2
- para pressão = 2×10^{-4} BAR

Como podemos notar, do ponto de vista físico, a energia contida num fenômeno sonoro é desprezível. A energia sonora contida num grito de "gol" de um estádio de futebol lotado, mal daria para aquecer uma xícara de café. Se a energia da voz de toda a população de uma cidade como Bauru fosse transformada em energia elétrica, seria o suficiente apenas para acender uma lâmpada de 50 ou 60 Watts.

Ao fazermos uma relação entre a intensidade sonora e a audição, novamente nos encontramos com a **Lei de Weber**, ou seja, conforme aumentamos a intensidade sonora o nosso ouvido fica cada vez menos sensível ; ou ainda, precisamos aumentar a intensidade de maneira exponencial para que o ouvido "sinta" o som de maneira linear.

Desta maneira, quando escutamos um aparelho de som que esteja reproduzindo 20 Watts de potência elétrica, e aumentamos instantaneamente a sua potência para 40 Watts, o som nos parecerá mais intenso. Se quisermos agora, aumentar mais uma vez o som para que o resulte a mesma sensação de aumento, teremos que passar para 80 Watts.

Portanto, usamos uma escala logarítmica para a intensidade sonora, da mesma maneira que usamos para a freqüência.

Para sentirmos melhor o problema, analisemos o gráfico da figura 1.5., onde temos intensidades sonoras desde 10^{-16} W/cm^2 (limiar de audibilidade), até 10^{-2} W/cm^2 (limiar da dor). Nota-se que o nosso ouvido tem capacidade de escutar sons cuja diferença de intensidade seja de cem trilhões de vezes. Se quiséssemos usar a escala linear de intensidade sonora, teríamos que dizer, por exemplo, que o ruído da rua de uma cidade é 100 milhões de vezes mais

intenso que o menor som audível. Logo se vê a improbidade desses números : matematicamente são impraticáveis e, fisiologicamente, não refletem a sensação audível.

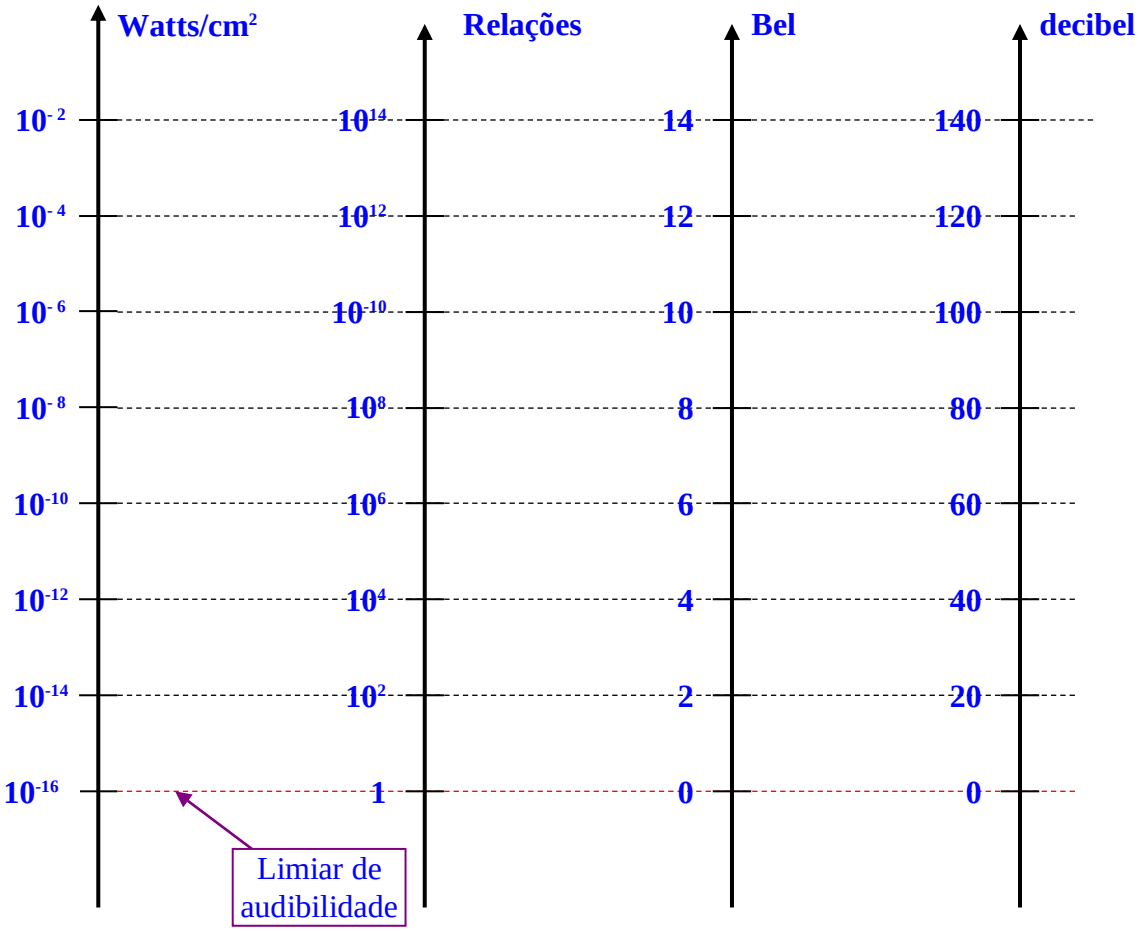


Figura 2.5. – Esquema da formação da escala em decibels

Para contornar esses problemas lançamos mão da escala logarítmica. Vamos usar apenas o expoente da relação (figura 2.5) e dizer que o ruído da rua está **8 BELs** acima do limite de audibilidade (com valor de **0 BEL**). O nome **BEL** foi dado em homenagem a **Alexandre Graham Bell,** pesquisador de acústica e inventor do telefone.

Agora a escala ficou reduzida em excesso pois, entre o limiar de audibilidade e o ruído da rua existem mais de 8 unidades de sons audíveis. Foi criado, então, o **décimo do BEL**, ou seja , **o decibel :** dizemos agora que o ruído da rua está **80 dB** *(com o "d" minúsculo e o "B" maiúsculo)*, acima do valor de referência.

Portanto, o número de decibels (dB) nada mais é que aquele expoente da relação das intensidades físicas, multiplicado por 10.

A intensidade sonora medida em decibels é definida como Nível de Intensidade Sonora (NIS) **ou Sound Intesity Level (SIL), em inglês.**

Portanto devemos sempre ter em mente :

✓ Intensidade Sonora ☑ Watts / cm ^{2}
✓ Nível de Intensidade Sonora - NIS - ☑ decibels (dB)

A unidade de medida de intensidade sonora é W / cm^2 ou BAR.
O decibel *não é uma unidade de medida,* mas apenas uma escala.
O plural de decibel é decibels. O termo "decibeis" é errado, embora tenha se tornado de uso popular.

Assim, o NIS, medido em decibels, satisfaz a construção fisiológica do nosso ouvido. Matematicamente podemos escrever :

$$NIS = 10 . \log \frac{I}{I_{ref}}$$

sendo **I** a intensidade sonora de um som, e $\mathbf{I_{ref} = 10^{-16}\ W / cm^2}$.

Voltando ao exemplo do aparelho de som com 20 Watts, digamos que o aparelho reproduza 60 dB de nível de intensidade sonora no ambiente; com 40 W, o aparelho reproduzirá 63 dB, e com 80 W, 66 dB. Da mesma forma, um avião à jato produz perto de 140 dB de NIS; dois aviões idênticos produzirão 143 dB.

Portanto, na escala em decibels, o dobro de 70 dB é 73 dB, assim como o dobro de 120 dB é 123 dB. A metade de 90 dB é 87 dB, assim como a metade 150 dB é 147 dB.

Desta forma, se uma máquina produz 60 dB, mil máquinas idênticas produzirão 90 dB. Para um operário trabalha 8 horas/dia num ambiente com 100 dB de ruído, se ele trabalhar apenas 4 horas/dia ele estaria exposto, em média a 97 dB.

As figuras 2.6, 2.7 e 2.8 mostram alguns níveis de intensidade de som.

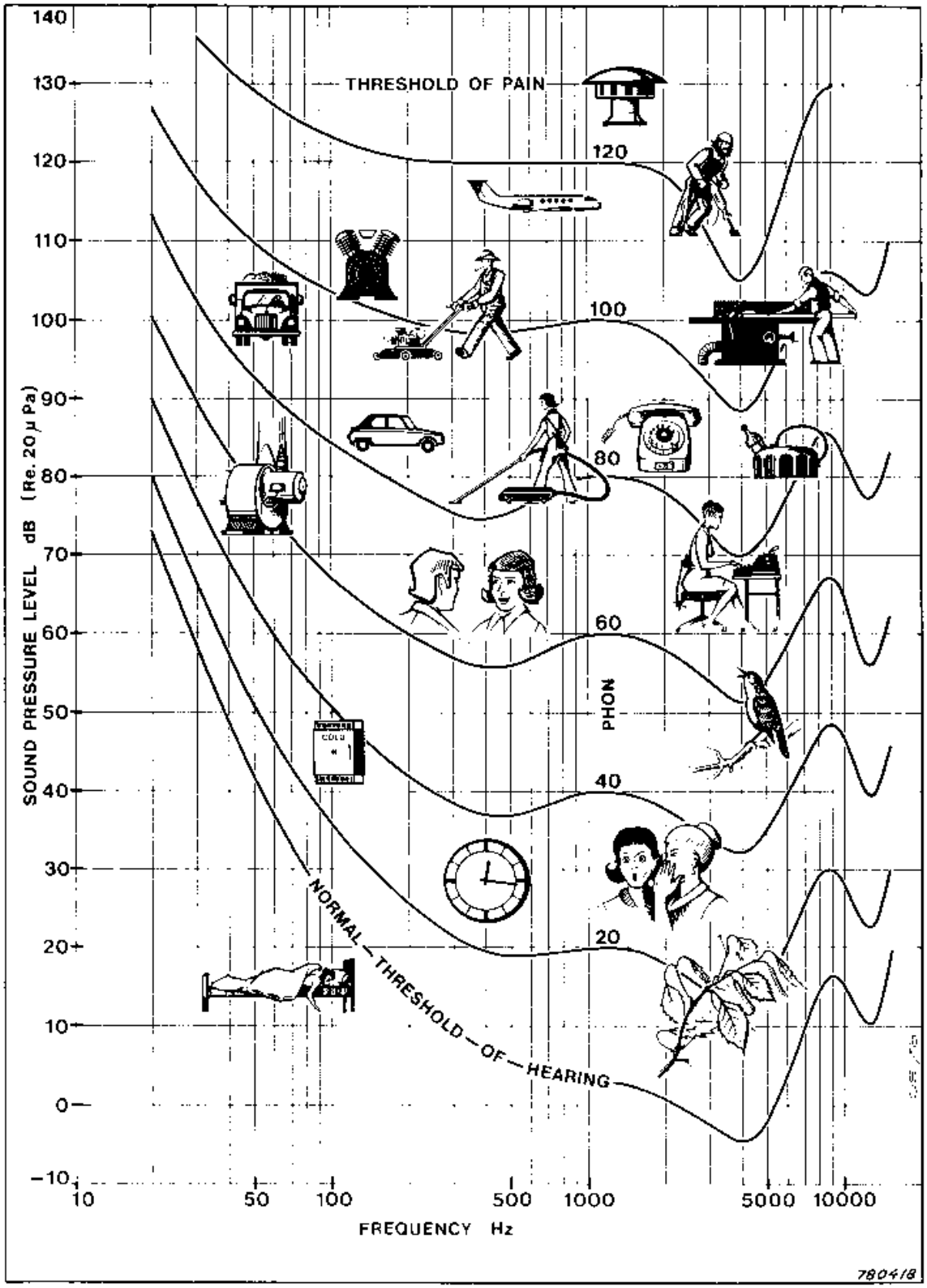


Figura 2.6 - Exemplos de Níveis de Intensidade Sonora (NIS).

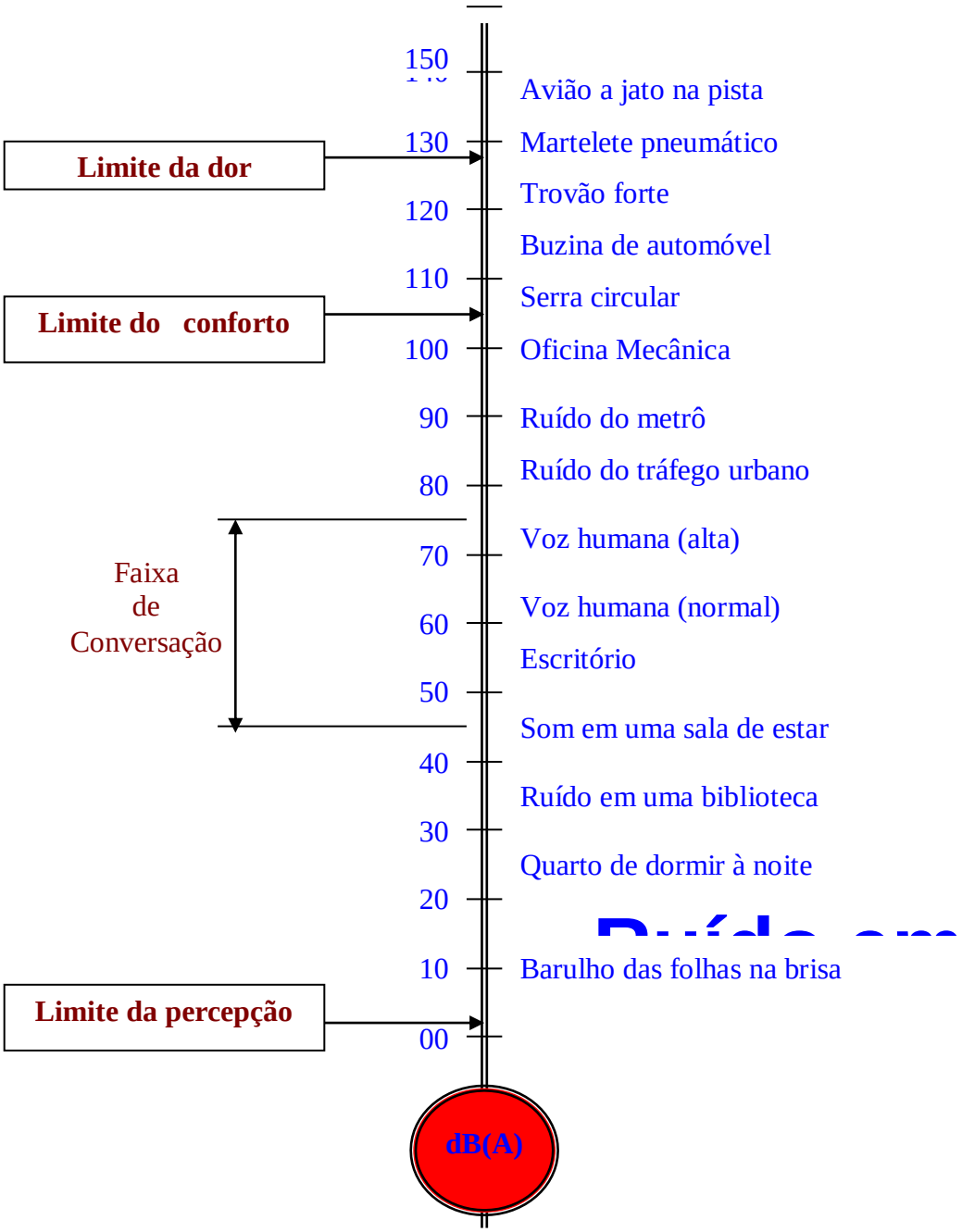


Figura 2.7 : Alguns exemplos de intensidade sonora

É importante notar que existe uma nítida divisão entre os sons que se apresentam abaixo e acima da voz humana; os sons com níveis inferiores à nossa voz são naturais, confortáveis e não causam perturbação; ao contrário, os sons superiores à voz humana podem ser considerados ruídos, normalmente são produzidos por máquinas, são indesejáveis, e causam perturbação ao homem.

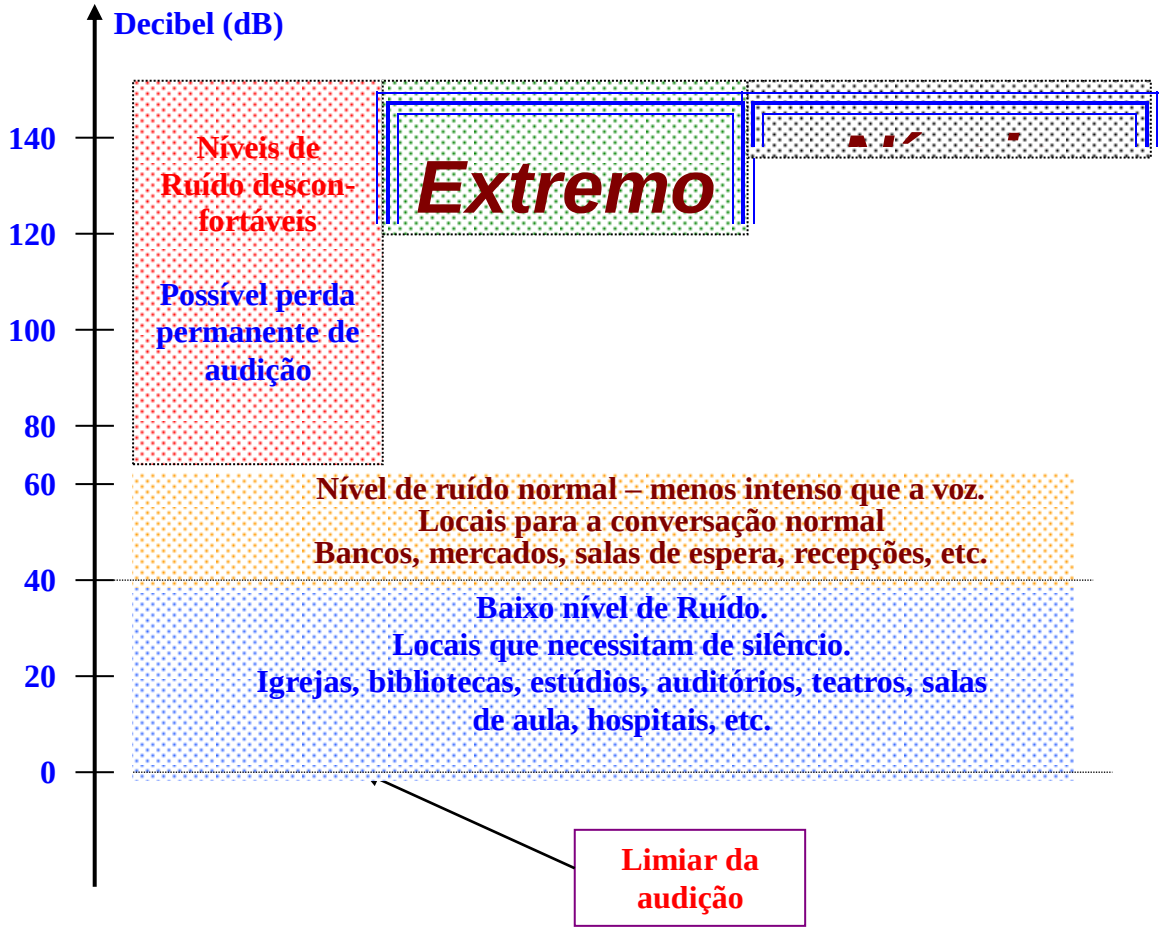
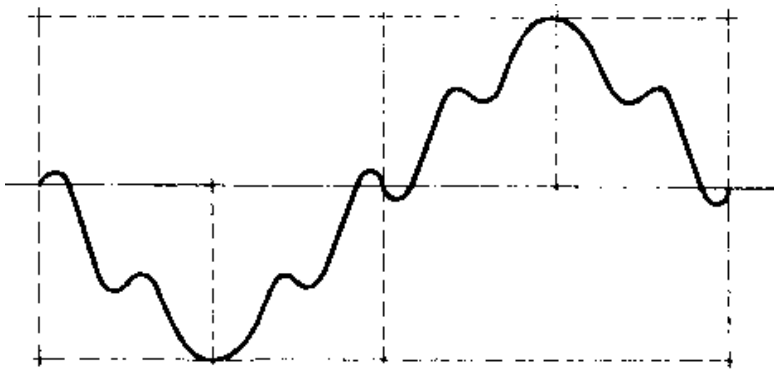


Figura 2.8. – Níveis de ruído em ambientes

4. - Timbre

Se nós tocarmos a mesma nota (mesma freqüência) com a mesma intensidade, em um piano e em um violino, notamos claramente a diferença. Em linguagem comum, dizemos que os seus timbres são diferentes. Portanto, o timbre nos permite reconhecer a fonte geradora do som. Tecnicamente, o timbre é a forma de onda da vibração sonora (fig. 2.9).



5. – Análise Espectral

A análise espectral é o estudo das freqüências que compõem um som complexo. Existem várias maneiras de proceder esta análise.

5.1. – Espectro (spectrum) de freqüências

O espectro de um som se refere à relação entre amplitude e freqüência de um som complexo. O matemático francês Jean Baptiste Fourier (1768 – 1830) foi o primeiro a aplicar este método de análise, conhecido hoje com o nome de ***Análise de Fourier***. Este método demonstra que qualquer forma de onda pode ser decomposta em uma soma de ondas senoidais. A freqüência destas ondas senoidais que formam o espectro guardam uma relação numérica com a freqüência mais baixa da série que, por este motivo, é chamada de freqüência fundamental (f_0). As demais freqüências, que forem múltiplos inteiros da freqüência fundamental, com valores iguais a 2 f_0, 3f_0, 4 f_0, 5 f_0, são os sobretons de f_0 e são conhecidas como ***tons harmônicos*** ou ***freqüências harmônicas***, sendo registradas por f_1, f_2, f_3, ... f_n. A Figura 2.10 ilustra a Análise de Fourier.

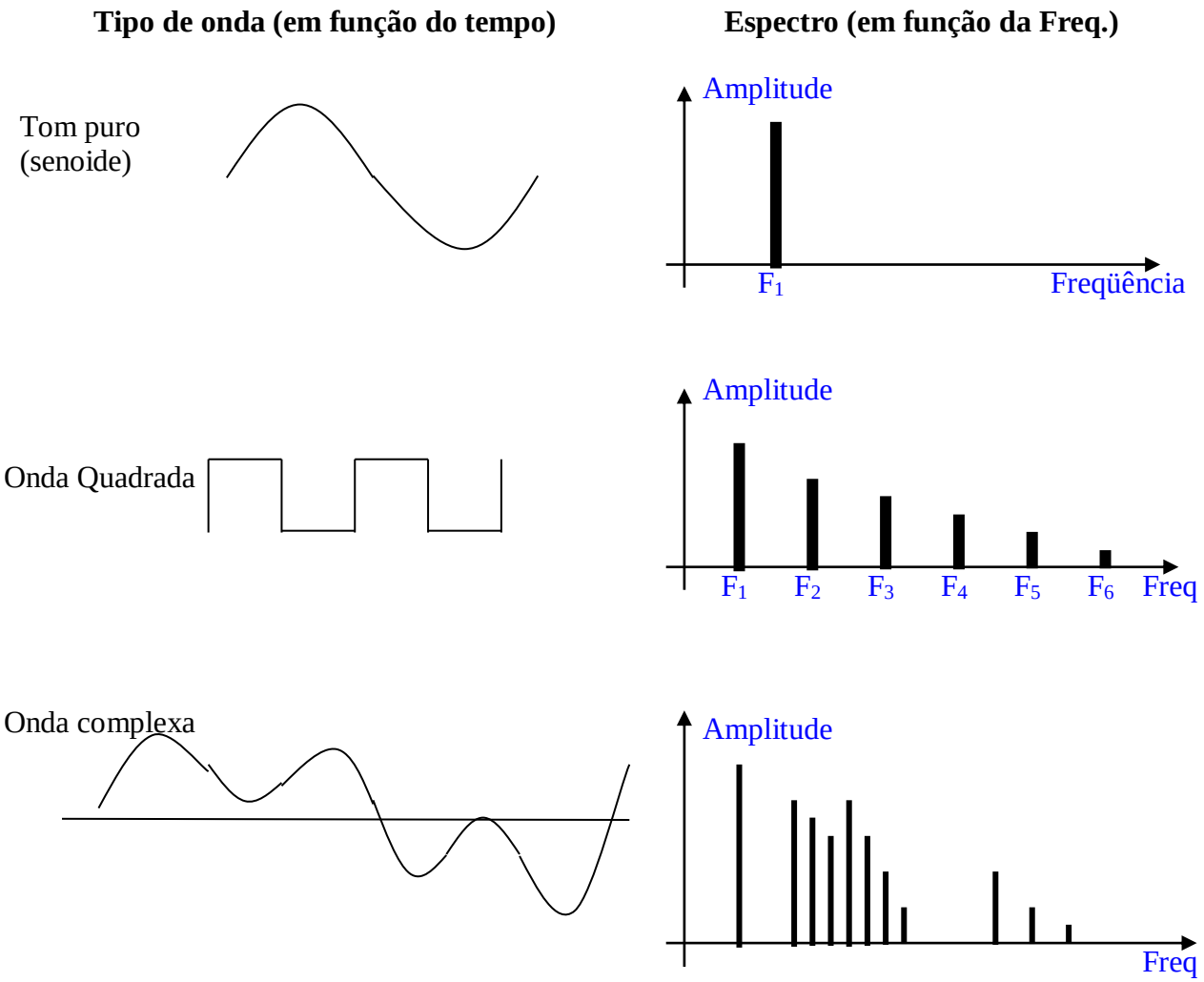


Figura 2.10 : Análise de Fourier.

5.2. – Densidade Espectral de Energia (Power Spectral Density)

A Densidade espectral apresenta a energia do fenômeno vibratório em função da freqüência. O gráfico de densidade espectral mostra a energia da onda sonora para cada freqüência discreta ou banda de freqüência. A Figura 2.11 apresenta um diagrama de Densidade espectral de energia. A Figura 2.12 mostra outros exemplos de espectros e densidade espectral.

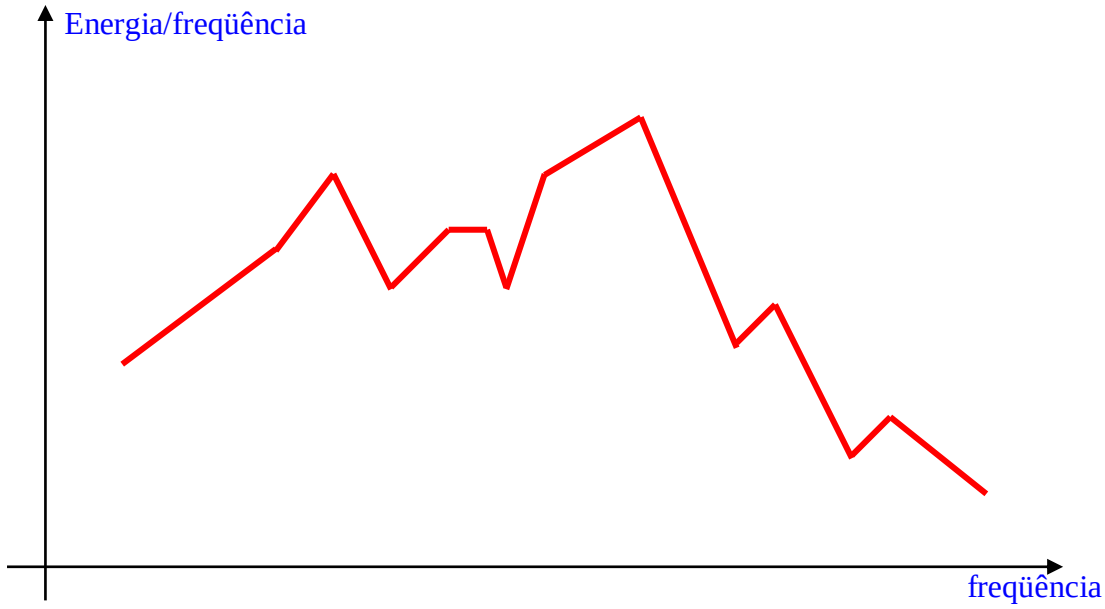


Figura 2.11 : Densidade espectral para um som complexo.

Vamos analisar com atenção a figuras 2.12.

♦ A figura 2.12a mostra uma onda senoidal, portanto, um sinal puro.

♦ no item b é mostrada a combinação de duas ondas senoidais: o sinal resultante é periódico e o espectro de freqüências mostra a decomposição do sinal.

♦ a figura 2.12c mostra uma onda quadrada: trata-se de um sinal periódico e o espectro de freqüências acusa a formação de um grande número de harmônicas.

♦no item d vemos um sinal não periódico: o espectro de freqüências não acusa valores específicos de freqüências, pois estes seriam em número infinito. Assim, apenas é possível obter-se a densidade espectral de energia.

Com essas colocações, podemos definir agora o que é ruído. Trata-se de um som indesejável, não periódico, que não é possível montar o seu espectro de freqüências, mas apenas a densidade espectral.

6. - O Ruído

A definição de ruído é um tanto ambígua. De um modo geral pode ser definida como um som indesejável. Assim vamos apresentar duas definições para o ruído :

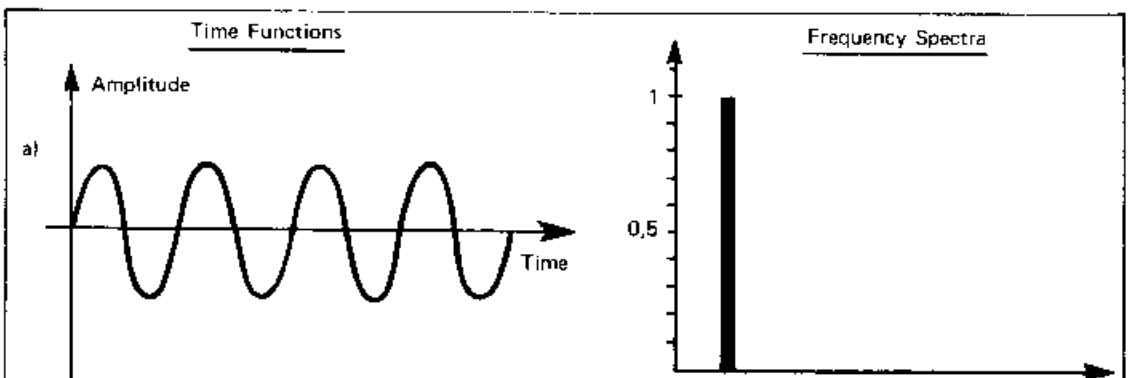


Figura 2.12 - Espectro e densidade espectral de sons.

Definição Subjetiva : *Ruído é toda sensação auditiva desagradável ou insalubre.*

Definição Física : *Ruído é todo fenômeno acústico não periódico, sem componentes harmônicos definidos.*

Fisicamente falando, o ruído é um som de grande complexibilidade, resultante da superposição desarmônica de sons provenientes de várias fontes. Seu espectro sempre será uma confusa composição de harmônicas sem qualquer classificação ou ordem de composição. Normalmente seu espectro é de banda larga (de freqüências), compacto e uniforme, sendo comum aparecer uma maior predominância de uma faixa de freqüências (graves, médias ou agudas). O espectro de freqüências de um ruído tem um difícil interpretação, preferindo-se a densidade espectral. (Figura 1.13).

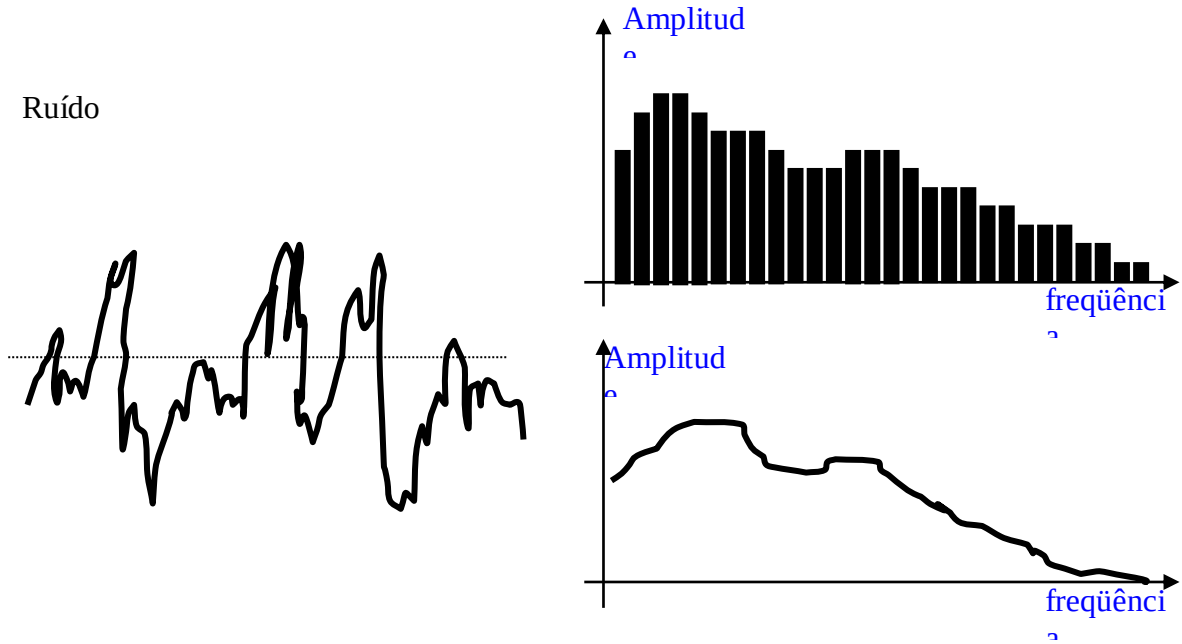


Figura 1.13: Espectro e densidade espectral de um ruído

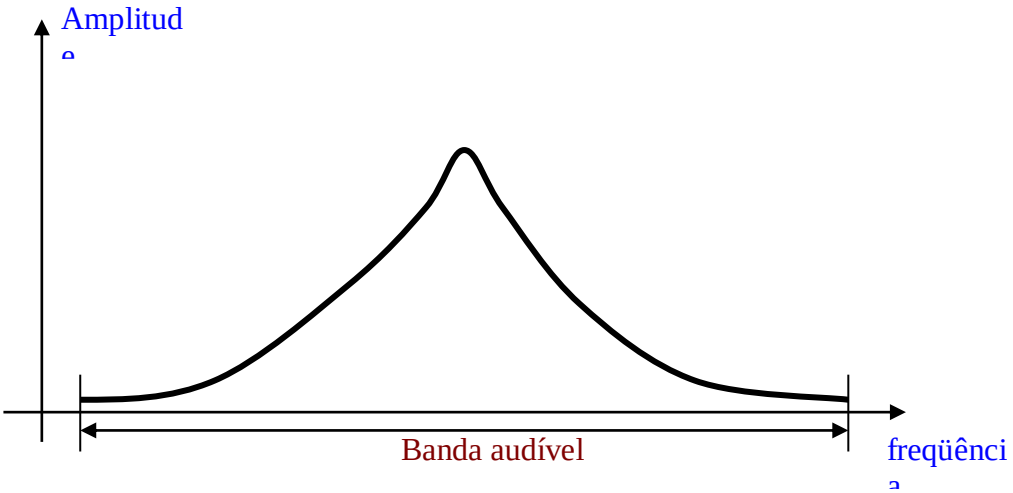
Nas últimas décadas os ruídos se transformaram em uma das formas de poluição que afeta a maior quantidade de pessoas. A partir de 1989 a Organização Mundial da Saúde já passou a tratar o ruído como problema de saúde pública

Nos próximos capítulos estudaremos, em detalhes, todos os aspectos do ruído.

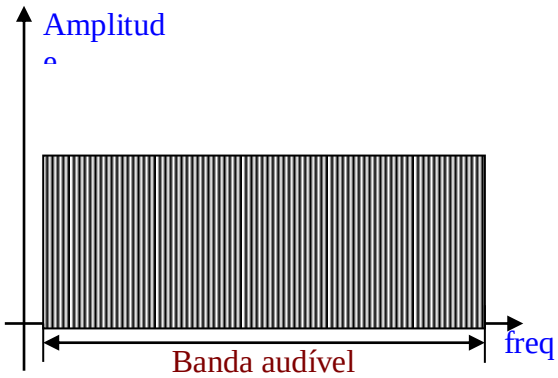
7. - Os Ruídos padronizados usados em ensaios

Por conter um grande número de freqüências, alguns ruídos foram padronizados, sendo usados em testes e calibração de equipamentos eletroacústicos. Os principais são:

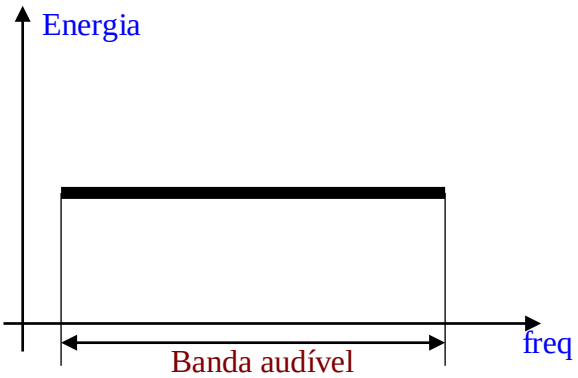
• ***Ruído aleatório*** – É o ruído cuja densidade espectral de energia é próxima da distribuição de gauss.



• ***Ruído branco*** – É o ruído cuja densidade espectral de energia é constante para todas as freqüências audíveis. O som de um ruído branco é semelhante ao de um televisor 'fora do ar'.

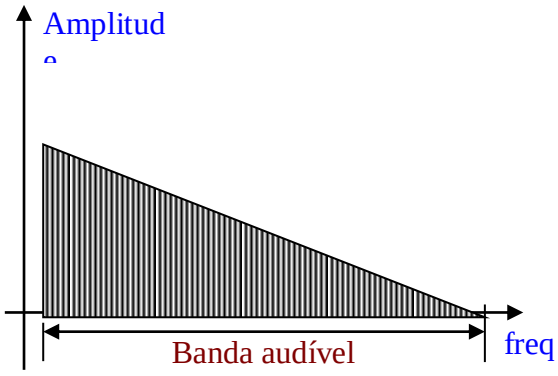


Espectro

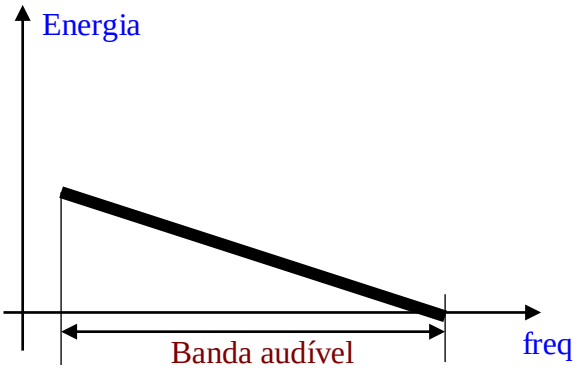


Densidade Espectral

• ***Ruído Rosa*** – É o ruído cuja densidade espectral de energia é constante para todas as freqüências.



Espectro



Densidade Espectral

Capítulo 3

Princípios do Som

1. - Princípio de Huygens-Fresnel

A propagação do som no ar se dá a partir da fonte geradora, em todas as direções. Por ser uma vibração longitudinal das moléculas do ar, esse movimento oscilatório é transmitido de molécula para molécula, até chegar aos nossos ouvidos, gerando a audição.

O **Princípio Huygens-Fresnel** se aplica a essa propagação: cada molécula de ar, ao vibrar, transmite para a vizinha a sua oscilação, se comportando como uma nova fonte sonora.

A seguir são discutidas as propriedades da propagação no ar.

2. - Propagação Livre

A propagação do som no ar se dá a partir da fonte geradora, com a formação de ondas esféricas. Essas ondas terão um *comprimento de onda l*, mostrado na Figura 2.1, e uma velocidade de propagação.

A **velocidade de propagação** do som depende da densidade e da pressão do ar e pode ser calculada pela equação :

$$V = \sqrt{1{,}4 . \frac{P}{D}}$$

onde P é a pressão atmosférica e D a densidade no SI. Se tomarmos P= 10^5 Pa e D=1,18 kg/m^3, obteremos a velocidade V= 344,44 m/s.

Devemos levar em consideração que a densidade do ar é bastante influenciada pelo vapor d'água (umidade). Porém, o fator que mais influi na velocidade do som é a temperatura.

De uma maneira aproximada, entre - 30 ºC e + 30 ºC, podemos calcular a velocidade do som no ar em função da temperatura, pela seguinte equação :

$$\mathbf{V = 331{,}4 + 0.607 \, . \, t}$$

onde a Velocidade V está em m/s e a temperatura t em º Celsius.

A Tabela 3.1 mostra a velocidade de propagação do som no ar em função da temperatura, supondo-se uma umidade relativa de 50 %. Para outros meios de propagação, o som tem velocidades diferentes, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.1. - Velocidade do som em função da temperatura

Graus Celsius	Velocidade do som (m/s)
- 20	319
- 10	326
0	332
10	338
20	344
30	355

Tabela 3.2. - Velocidade do som em outros meios

	MEIO	Velocidade do som (m/s)
Gases	Hidrogênio (0ºC)	1261
	Hidrogênio (15ºC)	1290
	Nitrogênio (0ºC)	377
	Nitrogênio (15ºC)	346
	Oxigênio (0ºC)	346
	Oxigênio (15ºC)	324
Líquidos	Água (20ºC)	1490
	Benzeno (20ºC)	1250
	Clorofórmio (20ºC)	960
	Etanol (20ºC)	1168
Sólidos	Aço (20ºC)	5000
	Alumínio (20ºC)	5040
	Chumbo (20ºC)	1200
	Cobre (20ºC)	3710
	Latão (20ºC)	3500
	Rochas	até 6000
	Vidro	5370

Outro fator importante na propagação do som é a **atenuação.** O som ao se propagar sofre uma diminuição na sua intensidade, causada por dois fatores:

↗ **Dispersão das ondas** : o som ao se propagar no ar livre (ondas esféricas) tem a sua área de propagação aumentada, em função do aumento da área da esfera. Como a energia sonora (energia de vibração das moléculas de ar) é a mesma, ocorre uma diluição dessa energia, causando uma atenuação na intensidade. A cada vez que dobramos a distância da fonte, a área da esfera aumenta 4 vezes, diminuindo a intensidade sonora em 4 vezes, ou 6 dB.

↗ **Perdas entrópicas** : Sempre que se aumenta a pressão de um gás, a sua temperatura aumenta; ao se expandir o gás, a temperatura diminui (Boyle). Numa onda sonora, onde acontecem sucessivas compressões e rarefações, ocorrem pequenos aumentos e diminuições na temperatura do ar. Pela 2ª Lei da Termodinâmica, sempre que se realiza uma transformação energética, acontece uma perda, ou seja, parte da energia se perde em forma de calor. É a

chamada perda entrópica. Sem a existência desta perda, seria possível o moto-contínuo. Assim, na propagação do som, parte da energia se transforma em calor, atenuação esta que depende da freqüência do som, da temperatura e da umidade relativa do ar (Tabela 3.3).

Tabela 3.3. – Perda Entrópica do Som (Norma ISO TC 43)

Freqüência média da oitava [Hz]	Temperatu-ra [ºC]	Perda entrópica em 100 metros de propagação do som [dB/100m]						
		Umidade relativa do ar [%]						
		40	50	60	70	80	90	100
63	0 - 30	0	0	0	0	0	0	0
125	0 - 30	0	0	0	0	0	0	0
250	0 - 30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
500	0 – 15	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
	15 – 30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1000	0	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2
	5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
	10	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
	15	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
	20	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	25	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2000	0	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0
	5	2,0	1,6	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7
	10	1,5	1,2	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
	15	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
	20	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3
	25	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
	30	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
4000	0	7,4	6,8	6,0	5,3	4,6	4,1	3,7
	5	7,1	6,3	5,3	4,6	4,0	3,6	3,3
	10	6,9	5,4	4,6	3,9	3,4	3,1	2,8
	15	5,6	4,4	3,6	3,0	2,6	2,3	2,1
	20	3,2	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,2
	25	2,5	2,0	1,6	1,3	1,2	1,1	0,9
	30	2,0	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8
8000	0	14	15,5	16	15	14,5	14	13
	5	17,5	17	15	14	12,5	11,5	10,5
	10	17,5	15	13	11	9,8	8,8	7,9
	15	15	12,5	10,5	8,9	7,5	6,6	6,0
	20	12	9,8	8,1	6,8	5,8	5,2	4,6
	25	9,5	7,8	6,5	5,3	4,6	4,1	3,7
	30	7,5	6,0	5,0	4,3	3,8	3,3	3,0

Devemos sempre lembrar que :

A ***Atenuação*** do som na propagação :

⇦ **é diretamente proporcional à freqüência**, ou seja, o som agudo "morre" em poucos metros, enquanto que o som grave se pode ouvir a quilômetros de distância.

⇦ **é inversamente proporcional à temperatura.**

⇦ **é inversamente proporcional à umidade.**

⇦ a poluição do ar, principalmente o **monóxido e dióxido de Carbono,** são muito absorventes, atenuando bastante o som.

⇦ **não sofre influência da pressão atmosférica.**

A ***Velocidade do Som*** na propagação :

⇦ **é diretamente proporcional à temperatura.**

⇦ **é diretamente proporcional à umidade.**

⇦ **não sofre influência da pressão atmosférica.**

⇦ **não varia com a freqüência.**

Portanto, na propagação, o ar oferecendo maior resistência à transmissão de altas freqüências, causa uma distorção no espectro de freqüências. Por isso que, nos sons produzidos a grandes distâncias, nós ouvimos com maior nível os sons graves, ou seja, os sons agudos são atenuados na propagação.

3. - Propagação com obstáculos

Quando interpomos uma superfície no avanço de uma onda sonora, esta se divide em várias partes: uma quantidade é refletida, a outra é absorvida e outra atravessa a superfície (transmitida). A figura 3.1 nos dá o exemplo dessas quantidades.

A quantidade S_i representa o som incidente; S_r o som refletido; S_d o som absorvido pela parede (e tranformado em calor) e S_t o som transmitido.

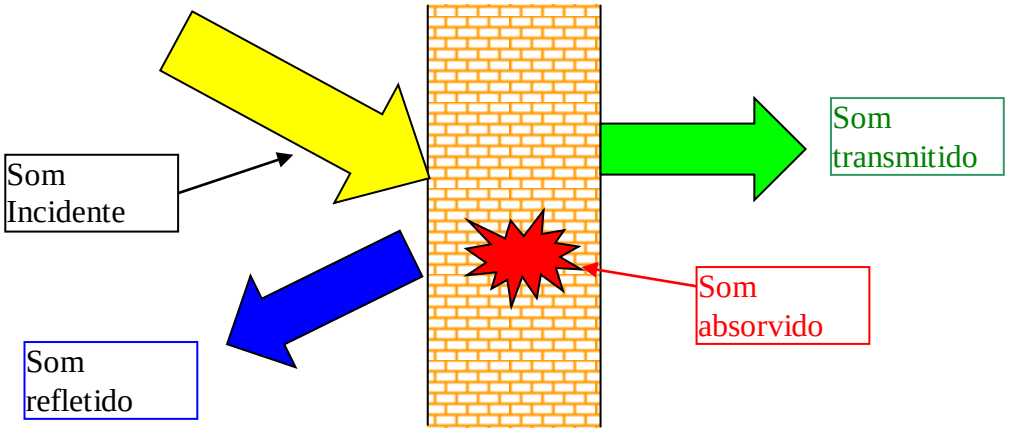


Figura 3.1 - Esquema da divisão do som ao encontrar um obstáculo

Podemos definir os seguintes coeficientes:

COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ← a

$$a = \frac{\text{ENERGIA ABSORVIDA}}{\text{ENERGIA INCIDENTE}}$$

COEFICIENTE DE REFLEXÃO ← r

$$r = \frac{\text{ENERGIA REFLETIDA}}{\text{ENERGIA INCIDENTE}}$$

COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO ← t

$$t = \frac{\text{ENERGIA TRANSMITIDA}}{\text{ENERGIA INCIDENTE}}$$

3.1. - Reflexão

Se uma onda sonora que se propaga no ar encontra uma superfície sólida como obstáculo a sua propagação, esta é refletida, segundo as leis da Reflexão Ótica. A reflexão em uma superfície é diretamente proporcional à dureza do material. Paredes de concreto, mármore, azulejos, vidro, etc. refletem quase 100 % do som incidente.

Um ambiente que contenha paredes com muita reflexão sonora, sem um projeto acústico aprimorado, terá uma péssima inteligibilidade da linguagem. É o que acontece, geralmente, com grandes igrejas, salões de clubes, etc.

3.2. - Absorção

Absorção é a propriedade de alguns materiais em não permitir que o som seja refletido por uma superfície.

IMPORTANTE : Som absorvido por uma superfície é a quantidade som dissipado (transformado em calor) mais a quantidade de som transmitido.

Os materiais absorventes acústicos são de grande importância no tratamento de ambientes. A Norma Brasileira NB 101 especifica os procedimentos para o tratamento acústico de ambientes fechados. A dissipação da energia sonora por materiais absorventes depende fundamentalmente da freqüência do som : normalmente é grande para altas freqüências, caindo para valores muito pequenos para baixas freqüências. A figura 3.2 mostra a absorção do som em um material.

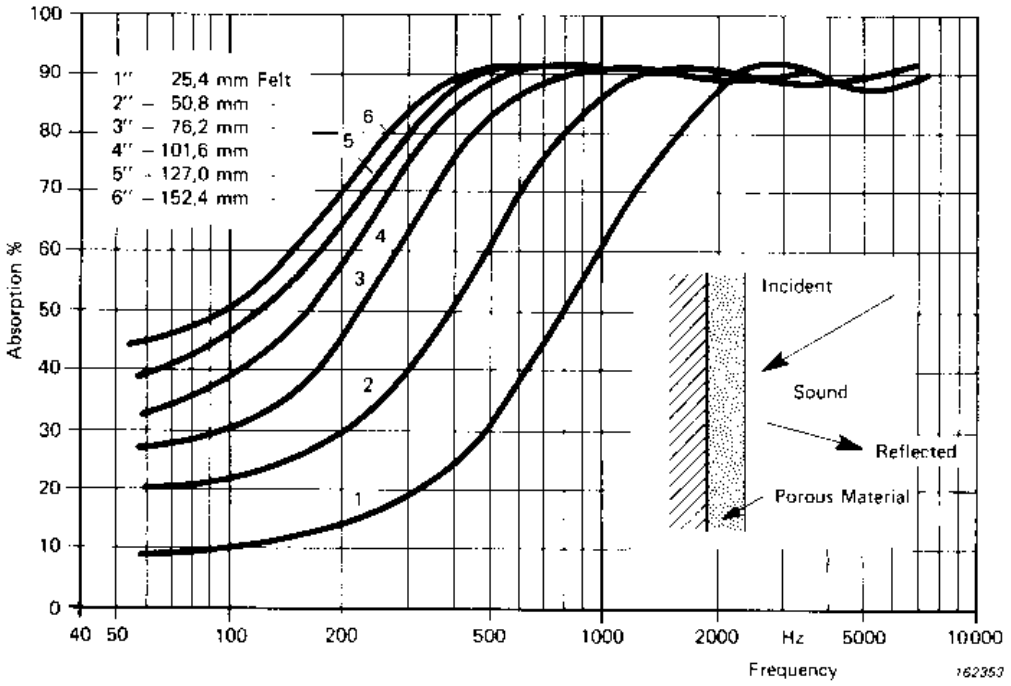


Fig. 3.2 - Absorção em função da freqüência para um material poroso

A tabela 3.4 mostra o Coeficiente de absorção "a" para alguns materiais.

Tabela 3.4 – Coeficientes de absorção

Material	Espessura **[cm]**	**Freqüência [Hz]**					
		125	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**
Lã de rocha	10	0,42	0,66	0,73	0,74	0,76	0,79
Lã de vidro solta	10	0,29	0,55	0,64	0,75	0,80	0,85
Feltro	1,2	0.02	0,55	0,64	0,75	0,80	0,85
Piso de tábuas de madeira sobre vigas		0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Placas de cortiça sobre concreto	0,5	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Carpete tipo forração	0,5	0,10		0,25		0,4	
Tapete de lã	1,5	0,20	0,25	0,35	0,40	0,50	0,75
Concreto aparente		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Parede de alvenaria, não pintada		0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Vidro		0,18	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02
Cortina de algodão com muitas dobras		0,07	0,31	0,49	0,81	0,61	0,54

3.3. - Transmissão

Transmissão é a propriedade sonora que permite que o som passe de um lado para outro de um superfície, continuando sua propagação. Fisicamente, o fenômeno tem as seguintes características : a onda sonora ao atingir uma superfície, faz com que ela vibre, transformando-a em uma fonte sonora. Assim, a superfície vibrante passa a gerar som em sua outra face. Portanto, quanto mais rígida e densa (pesada) for a superfície menor será a energia transmitida.

A tabela 3.5 mostra a atenuação na transmissão causada por vários materiais.

Tabela 3.5 - Atenuação na transmissão de som

Material	Espessura (cm)	Atenuação (dB)
Vidro	0,4 a 0,5	28
Vidro	0,7 a 0,8	31
Chapa de Ferro	0,2	30
Concreto	5	31
Concreto	10	44
Gesso	5	42
Gesso	10	45
Tijolo	6	45
Tijolo	12	49
Tijolo	25	54
Tijolo	38	57

4. - Difração

Pelo princípio de Huygens-Fresnel, podemos entender que, o som é capaz de rodear obstáculos ou propagar-se por todo um ambiente, através de uma abertura. A essa propriedade é dado o nome de **difração**. Os sons graves (baixa freqüência) atendem melhor esse princípio.

A figura 3.3 nos mostra como um som de grande comprimento de onda (som grave) contorna um obstáculo. A figura 3.4 mostra um som de pequeno comprimento de onda (alta freqüência) gerando regiões de sombra acústica ao contornar obstáculos. Podemos observar que a difração do som em um obstáculo depende do valor relativo entre o tamanho H do obstáculo e o comprimento de onda l do som. O mesmo ocorre com o avanço do som através de um orifício: quando o comprimento de onda do som é muito menor que o comprimento H do obstáculo ou furo, existirá sombra acústica "S".

Cabe lembrar, portanto, que os sons graves (sons de baixa freqüência e de grande comprimento de onda) tem maior facilidade em propagar-se no ar, como também maior capacidade de contornar obstáculos.

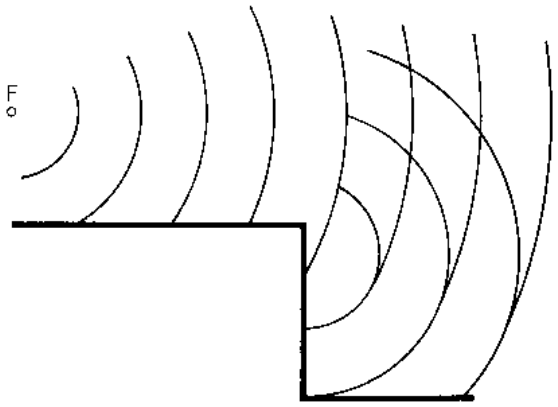


Figura 3.3 - Som de baixa freqüência (grave) contornando um obstáculo.

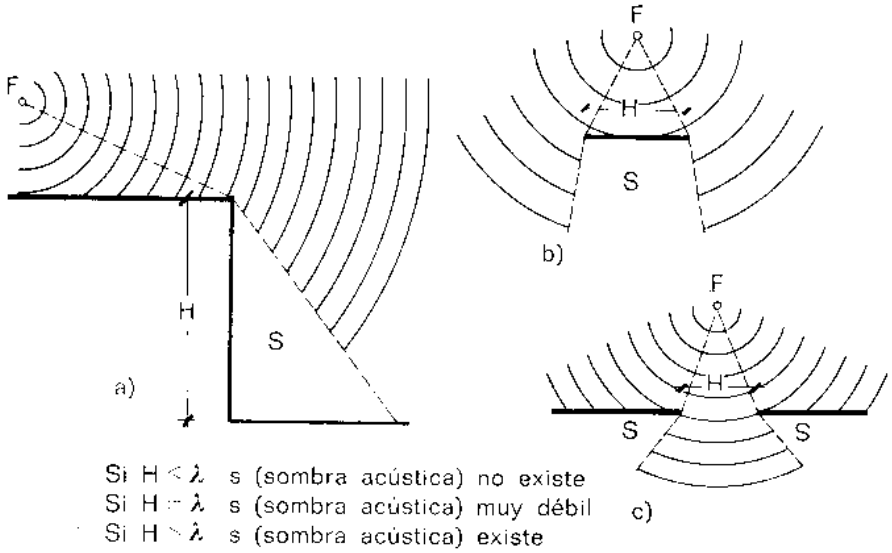


Figura 3.4 - Difração de um som agudo.

5 - Reverberação e Tempo de Reverberação.

Quando um som é gerado dentro de um ambiente escuta-se primeiramente o som direto e, em seguida, o som refletido. No caso em que essas sensações se sobrepõem, confundindo o som direto e o refletido, teremos a impressão de uma audição mais prolongada. A esse fenômeno se dá o nome de reverberação.

Define-se como tempo de reverberação o tempo necessário para que, depois de cessada a fonte, a intensidade do som se reduza de 60 dB. Se as paredes do local forem muito absorventes (pouco reflexivas), o tempo de reverberação será muito pequeno, caso contrário ocorrerão muitas reflexões e o tempo de reverberação será grande.

6. - Eco

O eco é uma conseqüência imediata da reflexão sonora. Define-se **eco** como ***a repetição de um som que chega ao ouvido por reflexão 1/15 de segundo ou mais depois do som direto.*** Considerando-se a velocidade do som em 345 m/s, o objeto que causa essa reflexão no som deve estar a uma distância de 23 m ou mais.

7. - Refração

Recebe o nome de **refração** a mudança de direção que sofre uma onda sonora quando passa de um meio de propagação para outro. Essa alteração de direção é causada pela variação da velocidade de propagação que sofre a onda. O principal fator que causa a refração do som é a mudança da temperatura do ar.

8. - Ressonância

Ressonância é a coincidência de freqüências entre estados de vibração de dois ou mais corpos. Sabemos que todo corpo capaz de vibrar, sempre o faz em sua freqüência natural. Quando temos um corpo vibrando na freqüência natural de um segundo corpo, o primeiro induz o segundo a vibrar. Dizemos então que eles estão em **ressonância**. Por exemplo : se tomarmos um diapasão com freqüência natural de 440 Hz e o colocarmos sobre um piano, ao tocarmos a nota **Lá$_4$** (que vibra com 440 Hz), o diapasão passará a vibrar induzido pela vibração da corda do piano.

9. - Mascaramento

Na audição simultânea de dois sons de freqüências distintas, pode ocorrer que o som de maior intensidade supere o de menor, tornando-o inaudível ou não inteligível. Dizemos então que houve um **mascaramento** do som de maior intensidade sobre o de menor intensidade. O efeito do mascaramento se torna maior quando a os sons têm freqüências próximas.

10. - Ondas Estacionárias

É um fenômeno que ocorre em recintos fechados. Consiste na superposição de duas ondas de igual freqüência que se propagam em sentindo oposto. Ao se sobreporem, a coincidência dos comprimentos de onda faz com que os nós e os ventres ocupem alternadamente as mesmas posições, produzindo a impressão de uma **onda estacionária.** Em locais fechados, o som refletido em uma parede plana e o som direto podem criar esse efeito, causando graves problemas acústicos para o ambiente.

11. - Eco pulsatório (Flutter Echo)

É um caso particular das ondas estacionárias. Ocorre quando existe a sobreposição de ondas refletidas cujos caminhos percorridos se diferenciem de um número inteiro de comprimentos de onda. Neste caso, haverá momentos de intensificação do som pelas coincidências das fases, e outros com a anulação do som pela defasagem da onda. Para uma pessoa, esses aumentos e diminuições na intensidade sonora produzirá a mesma sensação de um eco.

12. - Efeito Doppler-Fizeau

Quando a fonte ou o observador se movem (com velocidade menor que a do som) é observada uma diferença entre a freqüência do som emitido e recebido. Esse característica que é conhecida como **Efeito Doppler-Fizeau,** torna o som mais agudo quando as fontes se aproximam, e mais grave no caso de se afastarem.

◆ ◆ ◆

Capítulo 4

O Ouvido Humano e a Audição

Neste capítulo faremos um estudo sobre o ouvido humano, a fisiologia da audição e a sensibilidade do nosso sistema auditivo.

1. – Conceitos básicos sobre a anatomia do ouvido humano

O ouvido é o órgão coletor dos estímulos externos, transformando as vibrações sonoras em impulsos sonoros para o cérebro. É, sem dúvida, a estrutura mecânica mais sensível do corpo humano pois detecta quantidades mínimas de energia.

Para fins de estudo, o ouvido é dividido em três partes: ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno.

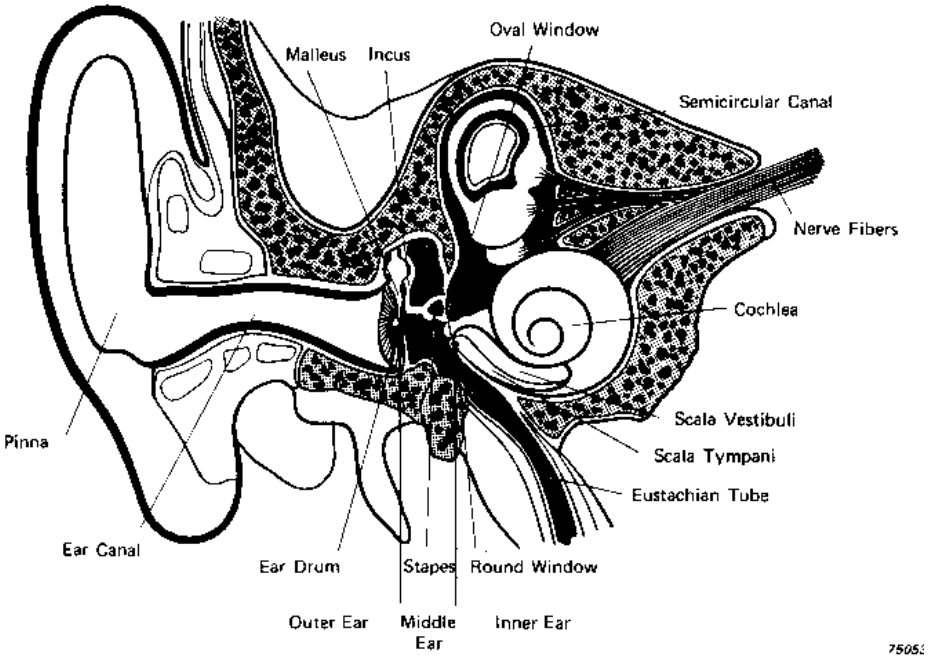


Figura 4.1. - Partes do ouvido.

O ouvido externo compõe-se do pavilhão auditivo (orelha), do canal auditivo e do tímpano. A função da orelha é a de uma corneta acústica, capaz de dar um acoplamento de impedâncias entre o espaço exterior e o canal auditivo, possibilitando uma melhor transferência de energia. Essa corneta, tendo uma certa característica diretiva, ajuda a localização da fonte sonora. As paredes do canal auditivo são formadas de ossos e cartilagens. Em média, o canal tem 25 mm de comprimento, 7 mm de diâmetro e cerca de 1 cm^3 de volume total. O tímpano (membrana timpânica) é oblíquo e fecha o fundo do canal auditivo. Tem a forma aproximada de

um cone com diâmetro da base de 10 mm. É formado de uma membrana de 0,05 mm de espessura e superfície de 85 mm^2. Deve ficar claro, que o tímpano assemelha-se a um cone rígido sustentado em sua periferia por um anel de grande elasticidade, que lhe permite oscilar como uma unidade, sem sair do seu eixo.

Logo depois do tímpano temos o ouvido médio: uma cavidade cheia de ar conhecida também como cavidade do tímpano, cujo volume é da ordem de 1,5 cm^3 e que contém 3 ossículos: o **martelo** (23 g), a **bigorna** (27 g) e o **estribo (**2,5 g). A função de tais ossículos é, através de uma alavanca, acoplar mecanicamente o tímpano à cóclea (caracol), triplicando a pressão do tímpano. Na parte interna da cavidade do tímpano, existem as janelas oval e redonda, que são as aberturas do caracol. As áreas de tais janela são da ordem de 3,2 e 2 mm^2 respectivamente. A janela redonda é fechada por uma membrana e a oval é fechada pelo "pé" do estribo (fig. 4.2).

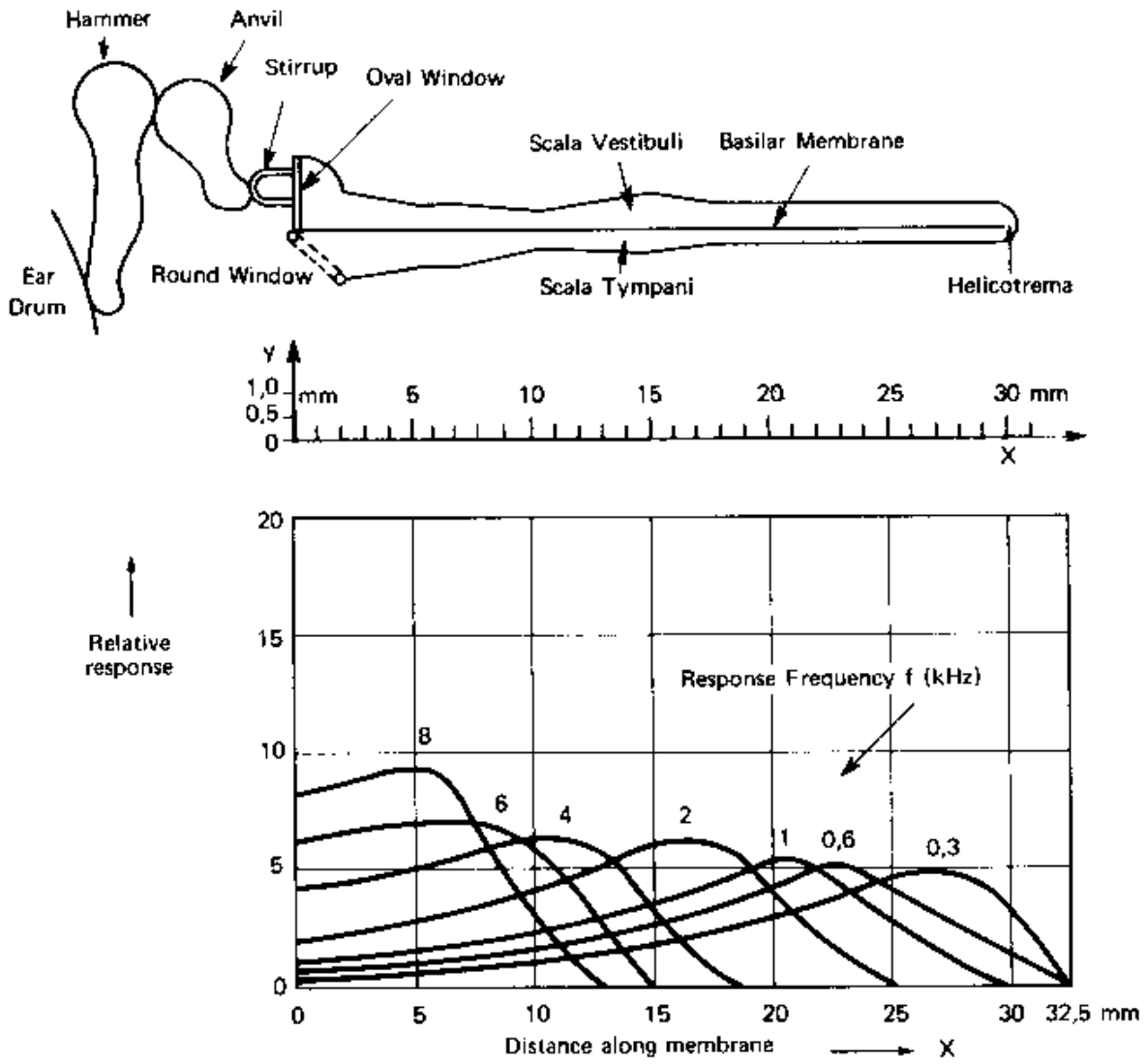


Figura 4.2 – Esquema da transmissão do som até o ouvido interno.

A cadeia ossicular do ouvido médio é mostrada na Figura 4.3.

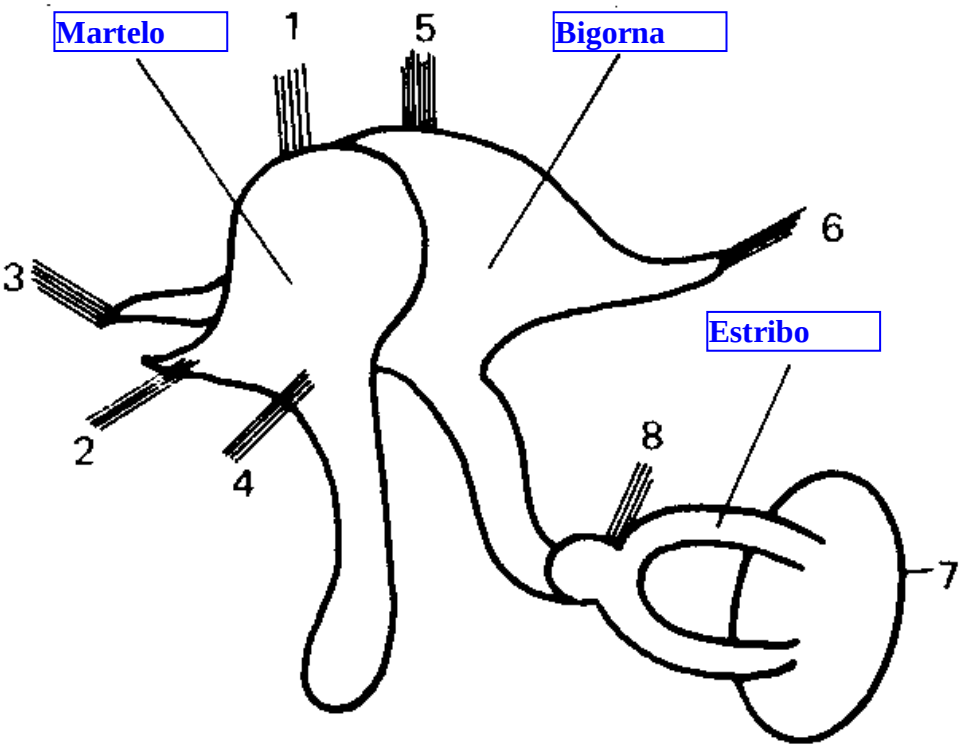


Figura 4.3. - Cadeia ossicular

Na Figura 4.3 é possível visualizar o ***martelo*** com o ligamento superior (1), ligamento anterior (2), ligamento lateral (3) e músculo tensor do tímpano (4); a ***bigorna*** com seu ligamento superior (5) e ligamento posterior (6); e o ***estribo*** com o ligamento anular (7) e o músculo estapédio (8). O músculo estapédio tem uma importante função na proteção da audição contra os altos níveis de ruído.

O ouvido interno inicia-se pela janela oval, seguindo um canal semicircular que conduz ao caracol (**cóclea)** que tem um comprimento de 30 a 35 mm e é dividido longitudinalmente em duas galerias, pela membrana basilar. O caracol tem aspecto de um caramujo de jardim e mede cerca de 5 mm do ápice à base, com uma parte mais larga de aproximadamente 9 mm. Pode-se dizer que o caracol consiste de um canal duplo enrolado por 2,5 voltas em torno de um eixo ósseo. A janela oval fecha o compartimento superior e transmite suas vibrações para a membrana basilar através da endolinfa, líquido viscoso que preenche esse conduto. O comprimento da membrana basilar é de 32 mm; tem cerca de 0,1 mm de espessura próxima à janela oval e 0,5 mm na outra extremidade. A janela redonda é uma membrana circular, muito elástica, que fecha a parte superior do canal e, mediante as suas contrações, compensa as variações de pressão produzidas pelas oscilações da membrana basilar.

Sobre a membrana basilar estão distribuídas as células acústicas (Órgão de Corti), em número de 18 mil (externas e internas), de onde saem os nervos que formam o nervo acústico e levam o sinal elétrico até o cérebro (fig. 4.4).

A membrana basilar atua como um filtro seletivo ou analisador de freqüências, em que a percepção de cada freqüência se realiza em um determinado ponto da membrana: as altas freqüências excitam a parte próxima da membrana oval e, à medida que se caminha para dentro do caracol, a freqüência diminui.

O som sendo decomposto em sua freqüência fundamental e suas harmônicas, é possível para nós distinguir o timbre dos sons, realizando uma verdadeira análise espectral.

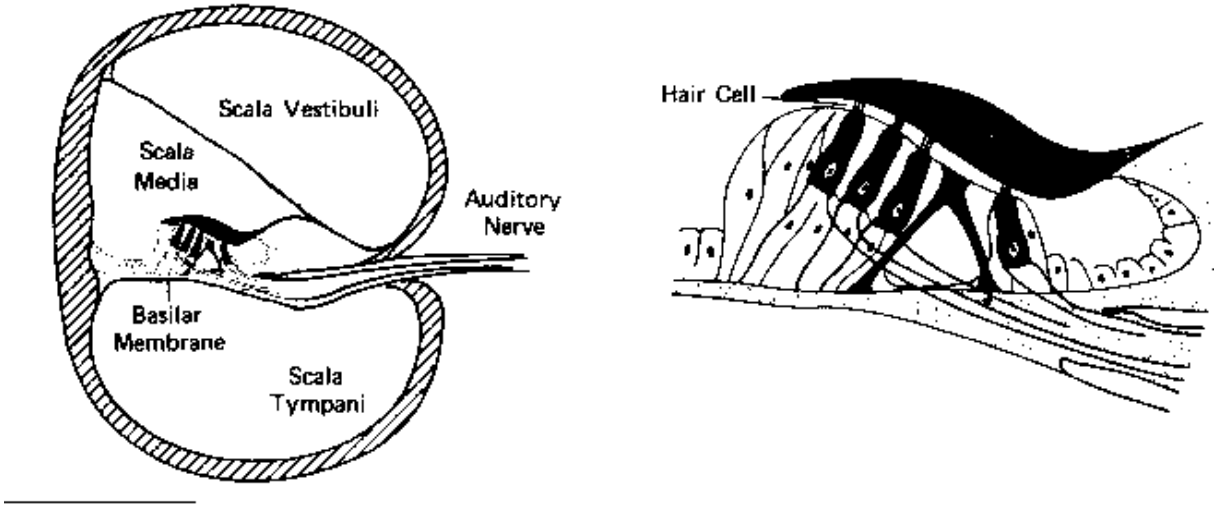


Figura 4.4 - Seção da membrana basilar.

2. - Fisiologia da audição

2.1. – Audição Via Aérea

O processo fundamental da audição é a transformação do som em impulsos elétricos ao cérebro. Esse processo passa pelas seguintes etapas:

☆ As ondas sonoras chegam até o pavilhão auditivo e são conduzidas ao canal auditivo (meato acústico externo). Além de conduzir o som ao canal auditivo, o pavilhão auditivo também ajuda na localização da fonte sonora.

As ondas sonoras percorrem o canal auditivo e incidem sobre o tímpano (membrana timpânica), fazendo-o vibrar com a mesma freqüência e amplitude da energia do som. As ondas sonoras (pressão) são transformadas em vibração.

A vibração do tímpano é transmitida para o cabo do martelo que faz movimentar toda a cadeia ossicular.

A vibração do martelo é transmitida para a bigorna e para o estribo, através de um sistema de alavancas que aumentam em 3 vezes a força do movimento, diminuindo em 3 vezes a amplitude da vibração.

A vibração da platina do estribo é transmitida sobre a janela oval, que está em contato com o líquido do ouvido interno. A vibração é transformada em ondas de pressão no líquido. Como a relação entre as áreas do tímpano e da janela oval é de 14:1, ocorre uma nova amplificação do som pela redução da área.

A vibração no líquido da cóclea é, portanto, uma onda sonora (longitudinal), semelhante à onda sonora que chegou ao pavilhão auditivo, com a mesma freqüência, com a amplitude reduzida de 42 vezes (3 X 14) e a pressão aumentada de 42 vezes.

As ondas sonoras se propagando nos líquidos do ouvido interno provoca a vibração da membrana basilar e do Órgão de Corti. A vibração chega até as células ciliadas, fazendo com que seus cílios oscilem saindo de sua posição de repouso.

A oscilação dos cílios (na mesma freqüência da onda sonora original) causa uma mudança na carga elétrica endocelular, provocando um disparo de um impulso elétrico para as fibras nervosas que é conduzido para o nervo acústico e para o cérebro.

A indicação de qual célula ciliada irá responder ao estimulo vibratório depende da freqüência do som: para sons agudos o deslocamento da membrana basilar é maior na região basal (próxima à janela oval) estimulando as células desta região; se o som é grave, o movimento maior da membrana basilar será na região apical (Figura 4.2).

Um importante mecanismo de proteção ocorre no ouvido médio. Quando o estímulo sonoro atinge níveis acima de 70 - 80 dB o processo de proteção é ativado, estimulando a contração do músculo estapédio (através do nervo facial), que faz alterar a forma de vibração do estribo sobre a janela oval. A platina do estribo passa a vibrar paralelamente à membrana da janela oval, impedindo a transmissão da vibração e inclusões muito pronunciadas que poderiam romper esta membrana (Figura 4.5)

.

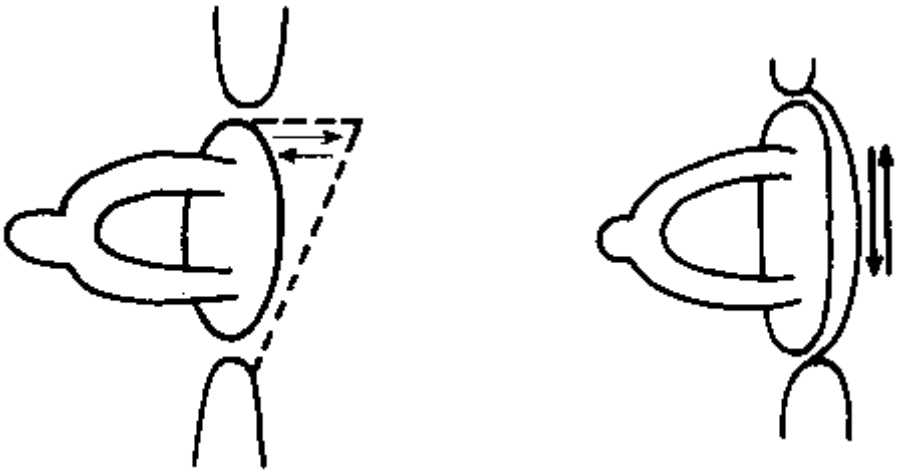


Figura 4.5. Formas de movimento do estribo: para sons normais e para sons acima de 70 – 80 dB

2.2. – Audição Via Óssea

As vibrações da energia sonora podem chegar ao ouvido interno (cóclea) através dos ossos do corpo humano, principalmente da caixa craniana. Um exemplo disto é o barulho que escutamos quando mastigamos ou coçamos a cabeça.

A audição por via óssea acontece quando as ondas sonoras chegam até os ossos da cabeça, fazendo-os vibrar; esta vibração é conduzida pelos ossos até os ossículos do ouvido médio e diretamente até a cóclea, provocando ondas nos líquidos internos e provocando a sensação da audição. A audição por via aérea é muito mais sensível que por via óssea; como exemplo, se nós eliminássemos a audição aérea de uma pessoa, ela escutaria um nível sonoro com, aproximadamente, 60 dB de atenuação (redução de 10^6 ou 1.000.000 de vezes).

Estudos demonstram que os ossos do crânio vibram de forma diferente para diversas bandas de freqüência. Para sons graves, próximos a 200 Hz, o crânio vibra como um corpo rígido. Para freqüências em torno de 800 Hz a caixa craniana se deforma na direção anterior-posterior, e para 1500 Hz a deformação é lateral. Outro mecanismo importante na audição por via óssea é a vibração que chega ao ouvido através da mandíbula, que é ligada diretamente no osso temporal.

Capítulo 5

Psicoacústica

A Psicoacústica estuda as sensações auditivas para estímulos sonoros. Trata dos limiares auditivos, limiares de dor, percepção da intensidade de da freqüência do som, mascaramento, e os efeitos da audição binaural (localização das fontes, efeito estéreo, surround etc.).

1. – Lei de Weber-Fechner

A Lei de Weber-Fechner faz uma relação entre a intensidade física de uma excitação e a intensidade subjetiva da sensação de uma pessoa. Vale para qualquer percepção sensorial, seja auditiva, visual, térmica, tátil, gustativa ou olfativa. De um modo geral, a Lei de Weber-Fechner pode ser enunciada:

***Enunciado Geral*: O aumento do estímulo, necessário para produzir o incremento mínimo de sensação, é proporcional ao estímulo preexistente.**

$$S = k \cdot \Delta I / I \quad \text{ou}$$

$$S = k \cdot \log I$$

Onde S é a sensação, I a intensidade do estímulo e k uma constante.

Aplicando-se para a acústica, o enunciado fica:

Para sons de mesma freqüência, a intensidade da sensação sonora cresce proporcionalmente ao logaritmo da intensidade física.

Ou ainda:

Sons de freqüência constante, cujas intensidades físicas variam em progressão geométrica, produzem sensações cujas intensidades subjetivas variam em progressão aritmética.

2. - Audibilidade (loudness)

Audibilidade é o estudo de como nosso ouvido recebe e interpreta as flutuações da pressão sonora associadas à variações de freqüência. Esse estudo, logicamente, deve ser estatístico pois, dentro da espécie humana, existe a diversidade individual. Assim, várias pesquisas foram realizadas para determinar a sensibilidade média da audição de pessoas normais (pesquisa da NIOSH – USA em 1935/36; pesquisa durante as Feiras Mundiais de Los Angeles e Nova Iorque, em 1939/40 com 500 mil pessoas; 15 pesquisas da ISO em 1964). Os resultados dessas pesquisas e outras realizadas, constituem fundamento para o estudo de qualquer sistema de análise do ouvido.

Para determinarmos a menor intensidade percebida pelo ouvido humano, vamos fazer a seguinte experiência: coloquemos um observador à distância de um metro de um alto-falante e de frente para este. Façamos o alto-falante vibrar com 1 kHz em intensidade perfeitamente audível e, vamos atenuando o som até que o observador declare não mais estar ouvindo. Substituímos então, o observador por um microfone calibrado para medir a intensidade do som: esta intensidade será o limiar de audição para 1 kHz, que corresponde a 10^{-16} Watts/cm^{2,} ou 0 dB.

Se repetirmos a experiência para outras freqüências, vamos determinar o limiar de audibilidade. A maior sensibilidade do ouvido, se dá entre 2000 e 5000 Hz, há uma perda de sensibilidade nos dois extremos da banda de freqüência audível. Para 50 Hz, essa perda chega a 60 dB.

A figura 5.1 mostra a curva média do **limiar de audibilidade**.

Para determinar o limiar de dor, vamos repetir a experiência, só que iremos aumentando o nível de intensidade sonora do som até que o nosso observador sinta uma sensação dolorosa acompanhando a audição. Isso deve ocorrer, para 1 kHz, em 120 dB e é chamado de limiar da dor. Repetindo-se a experiência para outras freqüências teremos a curva do **limiar da dor**.

O conjunto de sons audíveis é dado pela área compreendida entre o limiar de audibilidade e o limiar da dor: é o nosso **campo de audibilidade** (figura 5.2).

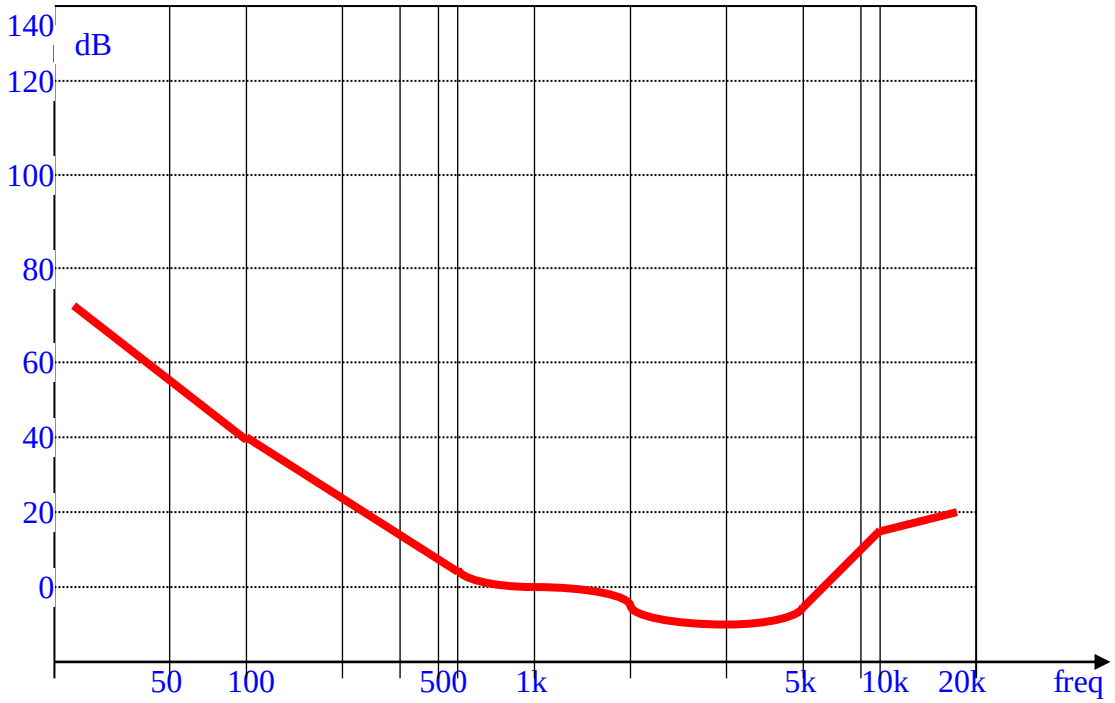
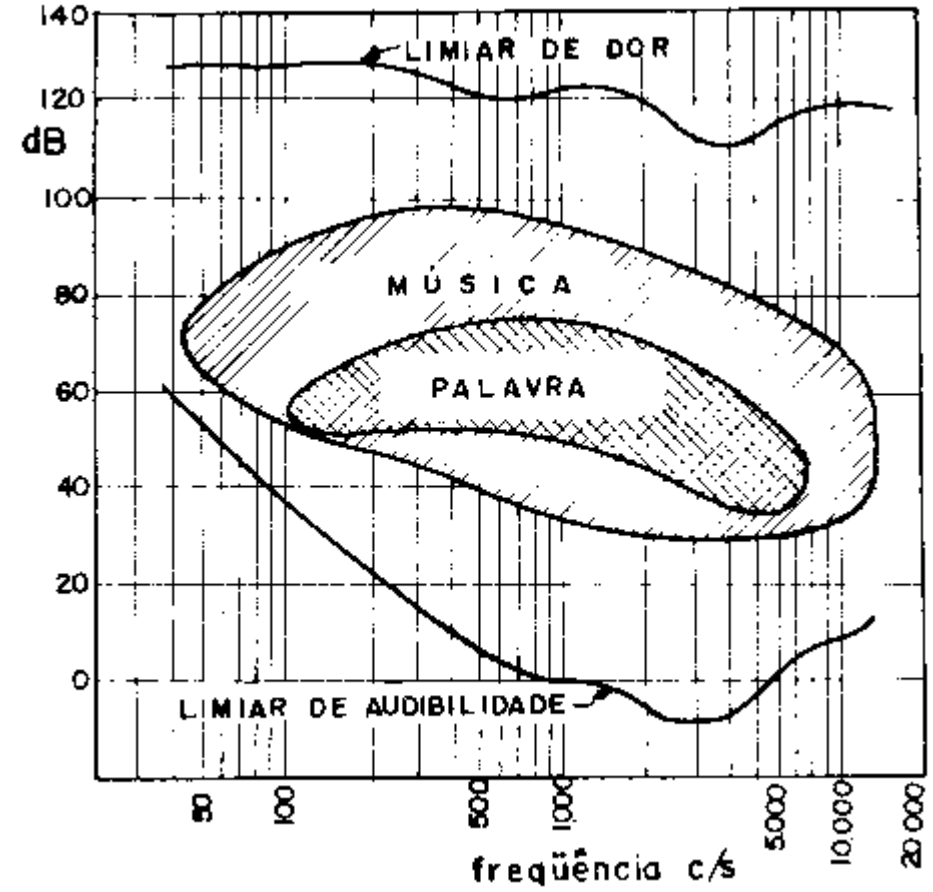


Figura 5.1 – Os limiares de audibilidade



Vamos continuar com a nossa experiência: suponhamos agora que ao nosso observador é oferecido um som de freqüência 1000 Hz, com 10 dB de NIS **(nível de intensidade sonora).** Também lhe é oferecido um som de freqüência f, sobre o qual o observador tem o controle de intensidade. Pede-se ao observador que varie o atenuador do som da freqüência f até que este soe com a mesma audibilidade do primeiro (1 kHz e 10 dB). Repetindo a experiência para diversas freqüências teremos a curva de igual intensidade psicológica (igual nível de audibilidade), ou seja, os valores do NIS em função da freqüência para sons que para nós soam com igual intensidade. Repetindo a medida para 1 kHz e com NIS de 20, 30, 40 dB, vamos obter as curvas da figura 5.3. Essas curvas são denominadas **curvas de Fletcher e Munson.**

Estas curvas nos dizem, por exemplo, que um som de 50 dB de NIS em 1 kHz tem o mesmo nível de audibilidade de um som de 70 dB de NIS e 80 Hz. É usual dar o nome de **FON** à unidade de nível de audibilidade.

As curvas de audibilidade (curvas loudness), são muito importantes no estudo de acústica. Por exemplo: nos aparelhos de som nós podemos utilizar a tecla "loudness" que nos dá um aumento dos sons graves e agudos, proporcional às curvas, para que todas as freqüências sejam igualmente ouvidas. Nos decibelímetros (aparelhos medidores do nível de intensidade sonora) as medições são feitas levando-se em consideração a sensibilidade do ouvido: o aparelho mede o NIS da mesma maneira que o ouvido percebe o som, equalizando de acordo com as curvas loudness.

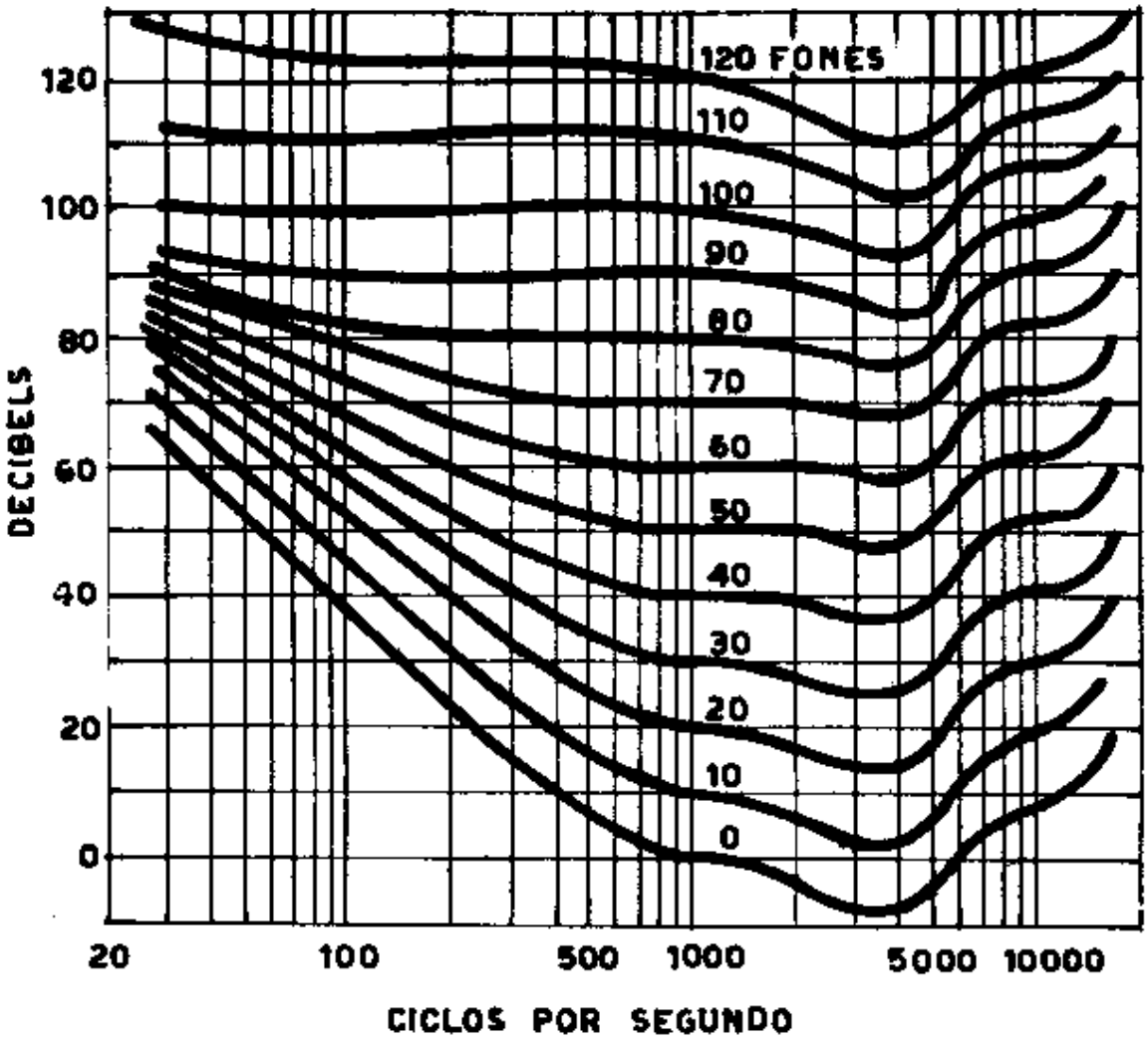


Figura 5.3 - Curvas de audibilidade.

3. - Audição Binaural

3.1 – Localização da fonte sonora

Uma das características principais da audição humana é o sentimento da direção da propagação das ondas do som. Por causa da localização física das orelhas na cabeça humana, cada orelha recebe sinais diferentes: ocorrem alterações na intensidade e no tempo de chegada do som entre cada orelha. O sistema nervoso central registra cada sinal recebido, estabelecendo a direção da onda sonora.

A Figura 5.4 ilustra, num plano horizontal, como uma onda sonora atinge os dois ouvidos de uma pessoa. Como a onda chega de uma posição lateral, inclinada (α) em relação à frente da pessoa, a onda sonora atinge primeiro o ouvido esquerdo (e com mais intensidade) e depois o ouvido direito (com menor intensidade), pois o ouvido direito está Δl mais distante que o direito.

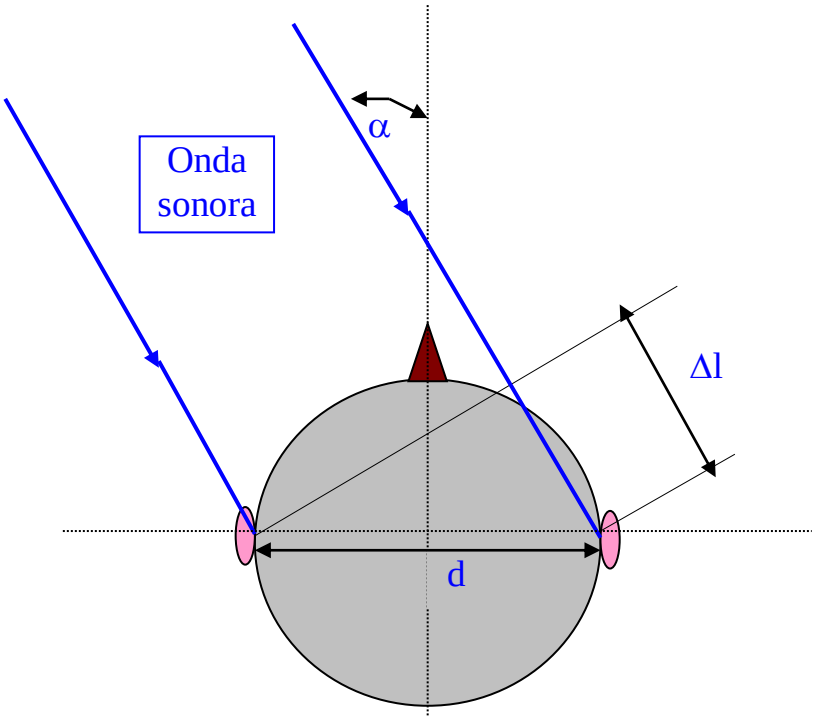


Figura 5.4 – Onda sonora atingindo a cabeça de uma pessoa.

Se chamarmos de 'd' a distância entre as orelhas (≅ 21 cm), podemos escrever:

$$\Delta l = d \,.\, \text{sen}\, \alpha.$$

Considerando a velocidade do som de 344 m/s, a Tabela 5.1 apresenta os valores de Δl e o tempo de atraso do som (Δt) para diferentes valores do ângulo α.

Tabela 5.1 – Valores da diferença da distância entre os ouvidos e do tempo de atraso do som para valores de α (velocidade do som de 344 m/s e distância entre ouvidos de 21 cm)

Ângulo α (graus)	Δl (cm)	Δt (ms)
0	0	0
10	3,64	0,106
20	7,18	0,208
30	10,5	0,305
45	14,8	0,431
60	18,2	0,528
90	21,0	0,610

Quanto à freqüência do som, quando o comprimento da onda tem valores múltiplos da distância Δl a localização fica mais difícil. Para sons graves (por terem grandes comprimentos de onda) existe maior dificuldade em identificar a direção da onda sonora. Sons de impacto (pulsos rápidos como o tique-taque de um relógio ou o som de palmas) são mais facilmente

localizados com uma margem de erro de 2º a 3º; sons mais longos o erro pode chegar a 10º ou 15 º.

Quando a fonte de som está localizada atrás do ouvinte, a sensação da intensidade é um pouco reduzida (em relação a uma posição simétrica na frente do ouvinte) e a localização da fonte se torna mais difícil. Para freqüências acima de 3 kHz a localização se torna bastante precisa. localizada " atrás de " a ouvinte, cria o mesmo tempo praticamente e intensidade diferencia na frente como a fonte de som simétrica do ouvinte que faz localizando a fonte sã mais difícil.

3.2 – Ângulo de máxima intensidade

Se fizermos uma fonte sonora girar ao redor de uma pessoa, no plano horizontal, o ponto de maior intensidade se dará para o ângulo α da Figura 5.4 igual a 79º. A Figura 5.5 ilustra a situação de máxima intensidade.

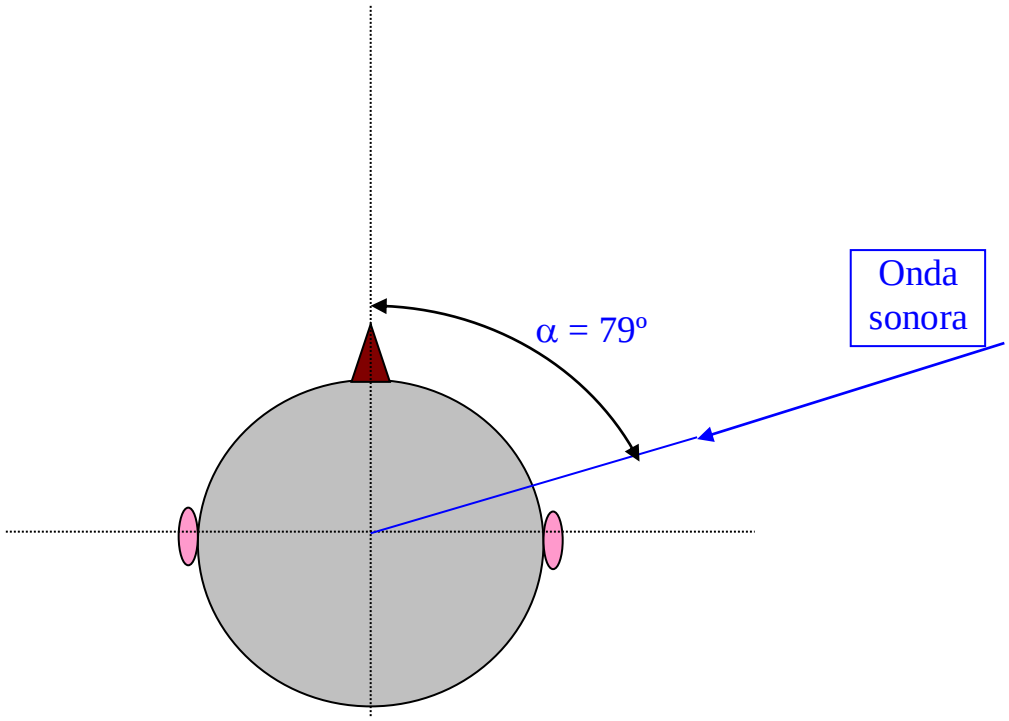


Figura 5.5 – Ângulo da onda sonora de maior intensidade.

3.3 – Efeitos estéreo e surround

A audição binaural permitiu que fossem criados efeitos psicoacústicos na reprodução de músicas gravadas. O efeito estéreo (dois canais independentes de som) e surround (5 canais), hoje comuns em sistemas de reprodução sonora residenciais e em cinemas, usam os princípios da física acústica para dar a sensação espacial ao som.

O efeito estéreo usa duas fontes (direita e esquerda) localizadas à frente do ouvinte, dando a impressão que todos os instrumentos musicais estão distribuídos a sua frente.

O sistema surround usa cinco fontes, sendo três principais à frente do ouvinte (centro, direita e esquerda) e duas auxiliares atrás do ouvinte (direita e esquerda). O efeito surround possibilita dar movimento ao som, sendo importante nos filmes de ação.

3.4 – Efeitos no plano vertical

Em razão da posição dos ouvidos, a localização de fontes sonoras no plano vertical é bastante mais difícil que no plano horizontal. Isto porque não existem diferenças nas intensidades nem no tempo de chegada do som nos ouvidos. A percepção da localização acontece em função das condições acústicas do ambiente (reflexões, difrações, etc.). Vários estudos mostram que as pessoas têm dificuldades na localização de sons dispostos com mais de 45º nas direções de propagação. A Figura 5.6 mostra estes dados.

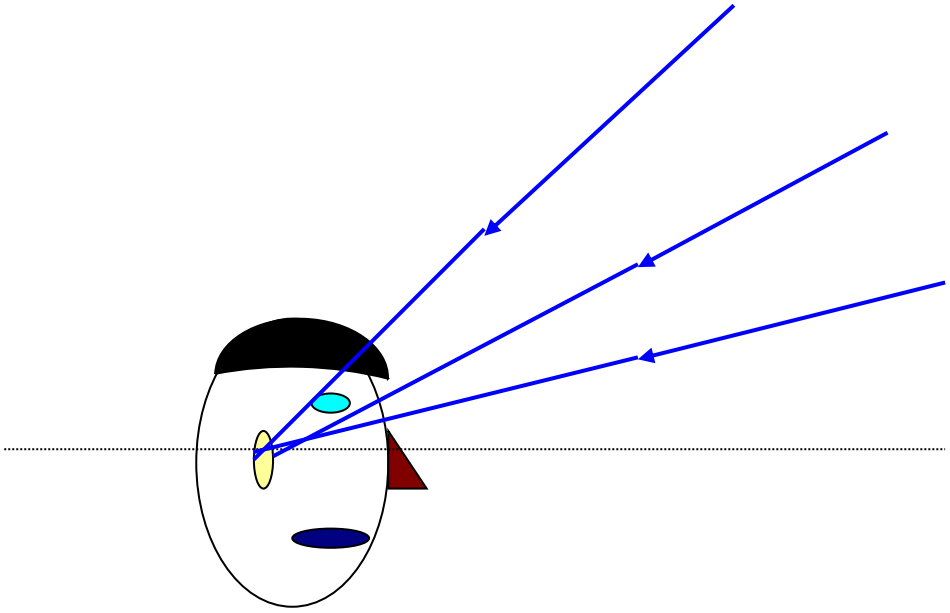


Figura 5.6 – Pessoa recebendo várias ondas sonoras no plano vertical.

◆ ◆ ◆