



Universidade do Minho
Escola de Ciências

I - Som e Acústica

António Mário Almeida

Departamento de Física

Universidade do Minho

Sumário

1. Definições
 1. Som, acústica e ondas
 2. Classificação e propriedades das ondas
 3. Fenómenos ondulatórios
 4. Ondas estacionárias
2. **Velocidade do som**
3. **Intensidade do som**
4. Refração do som
5. Cavidades ressonantes

Velocidade de propagação do som

- Física (adaptado de “Acústica Musical”, L. Henrique. Fund. Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002)

Considere-se um determinado meio onde se propaga uma perturbação (foi gerada uma onda).

A onda originada leva algum tempo até atingir outros pontos no meio considerado.

A velocidade de propagação depende das características do meio, nomeadamente da elasticidade e da densidade. No caso do som, estas características dependem ainda da pressão, da temperatura e da humidade do ar, entre outros fatores.

Em geral, a velocidade de propagação de uma onda mecânica através de um meio, é uma expressão da forma

$$v_{\text{propagação da onda}} = \sqrt{\frac{\text{coeficiente de elasticidade do meio}}{\text{coeficiente de inércia do meio}}}$$

Velocidade de propagação do som

Velocidade de propagação do som em diversos meios materiais

$$\text{Velocidade da onda} = \sqrt{\frac{\text{Coeficiente de elasticidade do meio}}{\text{Coeficiente de inércia do meio}}}$$

TABELA 4.2 - Velocidade de propagação do som

(Valores adaptados de Kutz, 1986)

Meio	Velocidade (ms ⁻¹)	Meio	Velocidade (ms ⁻¹)
GASES		SÓLIDOS	
Ar (0°C)	331	Aço	5050
Ar (20°C)	343	Alumínio	5240
Azoto (0°C)	334	Chumbo	1250
Dióxido de carbono (0°C)	259	Cobre	3580
Hélio	965	Ferro	5170
Hidrogénio (0°C)	1280	Granito	3950
LÍQUIDOS		Latão	3420
Água (17°C)	1430	Madeira (carvalho)	4100
Água do mar (17°C)	1510	Ouro	2030
Álcool etílico (20°C)	1170	Prata	2640
Benzeno (20°C)	1320	Prata alemã	3580
Glicerina	1920	Vidro (quartzo)	5370
Mercurio (20°C)	1450		

Velocidade de propagação do som

10.1.1 The Speed and Properties of Sound Waves

Sound waves move at a speed v_s that is determined by the properties of the medium. In general the sound speed is

$$v_s = \sqrt{\frac{C}{\rho}}, \quad (10.1)$$

where C is a constant describing the stiffness of the material (when there is no heat flow, which are “adiabatic” conditions) and ρ is the mass density.

Num gás $C = \gamma P$, em que γ é a razão entre os calores específicos a pressão constante (c_p) e a volume constante (c_v). Para o ar $c_p / c_v = 1.4$

Velocidade de propagação do som

$$v_s = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{m}}, \quad (10.2)$$

where R is the constant in the ideal gas law (7.2) ($R = 8.31 \text{ J/mol-K}$), and m is the molecular mass. The speed of sound in air is 343 m/s (at 20°C), which is $15\times$ slower than that in steel, while in water it is $1,482 \text{ m/s}$ (see Problems 10.4 and 10.5).

Para o caso do ar seco: $\gamma = 1.4$; $R = 8.314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$; $m = 2.88 \times 10^{-2}(\text{Kg mol}^{-1})$;
Assim, e para temperaturas em torno da temperatura ambiente, podemos usar a expressão:

$$v_{som} = 20.1 \sqrt{T}$$

sendo T a temperatura absoluta (em K).

Velocidade de propagação

- Definição: $v_{\text{propagação da onda}} = \lambda f = \lambda/T$
- O que acontece a uma onda quando atinge uma interface entre dois meios físicos de características diferentes?
 - Reflexão
 - Transmissão
 - Refração
 - Constância da frequência
 - Continuidade da função e da sua derivada

Reflexão

(adaptado de “*Vibrations and waves*”, B. Crowell,
www.lightandmatter.com)

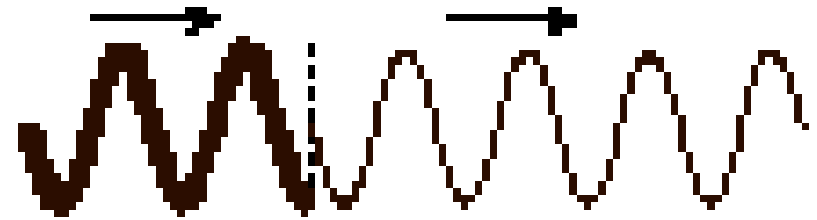
- Por que acontece a reflexão?

Considere-se uma onda sinusoidal viajando ao longo de uma corda. Se a onda vai de uma corda mais densa para outra menos densa, vai haver alteração da velocidade de propagação.

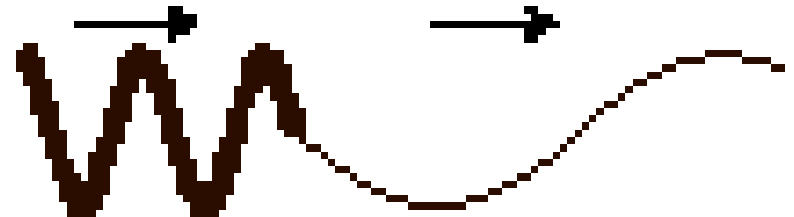
Como $v = \lambda f$, a passagem de uma corda para outra vai implicar alteração na frequência, ou no comprimento de onda, ou em ambos.

Se houver alteração da frequência, a onda que incide na fronteira das duas cordas vai ficar desfasada em relação à onda transmitida, o que se traduzirá numa descontinuidade da onda (a), situação física que corresponderia à rutura das cordas.

Então deverá ocorrer a alteração do comprimento de onda (b).



(a) A change in frequency without a change in wavelength would produce a discontinuity in the wave.



(b) A simple change in wavelength without a reflection would result in a sharp kink in the wave.

Reflexão

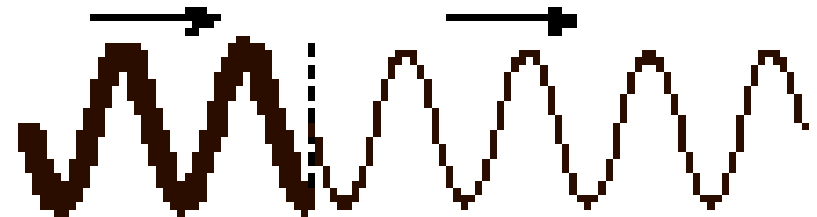
Mas a situação ilustrada em (b) não é uma situação fisicamente viável.

Embora seja preservada a continuidade da onda na fronteira entre as duas cordas, teremos aí uma aresta permanente.

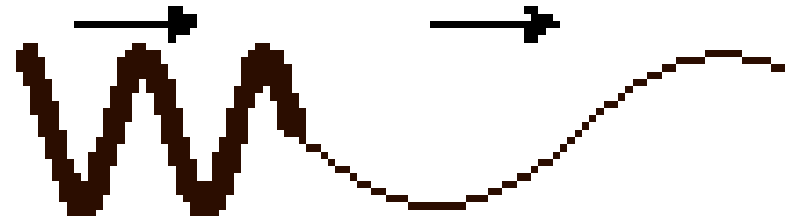
De um forma geral, se um meio é perturbado, vai haver uma reação no sentido de contrariar a perturbação ocorrida e restaurar o estado do meio: uma porção da corda deslocada da sua posição de equilíbrio vai ser deformada adquirindo uma curvatura passando a estar sujeita a uma aceleração que a restituirá à posição de equilíbrio. A curvatura da corda deformada e a aceleração são proporcionais.

Uma aresta corresponde a uma curvatura infinita, logo, um ponto com uma aresta permanente estará sujeito a uma aceleração infinita, o que é impossível.

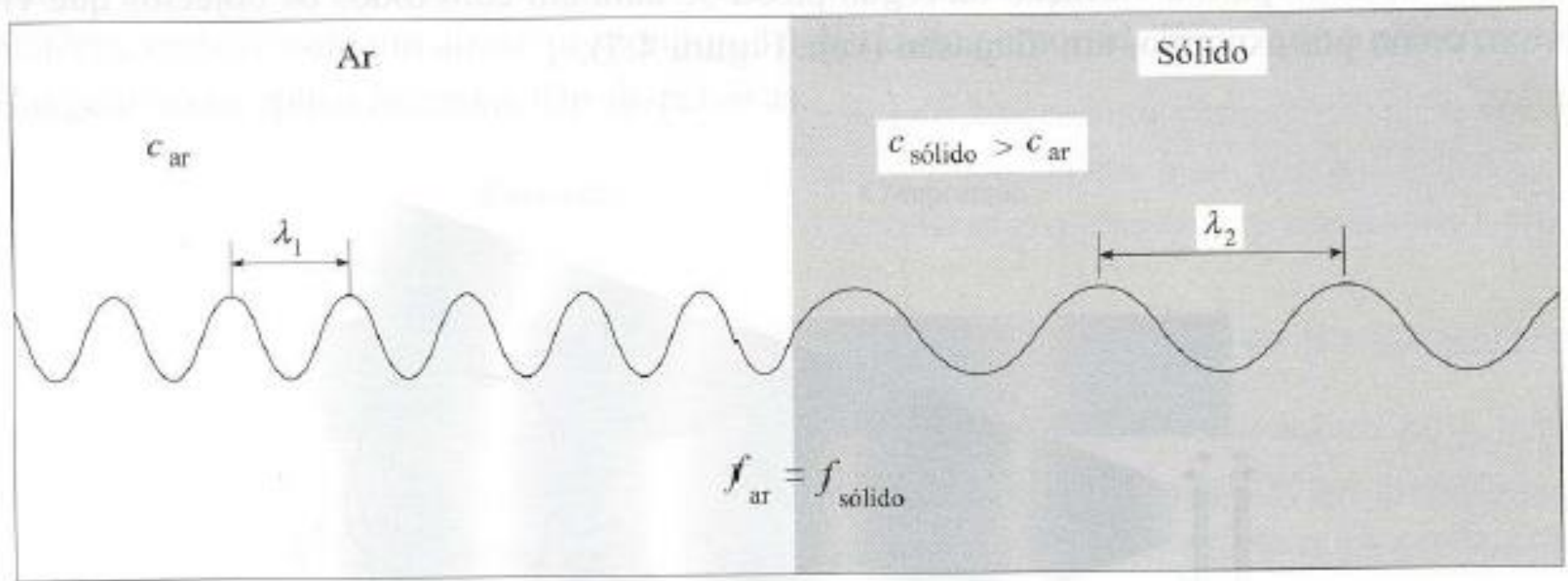
A forma como fisicamente se elimina a aresta será pela reflexão de uma parte da onda incidente, tal que a sobreposição da onda incidente com a onda refletida vai fazer com que na fronteira haja continuidade da onda e da sua derivada.



(a) A change in frequency without a change in wavelength would produce a discontinuity in the wave.



(b) A simple change in wavelength without a reflection would result in a sharp kink in the wave.



Propagação de ondas longitudinais num fluido

(adaptado de “Física”, Sears e Zemansky)

- Fluido – substância que pode fluir ou escoar-se com maior ou menor facilidade; não tem forma própria, adotando a do recipiente que o contém.
- Dois tipos de fluidos: líquidos e gases. A diferença entre eles é essencialmente a compressibilidade.

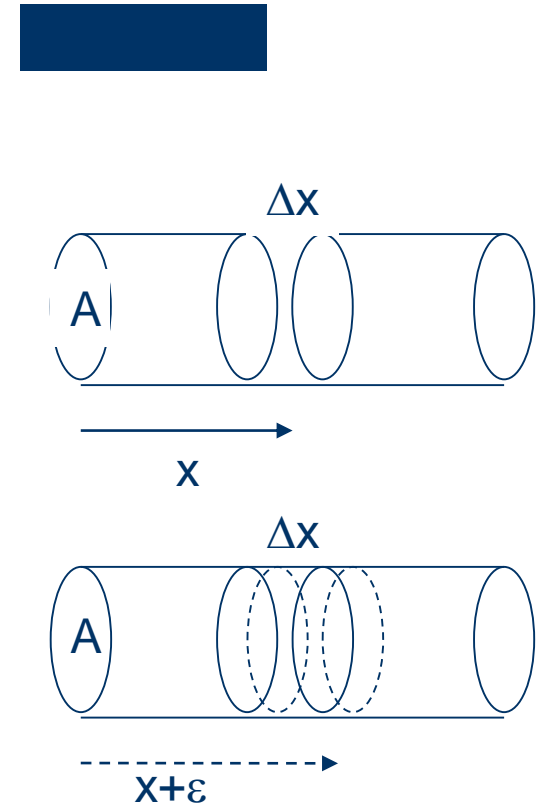
- Coeficiente de compressibilidade:
$$K = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P}$$
- V é o volume ocupado pelo fluido e P é a pressão a que está sujeito.
- Pressão - força aplicada por unidade de área: $P=|F|/A$ [N/m²] ou [Pa]
- $K \sim 10^{-10}$ Pa⁻¹ para líquidos
- $K \sim 10^{-5}$ Pa⁻¹ para gases

Propagação de ondas longitudinais num fluido

- Considere-se volume de fluido cilíndrico cuja base tem área A .
- Considere-se, nesse volume, um elemento de volume com coordenada x e com comprimento elementar Δx .
- Sendo aplicada uma pressão (força por unidade de área) variável no tempo, esse elemento de volume deslocar-se-á ε em relação à posição de equilíbrio. Se a variação for sinusoidal estar-se-á a produzir uma onda de pressão sinusoidal que se irá propagar ao longo do fluido.
- Assim, teremos:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos(kx - \omega t)$$

em que ε é o afastamento do elemento de volume da sua posição de equilíbrio, representando $k=2\pi/\lambda$ o coeficiente de elasticidade do fluido e ω a frequência angular.



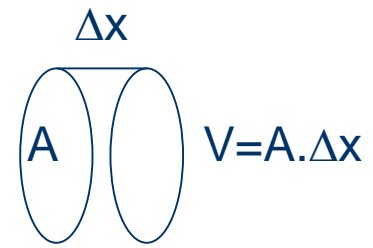
Propagação de ondas longitudinais num fluido

- A variação de pressão comunicada ao fluido será

$$\Delta P = -K^{-1} \cdot \Delta V/V$$

em que K é o coeficiente de compressibilidade.

- Podemos relacionar a variação de pressão com o deslocamento. O volume de uma porção de fluido de espessura Δx é $A\Delta x$ e vai variar $A\Delta \epsilon$ quando a espessura varia $\Delta \epsilon$.



Propagação de ondas longitudinais num fluido

$$K = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

$$A\Delta x \rightarrow A(\Delta x + \Delta \varepsilon): \Delta V = A\Delta \varepsilon$$

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\Delta P = -\frac{1}{K} \frac{\Delta V}{V} = -\frac{1}{K} \frac{(A\Delta \varepsilon)}{(A\Delta x)} \equiv -\frac{1}{K} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = -k\varepsilon_m \sin(kx - \omega t)$$

$$\Delta P = \frac{k}{K} \varepsilon_m \sin(kx - \omega t)$$

A comparação entre as expressões para ΔP e ε mostra que deslocamento e pressão estão desfasados de 90° .

Para um gás, $k = \rho v^2$, em que ρ é a densidade do gás (kg/m^3) e v a velocidade de propagação do som.

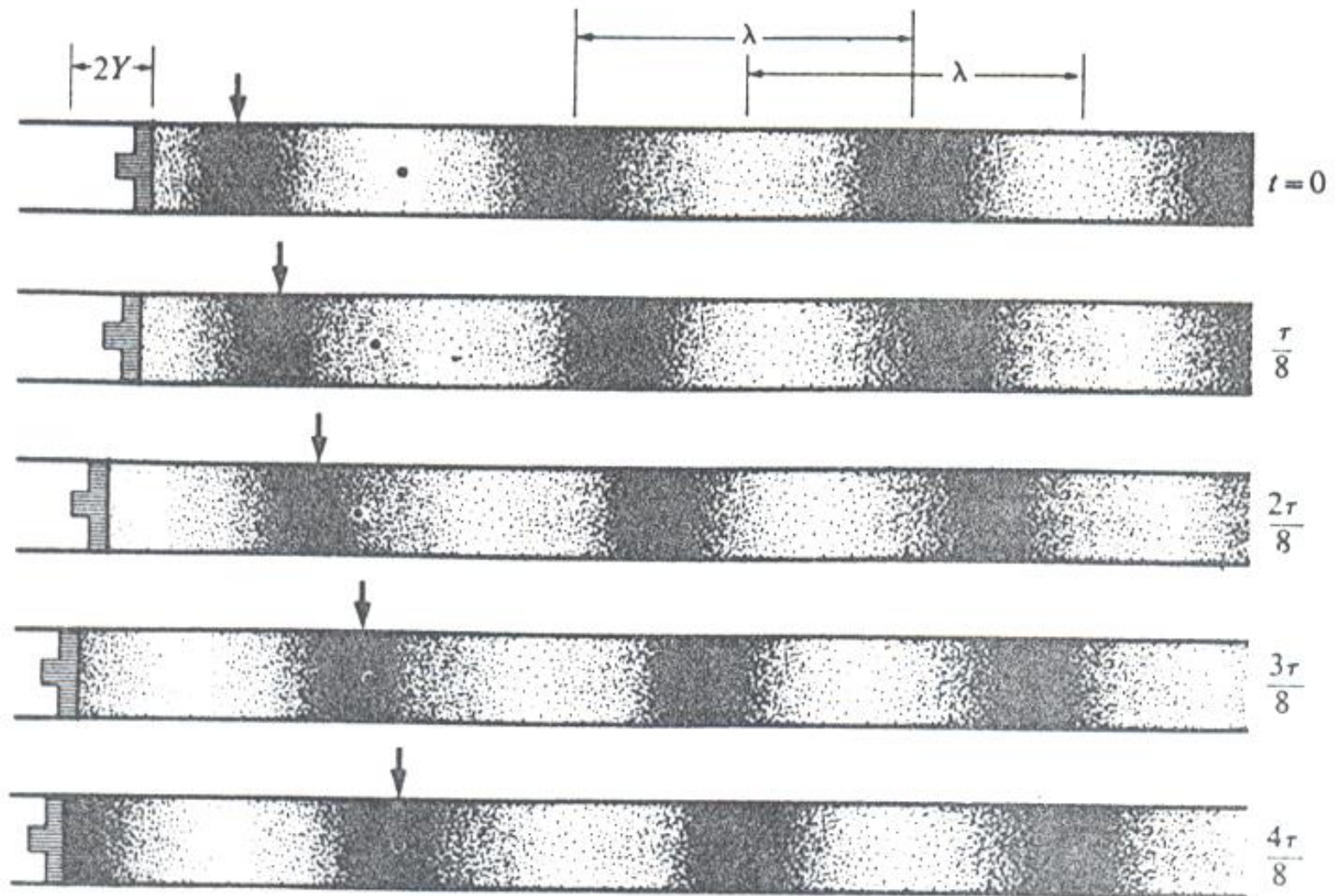


FIG. 21-2.—Representación, a intervalos de $1/8$ de período, de una onda sinusoidal longitudinal que se propaga hacia la derecha.

Ondas sonoras no ar

- Variação de pressão

$$\Delta P = \frac{k}{K} \varepsilon_m \text{sen}(kx - \omega t) = \Delta P_{\text{max}} \text{sen}(kx - \omega t)$$

A quantidade $k\varepsilon_m/K$ é designada por amplitude de pressão

- Para ondas sonoras, o valor máximo admissível para um ouvinte corresponde a $\Delta P \approx 28 \text{ Pa}$, ou seja, as moléculas do ar vibram com uma amplitude $\varepsilon_m \approx 1.1 \times 10^{-5} \text{ m}$ (limiar da dor).
- O valor audível mais baixo é de $2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \rightarrow \varepsilon_m \approx 10^{-11} \text{ m}$.
- $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

(ver “Physics for scientists and engineers”, R. Serway, ed. Saunders College Publishing, 4ª edição, p. 484)

Intensidade sonora

Escala decibel

Como quantificar um fenómeno acústico?

A amplitude de deslocamento, como se viu, é muito pequena. A medição directa da amplitude da velocidade das partículas (átomos e moléculas) do ar quando se propaga um som não é fácil.

Pode então medir-se a amplitude de pressão ΔP_{max} , referida à pressão atmosférica.

A energia transportada por um som é proporcional ao quadrado da amplitude de pressão.

Intensidade sonora

Escala decibel

Porque

- a percepção subjectiva dos sons não é proporcional à intensidade dos mesmos;
- a gama das frequências audíveis (entre 20 Hz e 20 kHz) percorre três ordens de grandeza;
- é usada uma escala logarítmica para registar a intensidade dos sons: a escala decibel (dB).

A intensidade sentida por um ouvinte é também designada por intensidade sonora ou “loudness”

Intensidade sonora

Escala decibel

Se se pretende quantificar um som através do nível de pressão sonora, usa-se

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

em que p corresponde à amplitude de pressão ΔP_{\max} e p_0 representa uma amplitude de pressão de referência ($p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$). Uma formulação equivalente, recorrendo ao nível de intensidade física será:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

sendo I e I_0 a intensidade do som ouvido e de referência, respetivamente ($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$). Note-se que a equivalência decorre do facto da energia ser proporcional a $(\Delta P_{\max})^2$.

Registe-se ainda que um aumento da intensidade sonora de 10 dB corresponde a um aumento da intensidade física do som em 10 vezes.

Intensidade sonora

Escala decibel

<u>Alguns valores de intensidades</u>	<u>L_i (dB)</u>
Sussurro audível	20
Casa sossegada	30-40
Conversa normal	60
Aspirador (a 3m)	70
Tráfego intenso	80
Cortador de relva	90
Grupo de rock	100-130
Martelo pneumático	110
Avião a jato	130

Os valores de referência ($p_0=2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ e $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$) vão permitir obter um diagrama comparativo de intensidades para as várias frequências em relação à frequência de 1000 Hz.

Foram realizados testes com milhares de pessoas (Fletcher e Munson, 1933) usando dois geradores de som sinusoidais: um deles emitindo um som de 1 kHz com a intensidade de 60 dB, por exemplo. [...] o outro gerador emite um som de frequência diferente, 100 Hz. A pessoa que faz o teste pode regular a intensidade deste som até que lhe pareça igual à do primeiro. A experiência repete-se para muitas frequências de 16 a 20 kHz. Em seguida modifica-se a intensidade do som de 1000 Hz e repete-se o procedimento anterior.

Cada um dos conjuntos de valores obtidos originará uma nova curva. Todos os pontos sobre a mesma curva representam sons que produzem a mesma sensação de intensidade, por isso se dizem linhas isófonas. Assim nasce a nova escala que quantifica a sensação de intensidade em níveis – a escala de fones – cuja gama de variação é aproximadamente de 0 a 120.

Por definição, para a frequência de 1000 Hz a escala de fones coincide com escala em decibéis.

Perceção do som

Diagrama de Fletcher

