

# ACÚSTICA PARA ENGENHEIROS

**ROGÉRIO GONDIM COSTA**

**ANTONIO DE PADUA LIMA FERNANDES**

**BRUNO RODRIGUES LIMA**

**CARLA MARIA MONTANARI GONCALVES**

**EDMAR MENDES DE PAULA**

**GISELLE ALINE DOS SANTOS GONÇALVES**

**ÍTALO COLINS ALVES**

**RAQUEL KENYA FERREIRA GONCALVES DE OLIVEIRA**



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Selma Alice Ferreira Ellwein – CRB 9/1558

C87a Costa, Rogério Gondim, et al.

Acústica Mecânica. / Rogério Gondim Costa, Antonio de Padua Lima Fernandes, Bruno Rodrigues Lima, Carla Maria Montanari Goncalves, Edmar Mendes de Paula, Giselle Aline dos Santos Gonçalves, Ítalo Colins Alves, Raquel Kenya Ferreira Goncalves de Oliveira. – Londrina: Editora Científica, 2023.

ISBN 978-65-00-66302-0

1. Ondas Sonoras. 2. Potência. 3. Ensino Superior. I. Autores. II. Título.

CDD 620

Editora  
Científica



## SUMÁRIO

Unidade 1 – Conceitos de acústica.....	04
Acústica na engenharia .....	04
Conceitos de acústica.....	06
Ondas sonoras.....	07
Impedância, intensidade e potência sonora.....	15
Grandezas sonoras.....	17
Unidade 2 – Percepção do som.....	19
Mecanismo de audição e processamento do som.....	19
Sensação subjetiva do som.....	20
Efeitos do ruído.....	23
Conforto acústico.....	24
Unidade 3 – Controle de ruído.....	25
Referências .....	31

## UNIDADE 1 – CONCEITOS DE ACÚSTICA

### 1.1. A ACÚSTICA NA ENGENHARIA

A engenharia acústica é um ramo da engenharia que lida com o estudo do som, vibrações e seus efeitos sobre as estruturas e os seres humanos. Os engenheiros aplicam os princípios da física, matemática e engenharia para analisar, projetar e controlar o som e a vibração em uma ampla gama de aplicações.

O conhecimento da acústica pelo engenheiro permite sua atuação em: controle de ruído industrial, conforto acústico, ruído no meio ambiente, áudio e processamento de sinais, aeroacústica, acústica subaquática, acústica arquitetônica, bioacústica, acústica musical, psicoacústica, ultrassom, vibração e dinâmica, dentre outras.

O engenheiro concentra-se na investigação e no entendimento dos mecanismos de produção, transmissão e recepção do som, assim como no desenvolvimento de estratégias para o seu controle e manipulação. Algumas áreas de atuação estão descritas abaixo:

- Acústica arquitetônica: Os engenheiros projetam e analisam as propriedades acústicas de edifícios, salas de concertos, teatros e outros espaços para garantir que a qualidade sonora seja otimizada para utilização adequada.
- Acústica ambiental: Os engenheiros estudam os efeitos do ruído sobre o meio ambiente, incluindo a poluição sonora proveniente do transporte, da indústria e de outras fontes.
- Controle de ruídos: Os engenheiros projetam e implementam medidas de controle de ruído para reduzir o impacto do ruído sobre as pessoas e o meio ambiente.
- Acústica automotiva: Os engenheiros trabalham no projeto e desenvolvimento de sistemas de som e medidas para redução de ruído de automóveis e veículos.

O estudo da Acústica é, portanto, desenvolvido por pessoas dedicadas a todas estas áreas do conhecimento. A maior parte dos projetos é multidisciplinar e para se conseguir uma maior chance de sucesso deve englobar elementos e especialistas de diversas áreas.

Para o desenvolvimento do trabalho do engenheiro, ferramentas tais como equipamentos e softwares especializados para medir e analisar o som e a vibração são utilizados.

*Figura 1 – Exemplo de equipamentos para medição de ruído*



**Fonte: [www.acsoft.co.uk](http://www.acsoft.co.uk) (2023).**

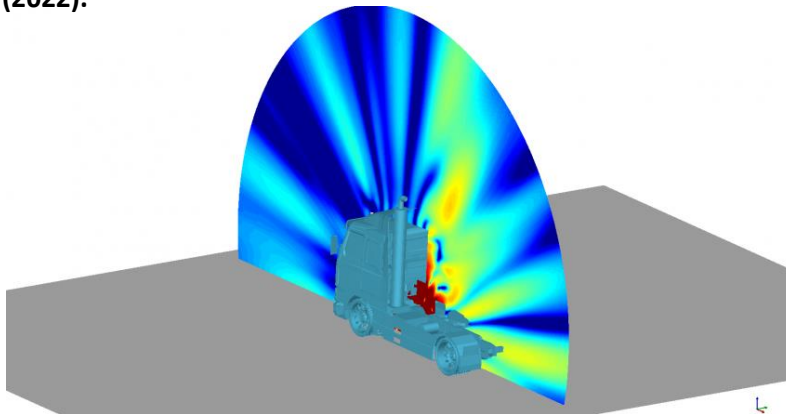
*Figura 2 – Medição de ruído industrial*



**Fonte: [www.waveengineering.us](http://www.waveengineering.us) (2023).**

*Figura 3 – Software para simulação acústica de veículos*

**Fonte: Exame (2022).**



**Fonte: [www.mscsoftware.com](http://www.mscsoftware.com) (2023).**

*Figura 4 – Câmara semi-aneecóica para medições de ruído em veículos*



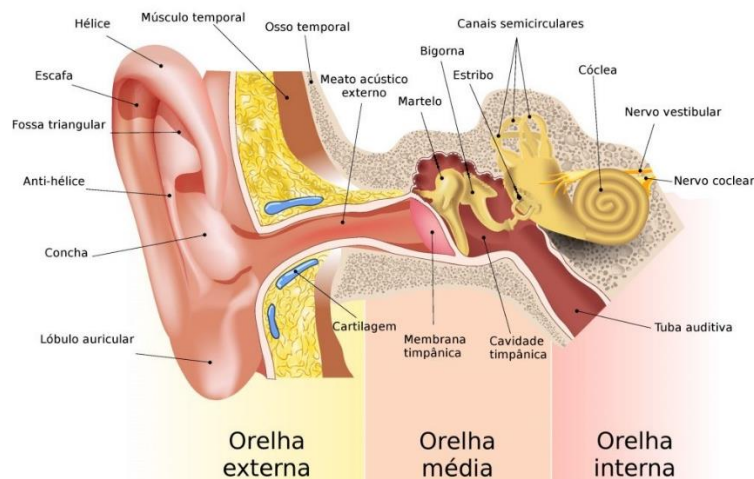
Fonte: [www.iacacoustics.global](http://www.iacacoustics.global) (2023).

## 1.2. CONCEITOS DE ACÚSTICA

A orelha humana é um órgão altamente sensível que permite que o ser humano consiga perceber e interpretar ondas sonoras numa ampla de frequências, entre 20 e os 20000 Hertz, e níveis que variam de 0,00002 Pa, denominado o limiar da audição, até 200 Pa, que é o limiar da dor. Portanto, desempenha um papel importante na comunicação. Além da comunicação, o ouvido humano também tem um papel importante no equilíbrio do corpo.

Observação: atualmente não se usa mais a palavra "ouvido" para nomear a parte interna do sistema auditivo.

Figura 5 – Anatomia da orelha humana

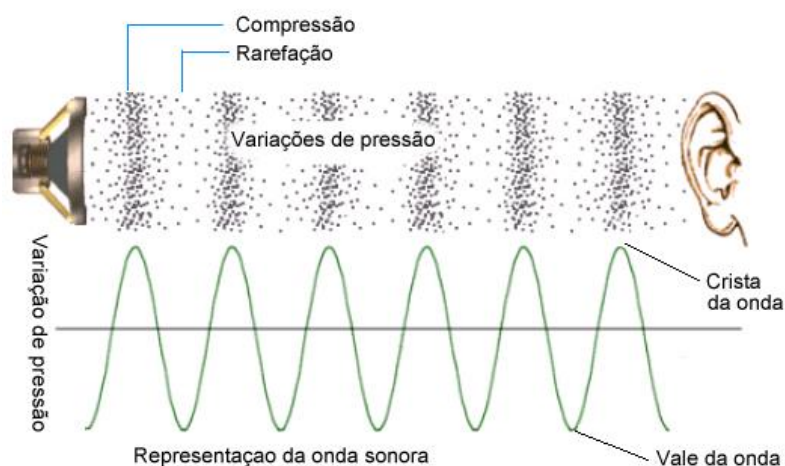


Fonte: [www.infoescola.com](http://www.infoescola.com) (2023).

De acordo com Bistafa (2011), a acústica é a ciência que estuda o som, incluindo sua geração, transmissão e efeitos. Som é a sensação produzida no sistema auditivo. Sons são vibrações das partículas do ar que se propagam a partir de estruturas vibrantes, mas nem toda estrutura que vibra

gera som. Por exemplo, a corda de um instrumento musical, colocada com as mãos em vibração, não gera som. O som é a variação da pressão ambiente que se propaga pelo ar a partir de uma fonte geradora de vibração, até atingir o ouvido. Para que esta propagação ocorra, é necessário que aconteçam compressões e rarefações em propagação do meio. Estas ondas se propagam de forma longitudinal. Quando passa, a onda sonora não arrasta as partículas de ar, por exemplo, apenas faz com que estas vibrem em torno de sua posição de equilíbrio. O som é uma onda mecânica, logo para se propagar necessita de um meio físico, contrariamente à luz que não necessita de nenhum meio para se propagar, uma vez que é uma onda eletromagnética. O meio de propagação pode ser sólido, líquido ou gasoso.

Figura 6 – Representação da propagação do som

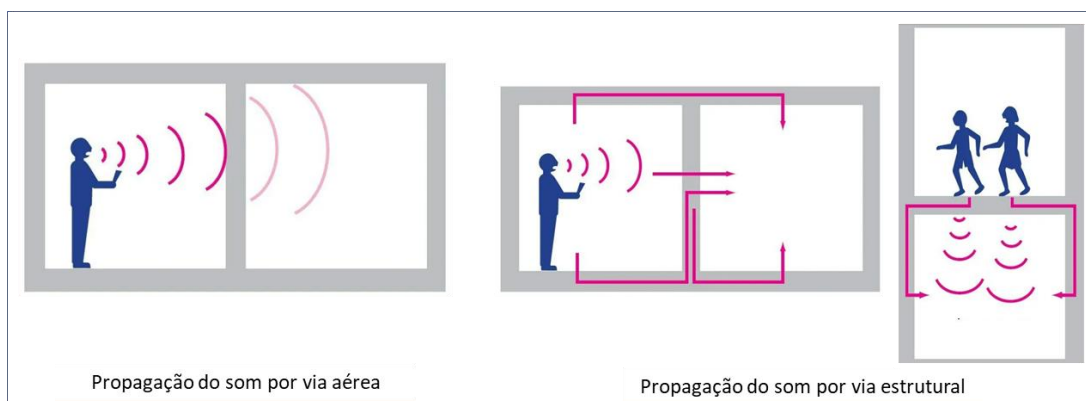


Fonte: [www.fq.pt](http://www.fq.pt) (2023).

Conforme Gerges (2000), o som se propaga por via aérea (quando o meio de propagação é o ar) e/ou por via estrutural (quando o meio de propagação é algum tipo de corpo sólido). Pode-se reduzir esta transmissão conhecendo-se a natureza do som, sua forma de transmissão e o desempenho dos materiais a serem empregados. Quando a propagação sonora ocorre no ar, as ondas são apenas do tipo longitudinal, indicando que a vibração das partículas ocorre na mesma direção da propagação da onda. Já na transmissão através do meio sólido, podem ser encontradas, também, ondas de cisalhamento, torção e de flexão.

Figura 7 – Propagação do som



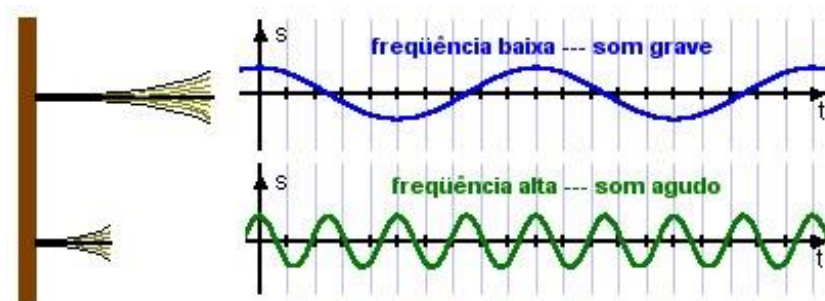


Fonte: [www.safeacoustics.com](http://www.safeacoustics.com) (2023).

A sensação auditiva captada pelo ser humano não inclui todas as flutuações de pressão, à semelhança da sensação luminosa. Esta só ocorre quando a amplitude das flutuações e a taxa de variação em que acontece ao longo do tempo, designada frequência, estiverem dentro de certos limites.

A frequência de um som caracteriza sua percepção como grave ou agudo. Um som de pequena frequência é grave (baixo) e um som de grande frequência é agudo (alto). A altura do som depende apenas da frequência.

Figura 8 – Representação de ondas sonoras de sons grave e agudo

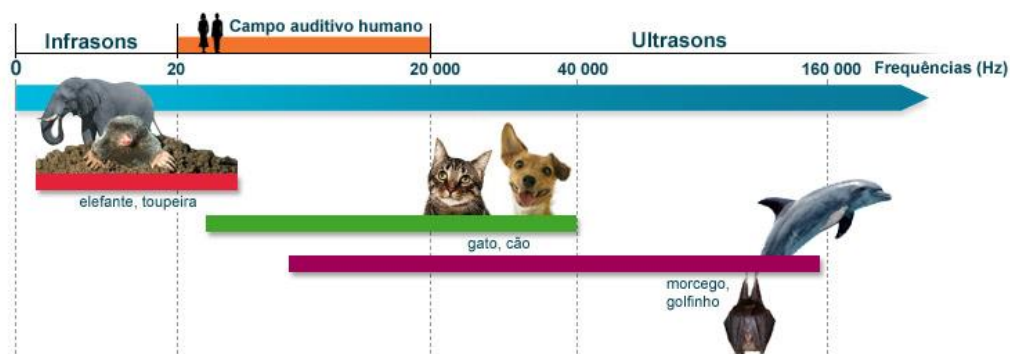


Fonte: [www.somefisica.blogspot.com](http://www.somefisica.blogspot.com) (2023).

A gama de frequências auditivas captada pelo ser humano, é diferente da gama de frequências captada pelos restantes animais. Alguns animais conseguem captar frequências mais baixas, infrassons, como exemplo tem-se os elefantes, e outros conseguem captar frequências mais elevadas, ultrassons, como por exemplo os morcegos.

Figura 9 – Frequências ouvidas por humanos e outros mamíferos





Fonte: [www.cochlea.org](http://www.cochlea.org) (2023).

A intensidade do som é a qualidade que permite diferenciar um som forte de um som fraco. A intensidade de um som depende da energia que a onda transfere.

O timbre do som é a qualidade que permite diferenciar dois sons de mesma altura e intensidade, emitidos por fontes distintas. Os responsáveis pelo timbre são os harmônicos que acompanham o som fundamental. Assim, se um violino e um piano emitirem a mesma nota, conseguimos distinguir o som do violino do som do piano. Isto porque, embora o som fundamental seja o mesmo, os harmônicos não são iguais.

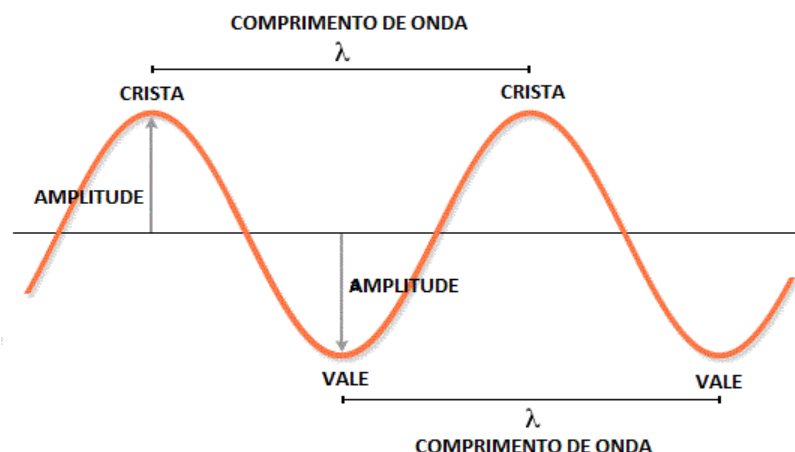
As ondas sonoras incidentes numa parede sofrem reflexão. Este fenômeno se caracteriza pela permanência da energia sonora no ambiente (bate e volta). A existência de paredes de fechamento de um ambiente construído dá origem a sons refletidos que caracterizam o fenômeno chamado de reverberação. Existe uma unidade comparativa para medir a reverberação, definida como o tempo necessário para um som diminuir sua intensidade à milionésima parte a partir do momento em que cessa a fonte sonora. Esse decréscimo corresponde a uma redução de 60 dB.

### 1.3. ONDAS SONORAS

Segundo Bistafa (2011), a onda sonora é caracterizada pela sua frequência ( $f$ ), que corresponde ao número de vibrações por segundo (medida em hertz [Hz]), e pelo seu comprimento de onda ( $\lambda$ ), que é a distância entre a crista de uma onda e a da seguinte. A relação entre  $f$ ,  $\lambda$  e a velocidade do som ( $c$ ) é:

$$c = \lambda \cdot f$$

Figura 10 – Representação da onda sonora



Fonte: [www.infoenem.com.br](http://www.infoenem.com.br) (2023).

- Amplitude da onda: é o valor máximo que a onda pode alcançar, tanto positiva quanto negativamente.
- Crista da onda: Valor onde a amplitude da onda é máxima.
- Vale da onda: Valor onde a amplitude é mínima.
- Comprimento de onda: o comprimento de onda será muito importante para os próximos estudos, uma vez que é uma das principais características de uma onda. O comprimento de onda pode ser calculado como a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos.

O período ( $T$ ) é o intervalo de tempo decorrido para que um ciclo se complete. A frequência é o inverso do período:

$$f = 1 / T$$

As ondas sonoras são criadas por vibrações ou oscilações de um objeto, como um alto-falante ou um instrumento musical. Estas vibrações provocam mudanças na pressão do ar, que se propagam como uma onda sonora através do ar ao redor.

A pressão sonora em função da distância também é cossenoidal, dada por:

$$p(x) = A \cdot \cos(k \cdot x)$$

Em que  $k = 2\pi / \lambda$  [1/m] é chamado número de ondas. Conhecidos a amplitude da pressão sonora ( $A$ ) e o número de ondas ( $k$ ), o valor da pressão sonora em cada ponto,  $p(x)$ , poderá ser obtido através da equação acima, que descreve o comportamento espacial da onda sonora.

$$k = \omega / f$$

Que é a relação entre o parâmetro temporal ( $\omega$ ) e o parâmetro que caracteriza o comportamento espacial ( $k$ ).

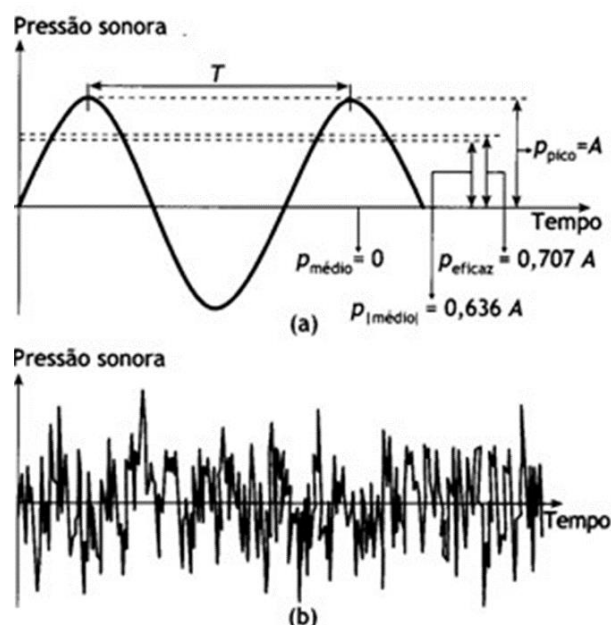
O comportamento temporal e espacial da pressão sonora de um tom puro (som numa única frequência), na frequência angular  $\omega$ , pode ser descrito matematicamente através de uma única expressão:

$$p(x, t) = A \cdot \cos(\omega t \pm kx + \phi)$$

Em que  $\phi$  é o chamado ângulo de fase, que fornece a fase em que se encontra no ponto e instante considerados.

O comportamento temporal da pressão sonora é a informação que esse extrai de um equipamento de medição que utiliza um microfone que capta a pressão sonora num determinado ponto do espaço durante um certo intervalo de tempo. A esse registro dá-se o nome de forma da onda. A figura 11 apresenta a forma da onda de um tom puro de período  $T$  (a) e a forma da onda de um ruído (b).

Figura 11 – Representação da forma da onda sonora



**Fonte: Bistafa (2011).**

Pode-se caracterizar a forma da onda por meio de um único número representativo. Esse número poderia ser o valor de pico, que no caso de tom puro é igual à amplitude  $A$ . Porém, no caso do ruído, a forma da onda apresenta vários picos. Qual dele escolher? Da forma da onda, outros números podem ser extraídos. O cálculo de cada um deles requer essencialmente o conhecimento do valor da pressão sonora em diversos instantes.

De posse de uma lista de  $N$  registros, cada um com valor de pressão sonora  $p_i$ , os números únicos conhecidos como valor médio ( $p_{\text{medio}}$ ), valor absoluto médio ( $p_{|\text{medio}|}$ ) e valor eficaz ( $p_{\text{eficaz}}$ ) podem ser obtidos com a aplicação de fórmulas. O valor eficaz é conhecido como RMS (*root mean square*), que se traduz raiz do valor quadrático médio.

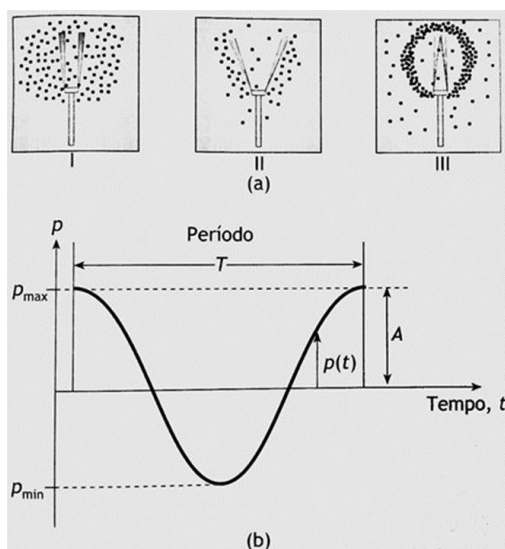
$$p_{\text{medio}} = \frac{\sum_{i=1}^N p_i}{N} \quad p_{|\text{medio}|} = \frac{\sum_{i=1}^N |p_i|}{N} \quad p_{\text{eficaz}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N p_i^2}{N}}$$

Para o tom puro da figura 11 (a), os resultados seriam os seguintes:

$$p_{\text{medio}} = 0 \quad p_{|\text{medio}|} = 0,636 A \quad p_{\text{eficaz}} = 0,707 A$$

De acordo com Bistafa (2011), o diapasão ilustra muito bem o processo de geração do som por uma estrutura vibrante. O diapasão é um objeto metálico, em forma de U, que é comumente utilizado para produzir um tom específico para afinar instrumentos musicais. Quando as duas hastes do diapasão são batidas contra uma superfície, eles vibram e produzem um tom claro e constante com uma frequência específica.

Figura 12 – Representação da propagação de um diapasão



**Fonte: Bistafa (2011).**

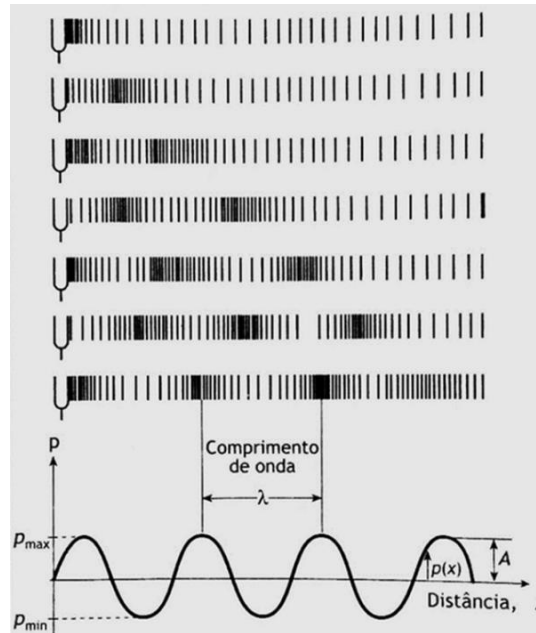
A figura 12 ilustra o processo de geração do som por uma estrutura vibrante como o diapasão. Em (a), o diapasão em repouso cercado por partículas de ar (I). Quando os braços do diapasão se afastam (II), as partículas de ar se aglomeram, chocando-se umas com as outras, gerando compressão. Quando se aproximam (III), gera rarefação. O movimento vibratório provoca então compressões e rarefações cíclicas. O som é gerado quando a amplitude da variação de pressão ambiente é superior ao limiar da audição.

Em (b) tem-se o gráfico da pressão sonora gerada num ciclo completo de vibração do diapasão que mostra que a pressão em função do tempo é cossenoidal:

$$p(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Onde  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  [rad/s], a chamada frequência angular.

Figura 13 – Movimento das partículas de ar no diapasão



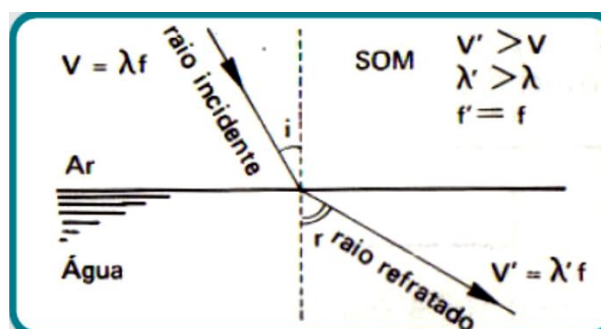
Fonte: Bistafa (2011).

O movimento das partículas de ar próximas ao diapasão vai sendo transmitido em cadeia a outras partículas através dos choques. Forma-se assim a onda sonora. À medida que mais partículas vão sendo alcançadas pela onda, cada uma delas é colocada em movimento com as mesmas características das partículas que estão próximas ao diapasão.

Conforme Bistafa (2011), as ondas sonoras apresentam as seguintes características quanto à propagação:

- Refração do som: Consiste em a onda sonora passar de um meio para o outro, mudando sua velocidade de propagação e comprimento de onda, mas mantendo constante sua frequência.

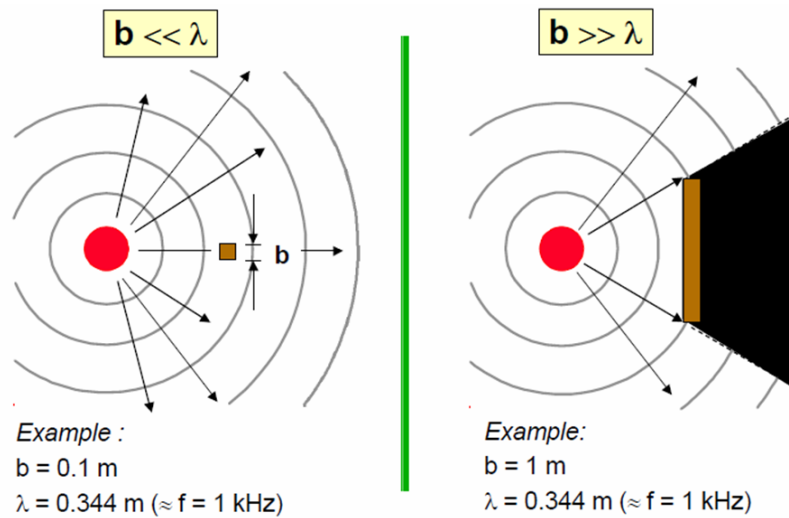
Figura 14 – Refração do som



Fonte: Bistafa (2011).

- Difração do som: Fenômeno em que uma onda sonora pode transpor obstáculos. Se a obstrução for menor do que o comprimento de onda, a obstrução é negativa. Se a obstrução for maior do que o comprimento de onda, o efeito é notável como um efeito “sombreador”.

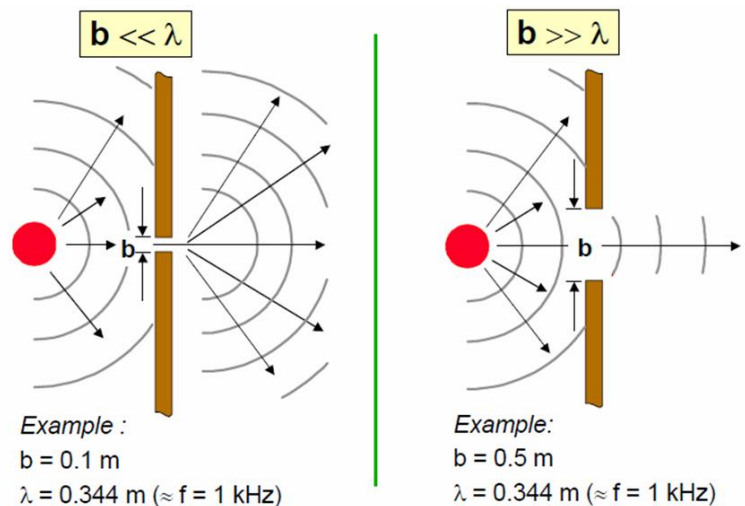
Figura 15 – Difração do som



Fonte: [www.bksv.com](http://www.bksv.com) (2023).

- Difusão do som: A difusão ocorre quando o som passa através dos orifícios. Se o orifício for pequeno em comparação com o comprimento de onda do som, o som irá irradiar em um padrão omnidirecional semelhante ao da fonte sonora original. Quando o furo tem dimensões maiores do que o comprimento de onda do som, o som passará com perturbações insignificantes.

Figura 16 – Difusão do som

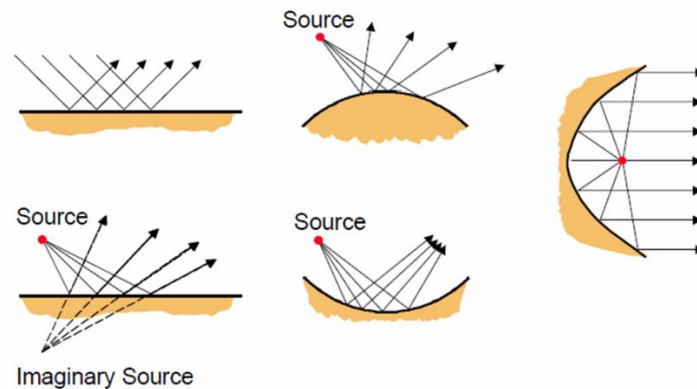


Fonte: [www.bksv.com](http://www.bksv.com) (2023).

- Reflexão do som: Quando o som atinge obstruções de tamanho grande em comparação com o seu comprimento de onda, as reflexões ocorrem. Se a obstrução tiver muita pouca absorção, todo o som refletido terá energia igual em relação ao som recebido. Este é um

dos importantes princípios utilizados na construção de salas reverberantes. Quando a energia refletida é perdida devido à alta absorção na superfície reflexiva, a situação está próxima do que se encontra em uma sala anecóica.

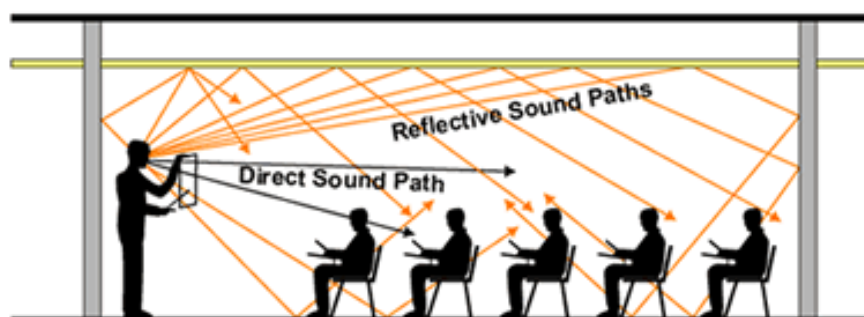
Figura 17 – Reflexão do som



Fonte: [www.bksv.com](http://www.bksv.com) (2023).

- Reverberação: suponhamos que uma pessoa receba dois sons - o primeiro chega diretamente de uma fonte sonora, e o segundo após o som ter refletido em uma barreira qualquer. Quando uma pessoa recebe um segundo som antes que termine o tempo de remanescência do primeiro, acontece uma superposição de ambos. O resultado é uma sensação única, mais longa e prolongada, chamada reverberação do som. O tempo de reverberação é uma medida do tempo que leva para o som se decompor em 60 decibéis (dB) depois que a fonte sonora parou. Ele é influenciado pelo tamanho, forma e materiais da sala, bem como pela frequência do som. O tempo de reverberação pode ter um impacto significativo na percepção da qualidade sonora de uma sala, e é uma consideração importante no projeto de espaços como salas de concertos, estúdios de gravação e auditórios.

Figura 18 – Reverberação do som



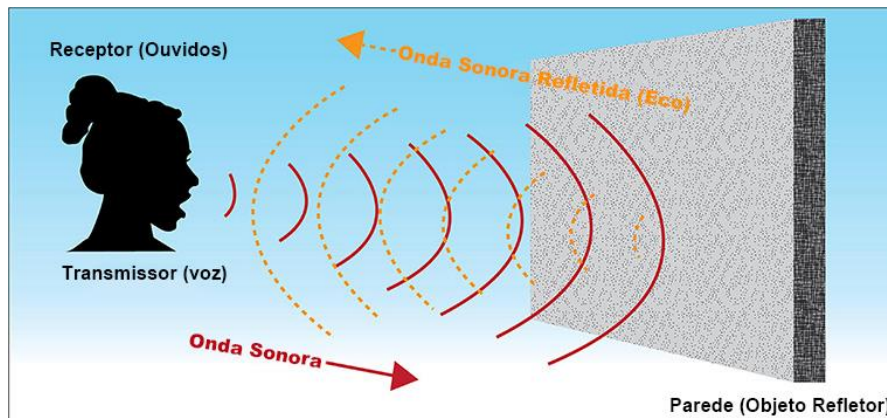
Fonte: [www.acousticalsurfaces.com](http://www.acousticalsurfaces.com) (2023).

- Eco: Fenômeno em que se consegue ouvir nitidamente um som refletido por obstáculos uma ou mais vezes sucessivas. Para que haja eco, o som refletido deve



chegar ao receptor com um atraso maior que o tempo de remanescência. Nosso ouvido só consegue distinguir dois sons sucessivos num intervalo de tempo igual ou maior que 0,1s.

Figura 18 – Eco



Fonte: [www.parajovens.unesp.br](http://www.parajovens.unesp.br) (2023).

O eco e a reverberação são dois fenômenos diferentes. A principal semelhança entre os dois é que tanto a reverberação quanto o eco acontecem após um som ter sido feito. O eco é uma onda sonora que foi refletida ou devolvida com magnitude e atraso suficientes para ser detectável como uma onda distinta daquela que foi transmitida diretamente. A reverberação, por outro lado, acontece quando o som persiste como resultado de reflexão repetida ou dispersão após a fonte sonora ter parado. Portanto, enquanto um eco é um som distinto, sons reverberados são difíceis de ouvir claramente porque os reflexos continuam se repetindo.

#### 1.4. IMPEDÂNCIA, INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

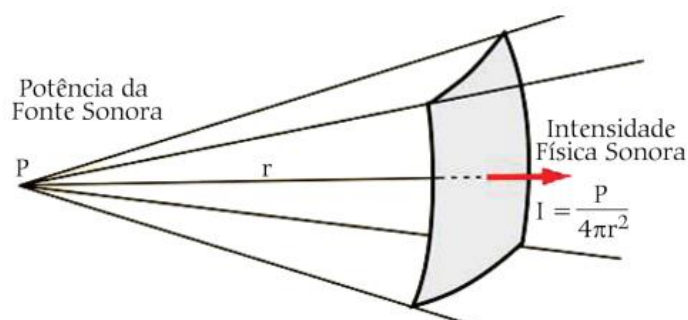
Segundo Bistafa (2011), as partículas do ar, no movimento vibratório, deslocam-se da posição de equilíbrio com uma velocidade chamada de velocidade das partículas. Define-se impedância acústica específica ( $z$ ) como a razão entre a pressão sonora e a velocidade das partículas. A impedância depende do meio de propagação e do tipo de onda presente (plana, esférica etc.). Para ondas planas e ondas esféricas (para quando a distância  $r$  é maior que 2 vezes o comprimento de onda), a impedância acústica é dada por  $z = \rho \cdot c$ , sendo  $\rho \cdot c$  a impedância característica do meio de propagação. A unidade de  $\rho \cdot c$  é  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , denominada rayl (homenagem a Lord Rayleigh – 1842 - 1919). Para o ar à temperatura ambiente  $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  e  $c = 340 \text{ m}/\text{s}$ , portanto  $\rho \cdot c = 408 \text{ rayls}$ .

Quando uma onda acústica passa por uma fronteira entre dois meios com impedâncias acústicas diferentes, parte da energia da onda é refletida de volta e parte é transmitida para o segundo meio. A quantidade de reflexão e transmissão depende da diferença na impedância acústica entre os dois meios. Esta propriedade é importante em campos como acústica, ultrassom e sismologia, onde é usada para caracterizar e analisar o comportamento das ondas em diferentes meios.

A intensidade sonora ( $I$ ) é definida por Bistafa (2011) como a quantidade média de energia, na unidade de tempo, que atravessa uma área unitária perpendicular à direção de propagação da onda. Como energia na unidade de tempo é a potência (watts), então a unidade de intensidade sonora é o watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ).

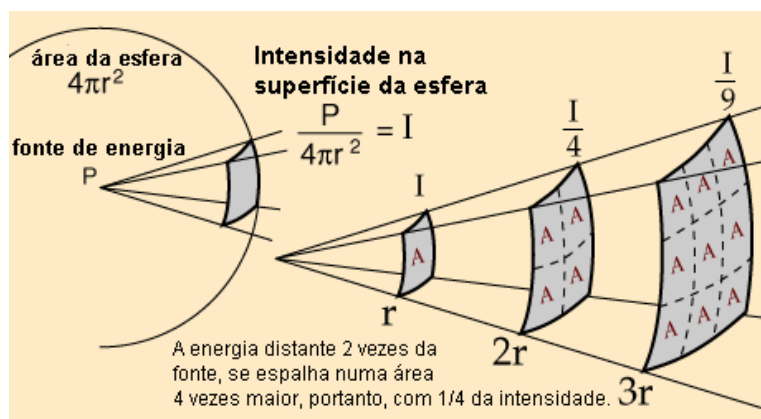
Conforme Bedaque e Bretones (2019), a intensidade sonora em uma região do espaço mede a quantidade de energia sonora ( $E$ ) que chega até ela na unidade de tempo e na unidade de área. Essa energia sonora partiu da fonte e se espalha esfericamente pelo espaço, conforme esquematizado na figura 19.

Figura 19 – Intensidade sonora



Fonte: Bedaque e Bretones (2019).

Figura 20 – Relação da Intensidade sonora com a distância da fonte



Fonte: [www.ufrj.br](http://www.ufrj.br) (2023).

A potência sonora é uma medida física que descreve a quantidade de energia sonora que é transmitida em uma determinada área por unidade de tempo. A potência sonora é medida em watts e é usada para quantificar a quantidade de energia sonora que é emitida por uma fonte sonora.

Ao contrário da pressão sonora, que é uma medida da intensidade do som em um determinado ponto do espaço, a potência sonora é uma medida da energia acústica total irradiada por uma fonte em todas as direções. É uma métrica útil para descrever a saída acústica de uma fonte sonora, tal como

um alto-falante ou um motor, e pode ser usada para comparar a sonoridade relativa de diferentes fontes.

Em termos práticos, a potência sonora pode ser usada para avaliar o desempenho acústico dos produtos, avaliar o impacto potencial da poluição sonora e projetar soluções de controle de ruído. Por exemplo, os engenheiros podem medir a potência sonora de uma máquina industrial e usar esta informação para desenvolver estratégias de redução de ruído que reduzirão o impacto da máquina sobre os trabalhadores e o ambiente ao redor.

Em resumo, a potência sonora é uma medida física que descreve a quantidade total de energia acústica emitida por uma fonte sonora por unidade de tempo, e é uma métrica útil para avaliar o desempenho acústico de produtos e projetar soluções de controle de ruído.

### 1.5. GRANDEZAS SONORAS

De acordo com Bistafa (2011), a utilização de escala logarítmica foi desenvolvida por engenheiros em 1923 nos EUA, para comparação entre potências de sistemas de telefonia utilizando sinais elétricos. A unidade de transmissão (TU) tinha a característica essencial de comprimir uma ampla faixa de variação da escala linear de potências por transformação desta em escala logarítmica. Em 1924 a TU foi renomeada como “bel” (B), em homenagem a Alexander Graham Bell (1847 – 1922).

$$bel = \log \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

Sendo P a potência do sistema e  $P_0$  uma potência arbitrária de referência.

O bel é, portanto, uma medida do nível da potência em relação à potência de referência ( $P_0$ ), podendo assumir tanto valores positivos (potência superior à de referência) como negativos (potência inferior à de referência). Zero bel (0B) corresponde a  $P = P_0$ .

Como 1B corresponde a  $P = 10 \cdot P_0$ , ficou evidente a necessidade de mostrar com clareza variações menores de potência, então, em 1929, foi criado o decibel (dB), como submúltiplo do Bel, tal que 1B equivaleria a 10 dB. Assim, 1 dB (0,1 B) corresponde a  $P = 1,26 \cdot P_0$ , enquanto -1 dB (-0,1 B) corresponde a  $P = 0,79 \cdot P_0$ .

O físico norte americano Harvey Fletcher (1884 – 1981) verificou que 1 dB era a mínima variação da potência sonora detectável pelo sistema auditivo. Este limiar diferencial foi denominado de unidade de sensação (*sensation unit*), o que permitiu escrever a seguinte equação:

$$unidade\ de\ sensação = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) \text{ dB}$$

Sendo W a potência sonora e  $W_0$ , uma potência sonora de referência.

O estímulo físico que melhor se correlaciona com a sensação de som é a pressão sonora. Como o decibel é usado para comparação de potências, a maneira de tornar válida a utilização em termos de pressão sonora é através da relação da potência sonora que é proporcional ao quadrado do valor eficaz da pressão sonora (NPS):

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p_{eficaz}^2}{p_0^2} \right) = 20 \log \left( \frac{p_{eficaz}}{p_0} \right) dB$$

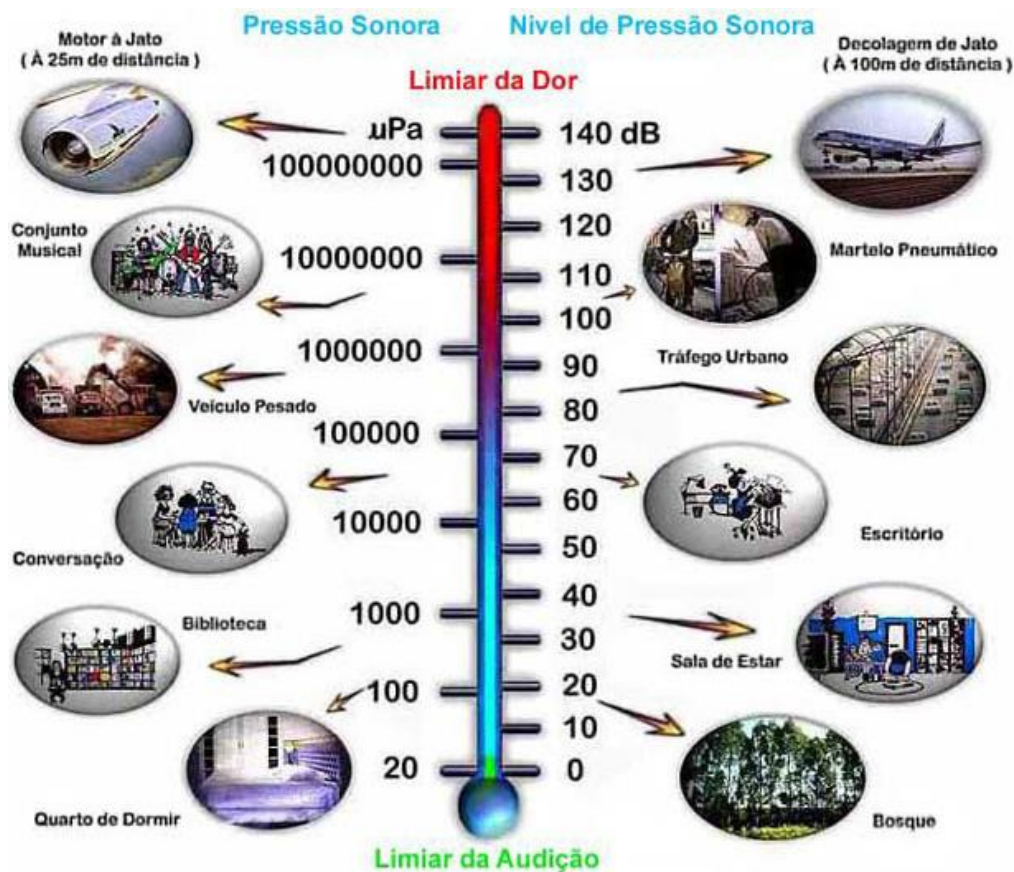
Sendo  $L_p$  o nível de pressão sonora (NPS) e  $p_0$  uma pressão sonora de referência, que será o limiar da audição, ou seja,  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa (20  $\mu$ Pa).

O nível de pressão sonora (NPS) é a medida física para caracterizar a sensação subjetiva da intensidade dos sons, sempre calculado com o valor eficaz da pressão sonora.

Para o cálculo da potência sonora (NWS) em dB a referência será  $W_0 = 10^{-12}$  watts (W) e para o cálculo da intensidade sonora (NIS) a referência será  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>.

$$L_W = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) dB \quad L_I = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) dB$$

Figura 21 – Nível de Pressão Sonora x Pressão Sonora



Fonte: [www.vibrasom.ind.br](http://www.vibrasom.ind.br) (2023).

## UNIDADE 2 – PERCEPÇÃO DO SOM

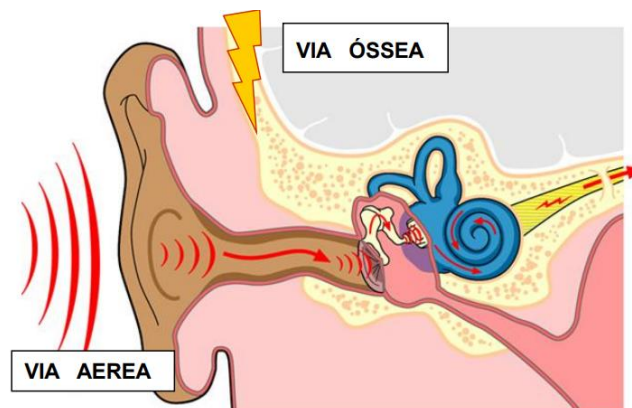
### 2.1. MECANISMO DE AUDIÇÃO E PROCESSAMENTO DO SOM

De acordo com Gerges (2000), a sequência de eventos para se escutar um som é:

- O som é gerado;
- O som se propaga até a aurícula e para o conduto auditivo;
- O tímpano vibra;
- Os ossículos vibram;
- Ondas de pressão são transmitidas para o líquido no interior da cóclea;
- A cóclea codifica o som;
- O som codificado é transmitido ao cérebro via nervo auditivo.

O som é conduzido até a orelha média por via aérea e por via óssea, conforme figura 22:

Figura 22 – Condução do som

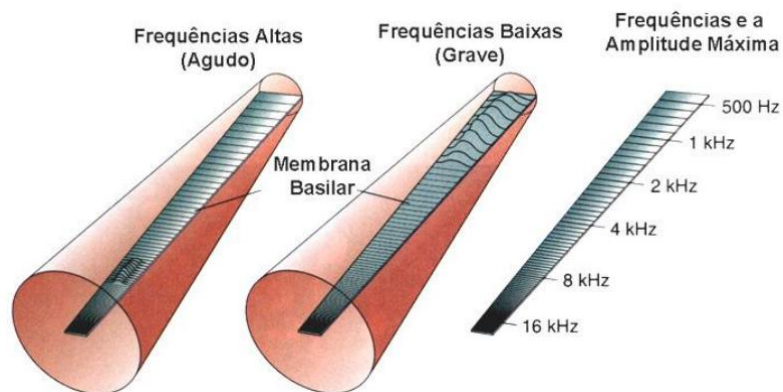


Fonte: [www.ibb.unesp.br](http://www.ibb.unesp.br) (2023).

Os ossos Martelo e Bigorna funcionam como alavancas, com razão de braços da ordem de 1,3:1. A relação entre as áreas do tímpano e da janela oval é da ordem de 17:1.

Segundo Bistafa (2011), a membrana basilar é situada dentro da cóclea e tem a capacidade de extrair da forma de onda o seu conteúdo em frequências. É, portanto, o elemento da orelha humana que transforma a forma de onda em um espectro de frequências

Figura 23 – Membrana basilar

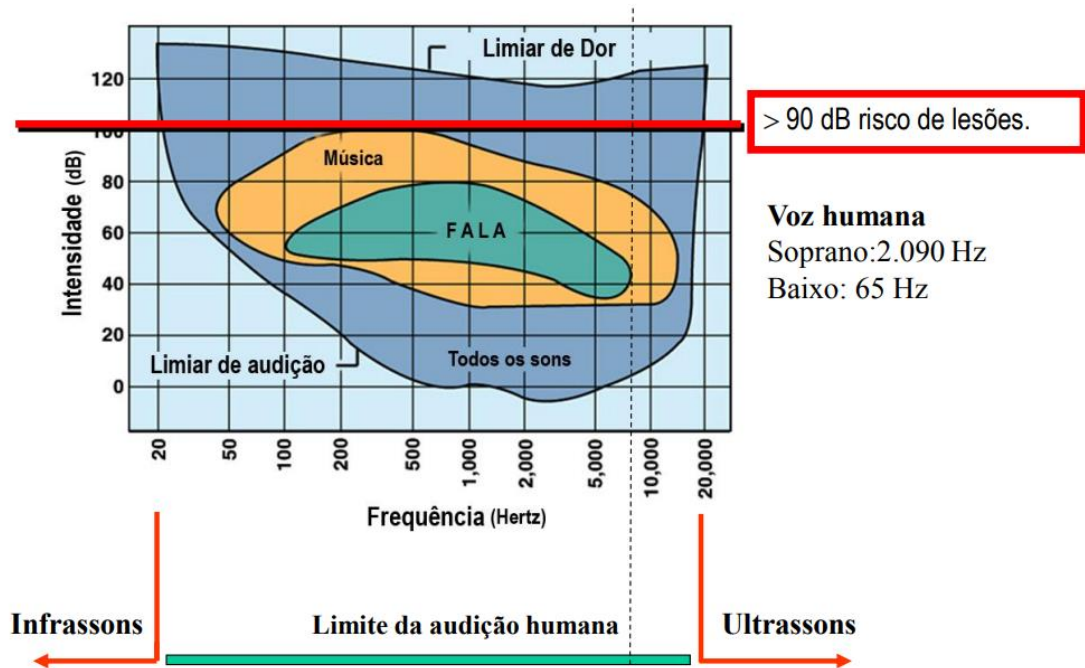


Fonte: [www.ibb.unesp.br](http://www.ibb.unesp.br) (2023).

A figura 24 demonstra as faixas de tipos de sons e os limiares do aparelho auditivo humano.

Figura 24 – Intensidade de sons por frequência



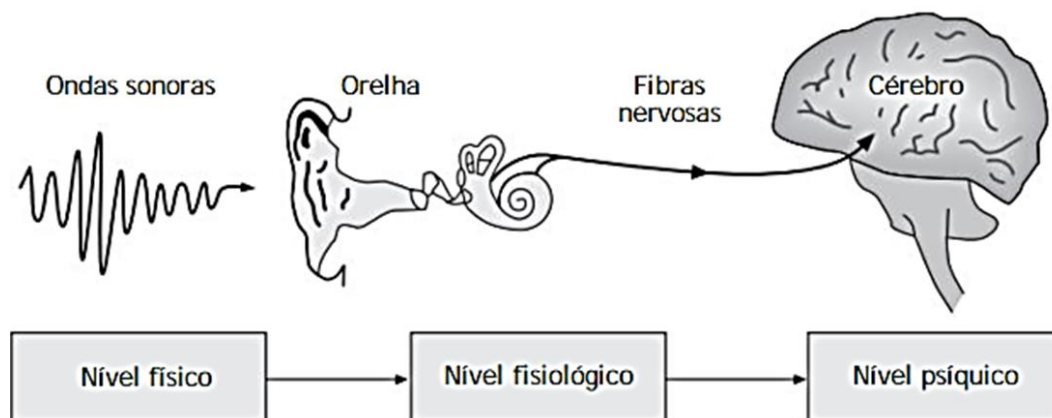


Fonte: [www.ibb.unesp.br](http://www.ibb.unesp.br) (2023).

## 2.2. SENSÇÃO SUBJETIVA DO SOM

Conforme Bistafa (2011), a figura 25 ilustra o processamento do som nos seres humanos. Informações no nível físico do som, na forma de ondas sonoras, são captadas, processadas e codificadas em nível fisiológico pela orelha, e enviadas ao cérebro pelas fibras nervosas auditivas. No nível psíquico, o cérebro interpreta as informações recebidas e determina seu significado e importância.

Figura 25 – Processamento do som nos seres humanos

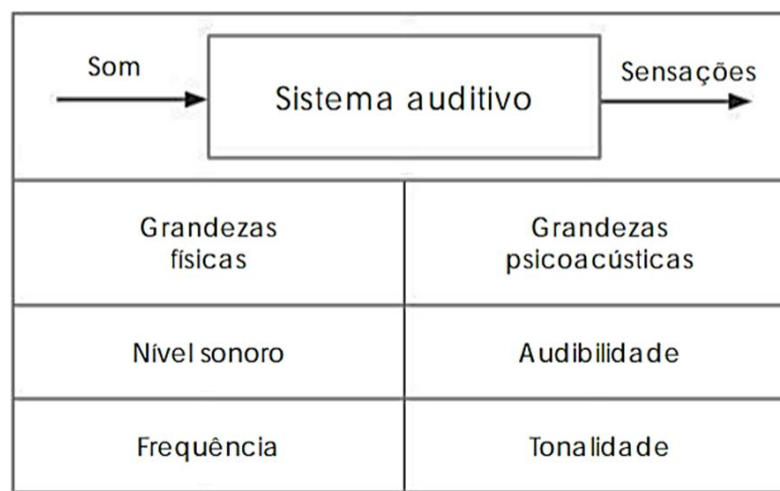


Fonte: Bistafa (2011).



O som é caracterizado por grandezas físicas, enquanto as sensações são caracterizadas por grandezas psicoacústicas. O sistema auditivo transforma sons em sensações psíquicas:

Figura 26 – Sensações dos sons



Fonte: Bistafa (2011).

Na tentativa de explorar essa subjetividade, tornou-se necessário buscar novas ferramentas as quais possam traduzir de forma mais eficiente a relação ruído e audição (ou som e audição).

Psicoacústica pode ser definida como o estudo fisiológico da audição. O propósito da pesquisa psicoacústica é entender como se dá este processo auditivo, ou melhor, como os sons chegam ao ouvido e são processados pelo ouvido e pelo cérebro de modo a dar ao ouvinte informações úteis sobre o mundo à sua volta.

Segundo Bodden (1997), psicoacústica pode ser definida como a ciência que trata da relação entre os parâmetros de ondas acústicas e os atributos de eventos auditivos. Estuda a transformação da pressão sonora no ouvido externo em impulso nervoso pelo ouvido interno, e parte do processamento do cérebro. Aqui o interesse é a resposta subjetiva ao som em termos de sua altura, volume, duração, timbre e posição aparente. As categorias do estudo da psicoacústica não são estanques, pois existe considerável interdependência entre elas. Por exemplo, a nossa sensação de altura é dependente do tempo, e nossa percepção de volume varia consideravelmente com a frequência e o timbre.

Como sensação, o som é um estímulo agradável e o ruído é um estímulo desagradável. Entretanto, fisicamente não há distinção entre ruído e som. A percepção do ruído é altamente subjetiva. Particular ao indivíduo, modificada ou afetada pela visão pessoal, pelas experiências e pelo seu grau de conhecimento. O ruído não pode ser encarado somente de modo objetivo e quantificado apenas ou isoladamente pelo nível de pressão sonora e/ou com a frequência. Existem fatores subjetivos que influenciam a avaliação do ruído pelo indivíduo. O ser humano classifica a sensação de ruído por adjetivos pelos quais os aparelhos de medição de ruído não são capazes de detectar ou identificar.

#### Algumas métricas de psicoacústica:

- Loudness: Refere-se à percepção da intensidade do som. Aplicado para ruídos de banda larga complexos que podem incluir tons puros. Unidade: Sone. 1 Sone corresponde à intensidade sonora provocada por um tom puro de 1 kHz com nível de pressão sonora 40 dB.
- Sharpness: É uma medida do timbre do som o qual é uma característica que permite distinguir uma fonte da outra. O sharpness é a sensação relacionada ao espectro sonoro e suas componentes nas frequências mais altas. Mede a irritação provocada à exposição aos sons em alta frequência, ou seja, é um parâmetro utilizado para quantificar a agudeza do som. Utilizado para análise de ruídos metálicos. Unidade: Acum - 1 Acum é tem como referência um ruído de banda estreita, na frequência central de 1 kHz com um nível de 60 dB.
- Roughness: Mede a modulação de um som em médias frequências (entre 20 e 300Hz). Confere a sensação de “aspereza” ou “chiado”. Unidade: Asper.
- Fluctuation Strength: Mede a modulação de um som em baixas frequências (abaixo de 20Hz). Representa o grau de flutuação que pode ser percebido no nível do som devido à modulação do sinal por frequências de 1 a 20 Hz. Tom modulado nessa faixa de frequência causa uma falsa sensação de variação da amplitude ao longo do tempo, sendo percebido mais alto do que um som contínuo com mesma amplitude. Unidade: Vacil.
- Índice de Articulação: Parâmetro físico em porcentagem que indica o grau de inteligibilidade da fala. Inteligibilidade é um parâmetro psicológico (subjetivo) medido em porcentagens de sílabas, palavras ou sentenças entendidas corretamente. Para que se tenha boa inteligibilidade o IA deve ser > 60%.
- Ruidosidade Percebida: Desenvolvida para mensurar objetivamente o incômodo do ruído. A ruidosidade percebida de um tom puro em 1 kHz, com nível de pressão sonora de 40 dB, equivale a 1 noy. Ruídos de 2, 4, 10 ou 20 noys são considerados como tendo ruidosidade percebida 2, 4, 10 ou 20 vezes maior que 1 noy.

### 2.3. EFEITOS DO RUÍDO

O ruído pode ser caracterizado como sendo a sensação psicológica resultante de um ou mais sons desagradáveis ao ouvido humano. A noção de ruído é subjetiva e depende de quem o percebe. Diferentes tipos de sons podem produzir sensações auditivas distintas. Estas sensações dependem não só do tipo de som emitido, mas também da recepção porque o que é ruído para umas pessoas para outras pode ser considerado um som. Resumidamente, o ruído pode ser considerado como um som indesejável que provoca uma sensação desagradável ou incomodativa podendo ser considerado, em certos casos, como perigoso por provocar lesões auditivas ou mesmo levar à surdez das pessoas que a ele estejam expostas. A níveis baixos, quando o ruído é apenas incomodativo, este pode provocar dificuldades em manter a atenção, a concentração, a comunicação, o descanso e o repouso. A longo prazo, para exposições contínuas, existirão implicações na saúde das pessoas que a ele estejam

expostas, podendo ocasionar estados crônicos de nervosismo, stress, entre outros. Fisicamente, som e ruído não têm diferenças, se propagam da mesma forma.

O incômodo causado pelo ruído é um atributo extremamente subjetivo. A dificuldade em avaliar quantitativamente o incômodo do ruído deve-se aos seguintes fatores:

- Noção de audibilidade do ouvinte;
- Grau de aceitação do ruído;
- Potencial intrusivo do ruído;
- Perturbação que ele causa.

Segundo Croome (1977), o desconforto causado pelo ruído é dependente de vários fatores, como a forma espectral (frequência e intensidade) da onda sonora; conteúdo espectral largura da banda, valores de pico etc.); duração do ruído; número de repetições do evento ruidoso; tarefas individuais envolvidas; suscetibilidade individual; interação com outros fatores ambientais; níveis de sensibilidade física e psicológica individual; experiência anterior com o tipo de ruído.

Sob o ponto de vista psicológico, Levy-Leboyer e Naturel (1991) afirmam que os fatores envolvidos no desconforto causado pelo ruído são: tipos de ruído; audibilidade (loudness); aceitabilidade ou inaceitabilidade ao ruído; modo de se produzir o ruído (intencional ou não intencional); aspecto temporal da onda sonora; atividade realizada no momento do ruído; a reação individual ao ruído; a relação com a pessoa que está produzindo o ruído.

Conforme Guedes (2005) a poluição sonora ambiental tem elevado os níveis de ruído urbano a índices que tem comprometido o ambiente e a qualidade de vida mostrando que os sistemas construtivos que compõem as fachadas das edificações devem ter desempenho acústico tal para minimizar esse impacto.

Os parâmetros físicos que mais contribuem com a sensação subjetiva de incômodo são:

- Conteúdo espectral e níveis sonoros associados;
- Complexidade do espectro e a existência de tons puros;
- Duração;
- Amplitude e frequência das flutuações de nível.
- Tempo de subida de tons impulsivos.

## 2.4. CONFORTO ACÚSTICO

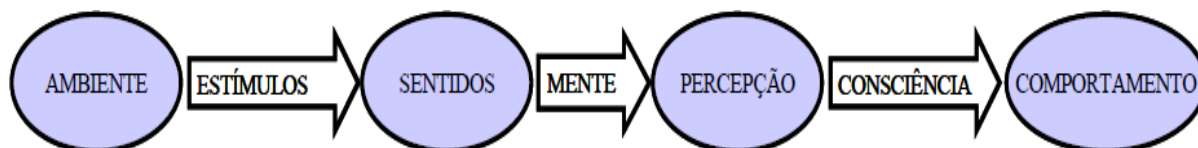
O conforto pode ser definido como a sensação de bem-estar, de comodidade material ou de aconchego, mas é subjetivo, varia de pessoa a pessoa, depende de seus hábitos, de sua cultura, ou seja, é difícil mensurá-lo.

De acordo com Silva e Santos (2012), o conforto está sempre presente quando pensamos em qualificar um objeto, um espaço, como se ele fosse expressão máxima da adequação entre desenho e uso, resultando em uma satisfação pessoal plena.

Schmid (2005) estuda a forma como os sentidos interferem na percepção do conforto no ambiente construído, comprovando que não é apenas o sistema fisiológico que determina o conforto, mas também a expressividade que compreende os aspectos subjetivos.

Segundo Ribeiro (2004), o comportamento é conduzido por uma resposta à percepção do ambiente através dos estímulos provocados por ele:

*Figura 27 – Modelo do processo percepção ambiental*



**Fonte: Ribeiro (2004).**

Portanto, a percepção é a resposta aos estímulos captados através dos sentidos humanos. Ribeiro (2004) escreveu que os sentidos têm uma dupla função: fazer-nos sentir e fazer-nos perceber. Os sentidos são os receptores sensoriais que captam as informações existentes no ambiente, na superfície do corpo e no interior do próprio organismo. Além dos receptores externos, aqueles já difundidos como os cinco sentidos (visão, tato, olfato, audição, paladar), existem os sentidos internos, sentidos como o instinto de sobrevivência, o sentido do equilíbrio, do movimento, entre outros, que também influenciam no comportamento.

Para Schmid (2005), a percepção do conforto está ligada à comodidade e à adequação. A comodidade está associada à conveniência de se ouvir, como um som constante ou o silêncio. A adequação reque que o ambiente sonoro seja coerente com a atividade desenvolvida.

## UNIDADE 3 – CONTROLE DO RUÍDO

O controle do ruído refere-se ao processo de redução ou eliminação de sons indesejados, normalmente em ambientes internos ou externos. O ruído indesejado pode causar uma variedade de problemas, incluindo distúrbios do sono, perda auditiva, estresse e diminuição da produtividade.

O controle do ruído inclui espaços residenciais, comerciais, industriais, veículos, meio ambiente, entre outros. O controle eficaz do ruído pode melhorar a qualidade de vida e reduzir os impactos negativos da poluição sonora.

Existem vários métodos para controlar o ruído, tais como:

- Isolamento acústico: envolve adicionar materiais específicos para isolação em paredes, pisos, tetos, veículos, entre outros, para barrar o som que passa por eles.
- Absorção sonora: envolve a adição de materiais tais como painéis acústicos, cortinas ou espuma a um espaço para absorver o som e atenuá-lo.
- Mascaramento sonoro: envolve adicionar algum tipo de ruído de fundo de baixo nível, como ruído branco ou sons da natureza, a um espaço para mascarar ruídos indesejados.
- Controle da fonte: envolve abordar diretamente a fonte do ruído, como por exemplo, substituindo equipamentos ruidosos ou modificando processos para reduzir os níveis de ruído.
- Mudanças comportamentais: envolve mudar o comportamento humano para reduzir os níveis de ruído, tais como impor horas de silêncio ou educar os indivíduos sobre como suas ações contribuem para os níveis de ruído.

Em se tratando de construções, para definir o desempenho acústico foi aprovada em 2008 a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), intitulada “Edifícios Habitacionais de até Cinco Pavimentos – Desempenho” (ABNT NBR 15575, 2008) que determina uma metodologia para avaliar o atendimento dos limites de desempenho de isolamento ao ruído aéreo e de isolamento ao ruído de impacto; consiste em medições acústicas conforme procedimentos padronizados especificados em normas internacionais.

Para cada elemento que compõe uma habitação, existem sistemas específicos que podem ser utilizados para o tratamento acústico.

As paredes que separam as diferentes unidades habitacionais autônomas devem garantir nas edificações um desempenho adequado de isolamento acústico ao ruído aéreo (conversações, TV, música etc.). O composto utilizado na construção das paredes tem relação direta com o desempenho acústico, depende fundamentalmente de sua densidade superficial como por exemplo alvenaria com blocos de concreto ou cerâmico ou ainda as chamadas alvenarias leves que utilizam placas de gesso (*drywall*) que neste caso dependem do número de placas e presença de material de absorção sonora em seu interior.

As paredes externas que separam dormitórios do exterior devem garantir um desempenho adequado de isolamento acústico ao ruído aéreo (tráfego, aviões, trens etc.). Além do composto utilizado nas paredes, o desempenho acústico destas paredes depende muito das esquadrias, que é o ponto mais frágil no que se refere a isolamento sonoro.

Já o teto, que pode ser o piso de outro apartamento, tem como principal fragilidade sonora a transmissão estrutural, causada pelo andar de pessoas.

Na prática, nenhuma parede se comporta como obstáculo perfeito. Sob a ação de ondas sonoras que atingem uma parede, esta põe-se a vibrar. A própria parede em vibração produz ondas sonoras nos ambientes que separa, ou seja, parte da energia incidente pela vibração da parede é transmitida ao ambiente contíguo ou adjacente. Quando se substitui o revestimento de uma parede por um material cujo coeficiente de absorção é mais elevado que o do revestimento anterior, a parcela

refletida do conjunto parede/ revestimento é diminuída, mas a parcela transmitida não se altera, ou seja, pode não ser o recomendável.

O isolamento acústico se refere à capacidade de certos materiais formarem uma barreira, impedindo que a onda sonora passe de um ambiente a outro. Nestes casos se deseja impedir que o ruído alcance o ambiente ao lado. Quanto mais leve a parede, mais facilmente passa a vibrar. As paredes leves não são recomendadas para impedir a transmissão do som,

As paredes devem ser suficientemente pesadas, pois quanto maior for a massa, mais dificilmente entrarão em vibração. Uma outra forma é a utilização de paredes leves multicamadas. Há um eficiente sistema acústico multicamadas, denominado massa-mola-massa, cuja resultante da descontinuidade de meios proporciona resultados superiores a sistemas pesados com um único tipo de material. Este fato é comprovado quando se comparam paredes de alvenaria convencional, ou até mesmo de concreto, com paredes multicamadas de gesso acartonado. As paredes de gesso acartonado formam o sistema massa (gesso) – mola (ar) – massa (gesso) e podem ainda ter aumentado seu isolamento acústico com a colocação de lã mineral no seu interior. A lã de rocha ou de vidro é um excelente absorvente acústico, fortalecendo assim a função mola.

Existe diferença entre absorção sonora e isolamento sonora. A absorção é a capacidade de um material/produto/componente absorver total ou parcialmente a energia sonora incidente. A isolamento é o conjunto de procedimentos praticados na construção civil para inibir a transposição do som de um ambiente a outro.

De acordo com Poll (2009), certos materiais têm a capacidade de formar uma barreira, impedindo que a onda sonora (ou ruído) passe de um recinto a outro. Em grande parte dos casos deseja-se impedir que o ruído alcance o homem. Quando a onda sonora atinge uma parede, a energia é meramente transferida de um lado da divisão para o outro por movimento direto do obstáculo. Quanto mais pesado for este último, menos som passará através dele. Quando se planeja o isolamento acústico de um ambiente, deve ser considerado, além do espectro do ruído, as características físicas dos materiais a serem empregados, com relação a rigidez, massa específica, espessura etc. Também deve ser considerada a significativa importância de evitar-se vazamentos e fendas nos obstáculos separatórios, buscando torná-los completamente impermeáveis ao ar. Portanto, não adianta separar com uma parede muito isolante duas salas contíguas, se o ruído pode ser transmitido por outros caminhos (pela estrutura, por exemplo, ou entrando e saindo por janelas abertas); materiais com muitos poros (concreto celular, tijolos vazados) transmitem muito mais do que um material maciço do mesmo peso; uma porta ou uma janela com diferente índice de enfraquecimento do resto da parede abaixam sensivelmente o isolamento global; forros falsos, leves, apoiados em paredes que não continuam até o teto ocasionam canais apropriados para a condução dos ruídos indesejados.

Costa (2003) destaca que no fenômeno de transmissão do som, em paredes simples, para aplicações práticas simplificadas, pode ser considerada apenas a parcela da irradiação por vibração da parede, porque ela é muito superior a outras formas de transmissão.

Chaves (1999) descreve que “o forro pode ser descrito como uma barreira utilizada no interior das edificações, entre a cobertura e os ambientes, com uma diversidade de funções como acabamento interior, isolamento térmico, absorções sonoras, delimitação espacial, ocultação de redes de instalação hidráulica ou elétrica, entre outros”.

*Figura 28 – Materiais para atenuação de ruído em edificações*





Fonte: [www.portalacustica.info](http://www.portalacustica.info) (2023).

*Figura 29 – Tratamento acústico de paredes*



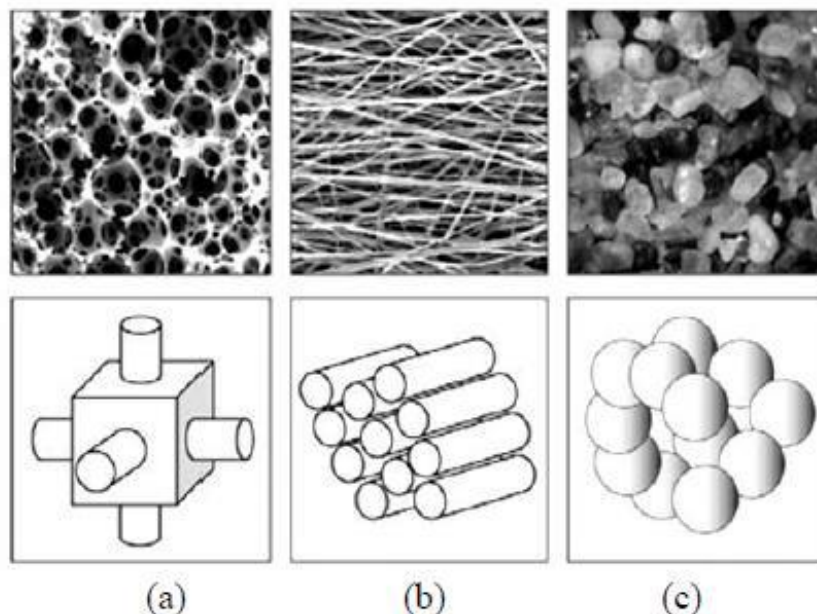
Fonte: [www.isover.com.br](http://www.isover.com.br) (2023).

De acordo com Bistafa (2011), os materiais para absorção sonora são, normalmente, porosos ou fibrosos. Para que o material tenha eficiência, é fundamental que se permita o fluxo de ar no meio absorvente e, consequentemente, a propagação da onda. Os materiais absorventes são leves e não possuem características estruturais.



Conforme Mareze (2013), os materiais porosos utilizados como absorvedores sonoros podem ser do tipo celulares (a), fibrosos (b) e granulares (c), conforme ilustrado na figura 30.

Figura 30 – Materiais porosos típicos

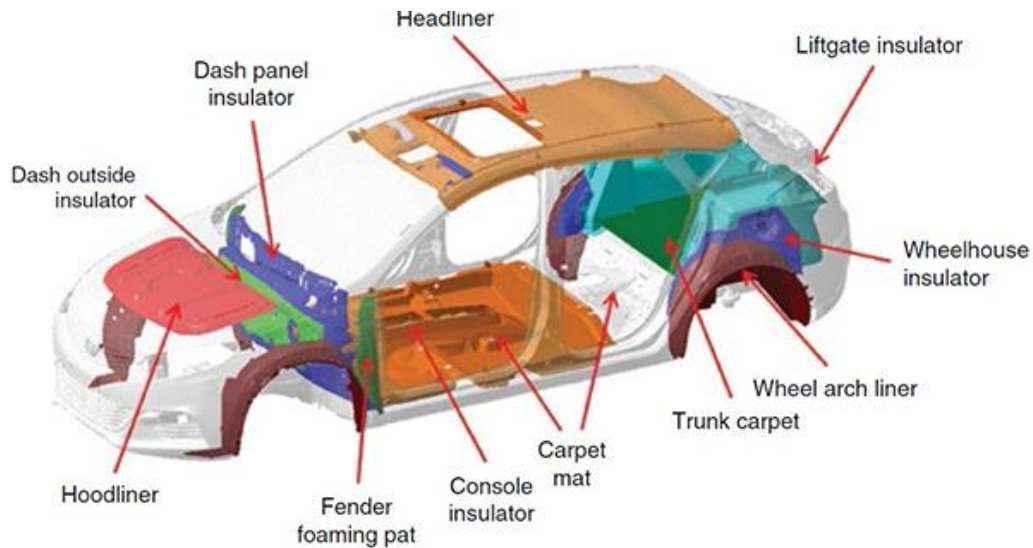


Fonte: Mareze (2013).

De acordo com Mareze (2013), as características acústicas são dadas pela composição, orientação e dimensão das fibras, bem como pela densidade e pela forma como as fibras são interconectadas. Segundo Bistafa (2011), um bom material absorvente de som permite que as partículas do ar penetrem e se movimentem em seu interior. Assim, uma propriedade fundamental dos materiais absorventes é a resistência ao fluxo de ar. A maximização da absorção sonora requer uma otimização da resistência ao fluxo.

Segundo Vigè (2010), a absorção sonora é amplamente utilizada para redução de ruído em veículos e são aplicados no interior do habitáculo, no vão motor, e até mesmo no exterior de veículos.

Figura 31 – Materiais para controle de ruído em automóveis



Fonte: [www.alphaacoustics.com](http://www.alphaacoustics.com) (2023).

Segundo Bistafa (2011), a variação de espessura e da densidade de um material absorvente de som modifica sensivelmente o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ).

Também em máquinas, a redução de ruído é um item importante. Este ruído pode ser um problema significativo em ambientes industriais, pois pode levar a problemas de saúde e segurança, reduzir a produtividade dos trabalhadores e causar danos à audição.

Existem várias técnicas usadas para reduzir o ruído de máquinas, tais como o enclausuramento, que consiste em fechar a máquina em um invólucro à prova de som. Isto pode ser feito usando materiais com propriedades de isolamento e absorção sonora. Outra forma consiste em instalar barreiras de ruído entre a máquina e o ambiente ao redor. Estas barreiras podem ser feitas de materiais tais como concreto, aço ou painéis acústicos.

Figura 32 – Enclausuramento de máquinas



Fonte: [www.isolamentoacusticosp.com.br](http://www.isolamentoacusticosp.com.br) (2023).

O isolamento de vibração da máquina é importante também para reduzir o ruído, instalando suportes de vibração/ choque ou almofadas anti-vibração sob a máquina.

*Figura 33 – Enclausuramento de máquinas*



**Fonte:** [www.logfer.com.br](http://www.logfer.com.br) (2023).

## REFERÊNCIAS:

BEDAQUE, P.; BRETONES, P.S. **Nível sonoro medido com aplicativos em aulas de física**. Física na escola, v. 17, n. 1, 2019.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 2. ed. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 2011.

BODDEN, M. **Instrumentation for sound quality evaluation**. Acta acustica, vol.83, 1997.

CHAVES, A. L. de O.: **Os Polímeros Utilizados como Subsídios na Construção Civil**. 1999. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Universidade de São Paulo. EESC/USP. São Carlos. 1999.

COSTA, E.C. da. **Acústica técnica**. 1. ed. São Paulo, SP: E. Blücher Ltda., 2003. 127p.

CROOME, D. J. **Noise, Building and People**. Loughborough University of Technology, Great Britain: Pergamon Press. International Series in heating, ventilation and refrigeration, v. 11. 1977. 613p.

GERGES, Samir N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. 2 ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.

GUEDES, Ítalo César Montalvão. **Influência da forma urbana em ambiente sonoro: um estudo no bairro Jardins em Aracaju (SE)**. Campinas, SP, 2005. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

LEVY-LEBOYER, Claude e NATUREL, **Neighbourhood noise annoyance**. Journal of Environmental Psychology. v. 11, p. 75-86. 1991.

MAREZE, P.H. **Análise da influência da microgeometria na absorção Sonora de materiais porosos de estrutura rígida**. 2013, 285 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

RIBEIRO, L. G. Ergonomia no ambiente construído – um estudo de casos em aeroportos. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Artes e Design. Rio de Janeiro – R.J, 2004.

SILVA, Helga Santos da & SANTOS, **Mauro Cesar de Oliveira. O Significado do Conforto no Ambiente residencial**. PROARQ 18 p. 138-151, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SCHMID, A. **A ideia de conforto: reflexões sobre o ambiente construído**. Curitiba, Pacto Ambiental, 2005.

POLL, J.B., **Análise da isolamento acústica em parede de habitação popular executada com resíduos de pneus**, 2009, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.