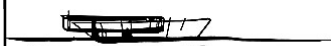


Universidade de São Paulo
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Departamento de Tecnologia da Arquitetura



AUT0278 - Desempenho Acústico, Arquitetura e Urbanismo



Som



e-mail: aut278.2018@gmail.com

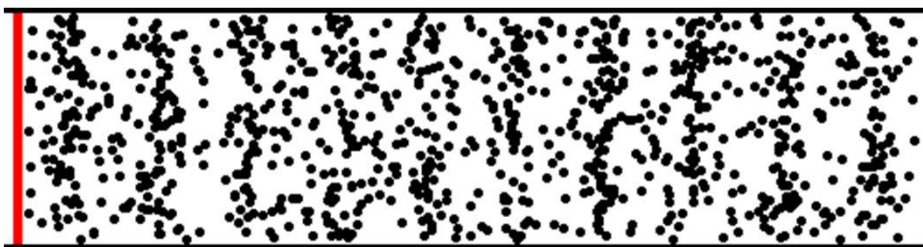
Som

- **Senso Comum**
 - Som é tudo aquilo que ouvimos.



Som

- Percepção da vibração de um meio gerada por uma fonte e propagada no meio até um ouvinte.
- O som propaga-se no meio através da vibração de partículas do meio em torno da posição de equilíbrio.



- O que gera o som? Uma fonte sonora.
- Muitos corpos podem servir de fonte sonora, para isto eles precisam ser capazes de vibrar ou oscilar.

Onda sonora

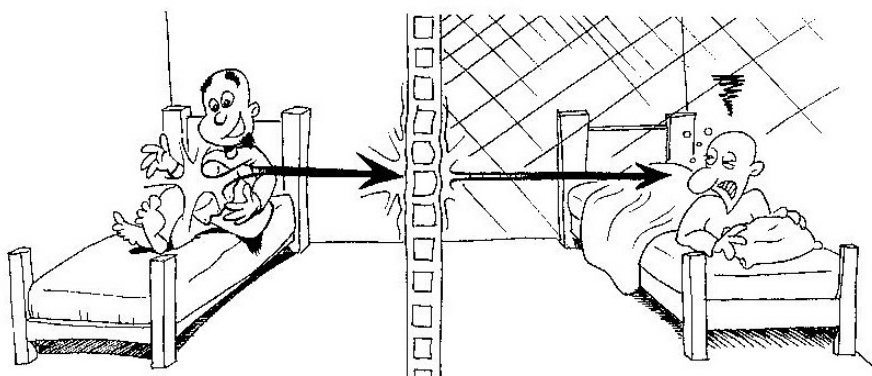
- É mecânica – O som requer um meio para propagar (sólido, líquido ou gasoso).
- É tridimensional.



Ex.: água superficial de uma lagoa, quando tocada, gera ondas – espaços de pressão e depressão.

Onda sonora

- O som pode ser percebido entre ambientes, por menor que seja a vibração.



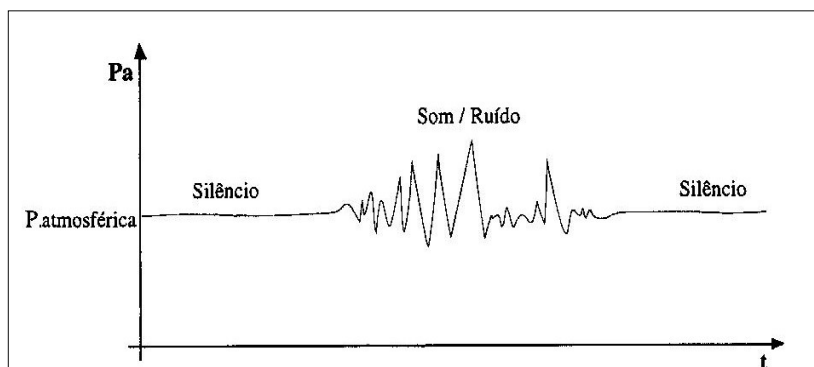
Som

O som se propaga no vácuo?



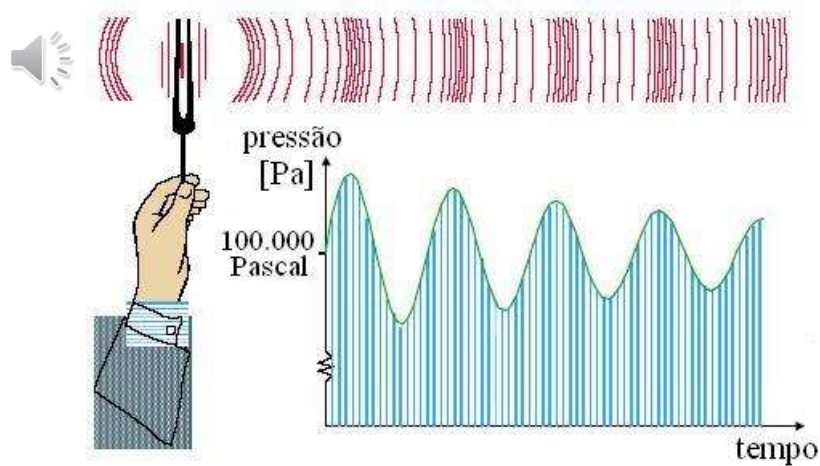
Som

- Som no ar pode ser definido como uma variação da pressão em relação à pressão atmosférica detectável pelo sistema auditivo.



- A menor variação de pressão detectável pelo ouvido humano é da ordem dos 2×10^{-5} Pa, ou seja, 0,00002 Pa.

Som



Características do Som

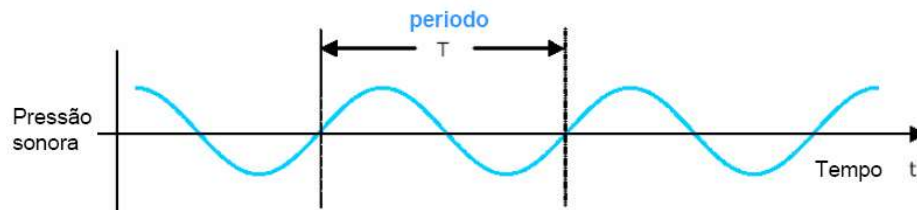
- A onda sonora se caracteriza por alguns **parâmetros**:
 - Período
 - Frequência
 - Amplitude
 - Comprimento de Onda
 - Velocidade de Propagação do Som

- **Período (T) [s]**

- Tempo de duração de um ciclo das partículas (em segundos).

Onda plana

- Se olharmos para uma posição fixa no espaço a pressão varia com o tempo:

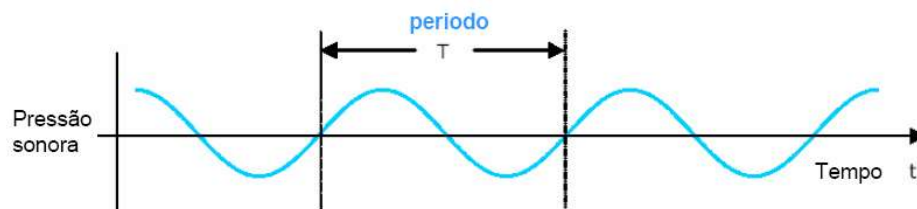


- É o inverso da frequência.

$$T = \frac{1}{f} \text{ [s]}$$

- **Frequência (f) [Hz]**

- Número de ciclos que as partículas realizam em um segundo.
- É a taxa pela qual a fonte sonora vibra em Hz (ciclos por segundo).

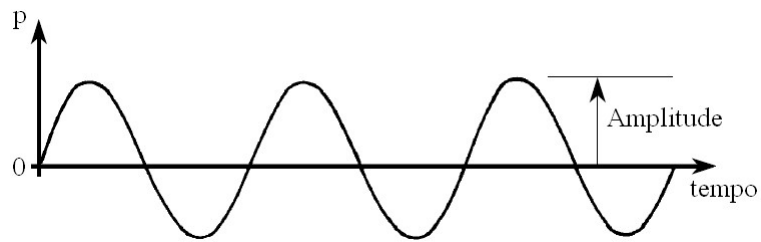


- É o inverso do período.

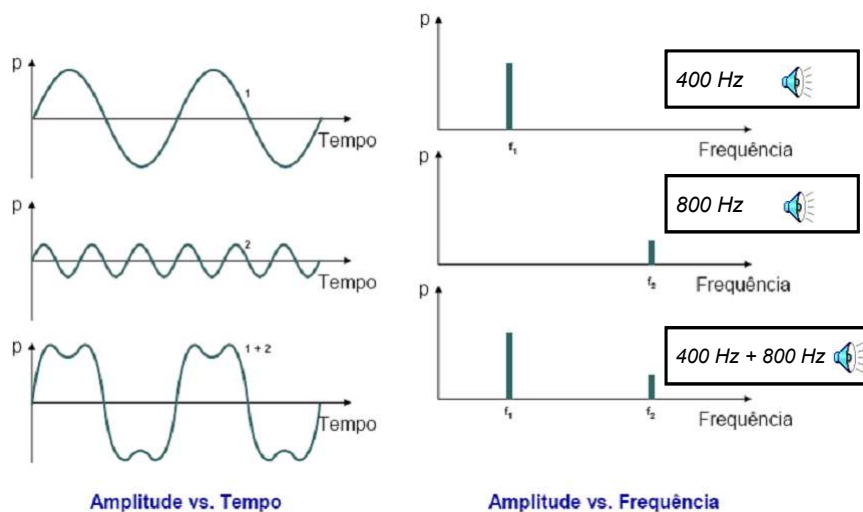
$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

- **Amplitude**

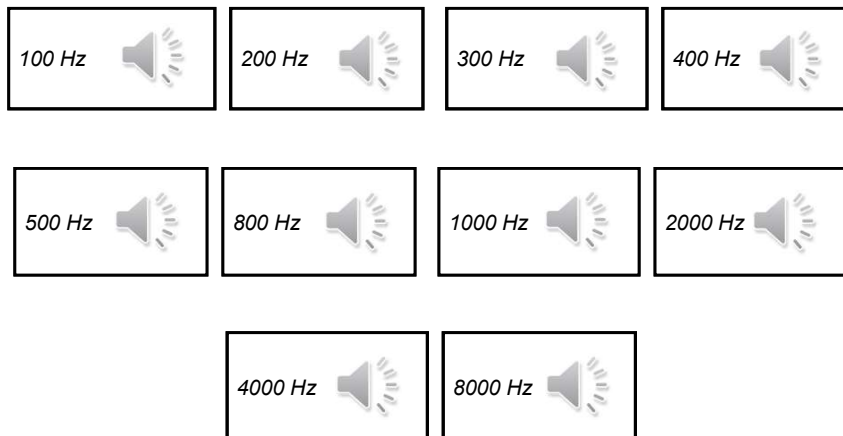
- É a medida do afastamento das partículas de sua posição de equilíbrio.



- **Amplitude, tempo e frequência:**



• Frequência

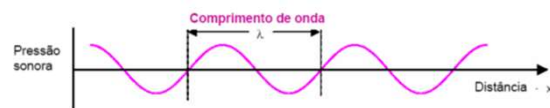


• Comprimento de onda (λ) [m]

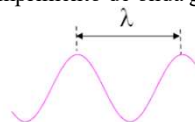
- Distância que o som percorre durante um período (ciclo).

Onda plana

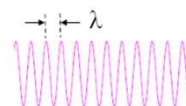
- Se pararmos o tempo e olharmos a pressão variar no espaço:



- Comprimento de onda grande



- Comprimento de onda pequeno



- Todo som, simples ou complexo, pode ser caracterizado por seu comprimento de onda.

- **Velocidade de propagação do som**

- Varia de acordo com o meio de propagação. Alguns exemplos:

• Ar seco (a 20°C)	345 m/s
• Ar úmido (70% a 20°C)	347 m/s
• Vapor d'água	405 m/s
• Água (líquida)	1.434 m/s
• Água do mar	1.504 m/s
• Rochas, alvenarias	2.500 m/s
• Madeira	4.000 m/s
• Aço	4.990 m/s
• Vidro	5.000 m/s

- Quanto mais denso,?..... a velocidade.

- **Velocidade de propagação do som**

- Quanto mais denso, **maior** a velocidade.



- **Velocidade de propagação do som (c)** [m/s]

- A onda sonora é propagada na velocidade do som c :

$$c = \lambda f$$

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

Onde:

λ é o comprimento de onda, em m.

T é o período, em s.

f é a frequência, em Hz.

- **Velocidade de propagação do som**

- Depende da elasticidade do meio de propagação.
- Pode ser descrita, segundo a fórmula:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade (*Young*) do meio de propagação.

ρ é a densidade do meio de propagação.

- **Velocidade de propagação do som**

- Depende da temperatura e da umidade do meio de propagação.
- No ar, ela varia com a temperatura, conforme a fórmula:

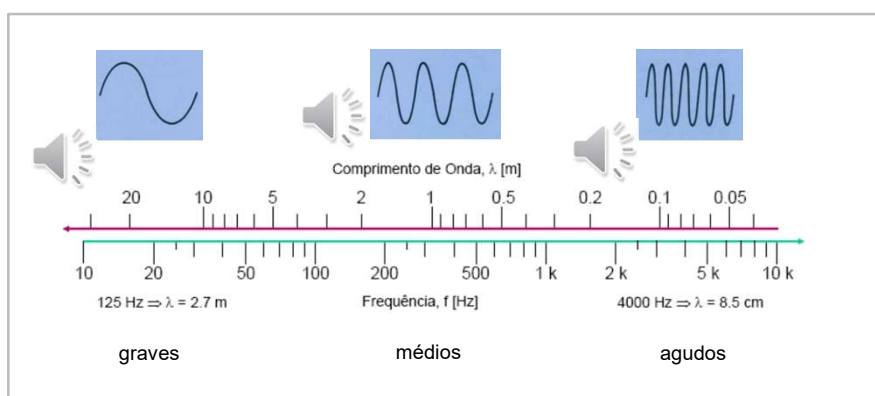
$$c = 331,40 + 0,607t$$

Onde:

t é a temperatura em °C.

- Quanto maior a temperatura,?..... a velocidade.

- **Comprimento de onda e Frequência**



- Quanto mais alta a frequência, menor o comprimento de onda e vice-versa.

- Geralmente consideram-se os comprimentos de onda sonora no ar, adotando $c = 340$ m/s.

Exemplo 1:

Calcule os valores dos comprimentos de onda em função da frequência para os seguintes valores de frequências:

f (Hz)	20	50	100	200	500	1000	2000	4000
λ (m)	?	?	?	?	?	?	?	?

$$c = \lambda f \qquad \lambda = \frac{c}{f}$$

f (Hz)	20	50	100	200	500	1000	2000	4000
λ (m)	17,0	6,8	3,4	1,7	0,68	0,34	0,17	0,085

Exemplo 2:

O ruído de um mosquito é produzido quando ele bate as asas a uma média de 550 batimentos por segundo. 

- Qual é a frequência em Hz da onda sonora?
- Assumindo que a onda sonora se move com uma velocidade de 340 m/s, qual é o comprimento de onda do som?

a) 550 ciclos por segundo

$$f = 550 \text{ Hz}$$

b) $c = 340$ m/s

$$c = \lambda f$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{550} = 0,618 \text{ m} \approx 62 \text{ cm}$$

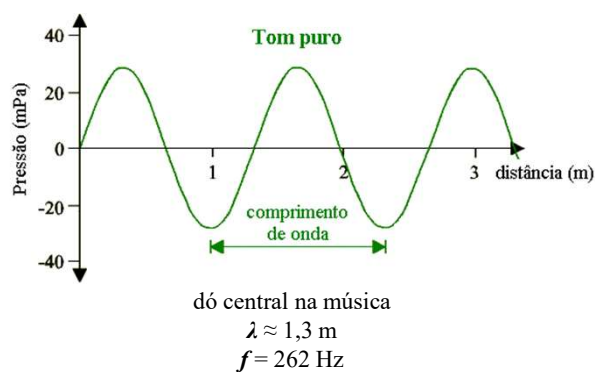
Tipos de Som

Som puro



• Som simples ou puro

- Uma nota emitida por um instrumento musical simples, ex: diapasão.
- Apresenta forma de uma curva periódica, regular, senoidal.
- Toda energia numa única frequência.



• Sons complexos

- São emitidos pela maioria dos instrumentos musicais.
- Som resultante da contribuição de várias frequências simultâneas.
- Maioria dos sons.

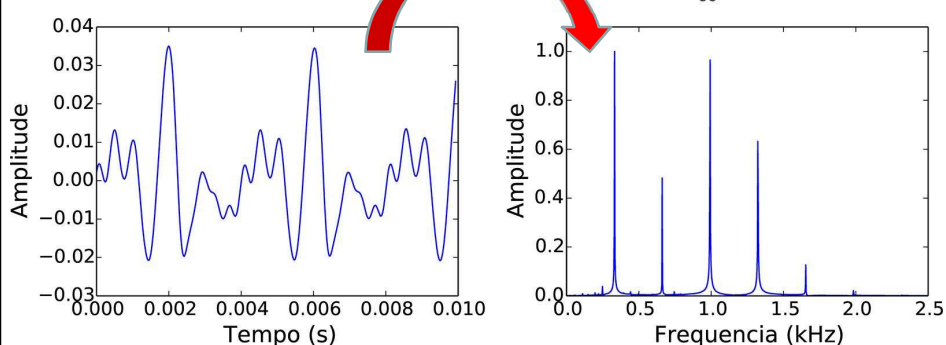


- Qualquer som pode ser construído adicionando ondas senoidais de diferentes amplitudes, frequências e tempos iniciais.

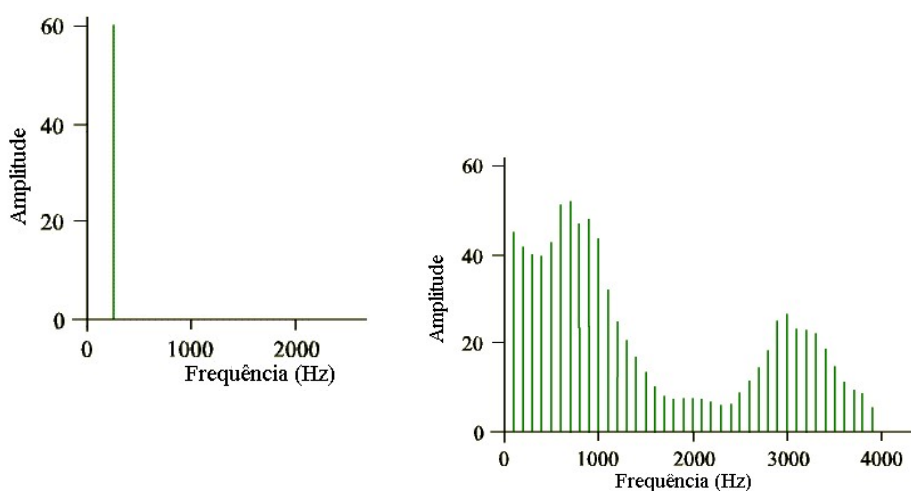
- Análise espectral: análise da forma de onda em suas componentes senoidais.

- Método de Fourier - permite que qualquer forma de onda possa ser decomposta, ou analisada, num conjunto de amplitudes e frequências das ondas senoidais que a compõem.

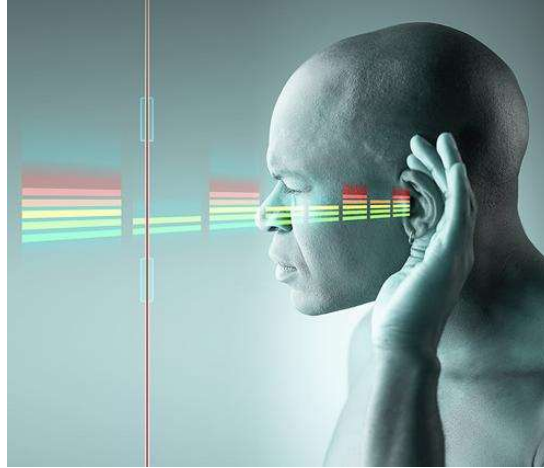
$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot e^{-i\omega t} dt$$



- Espectro de frequência: uma representação da distribuição da energia sonora entre várias frequências; o gráfico da amplitude de cada componente de onda senoidal contra sua frequência.



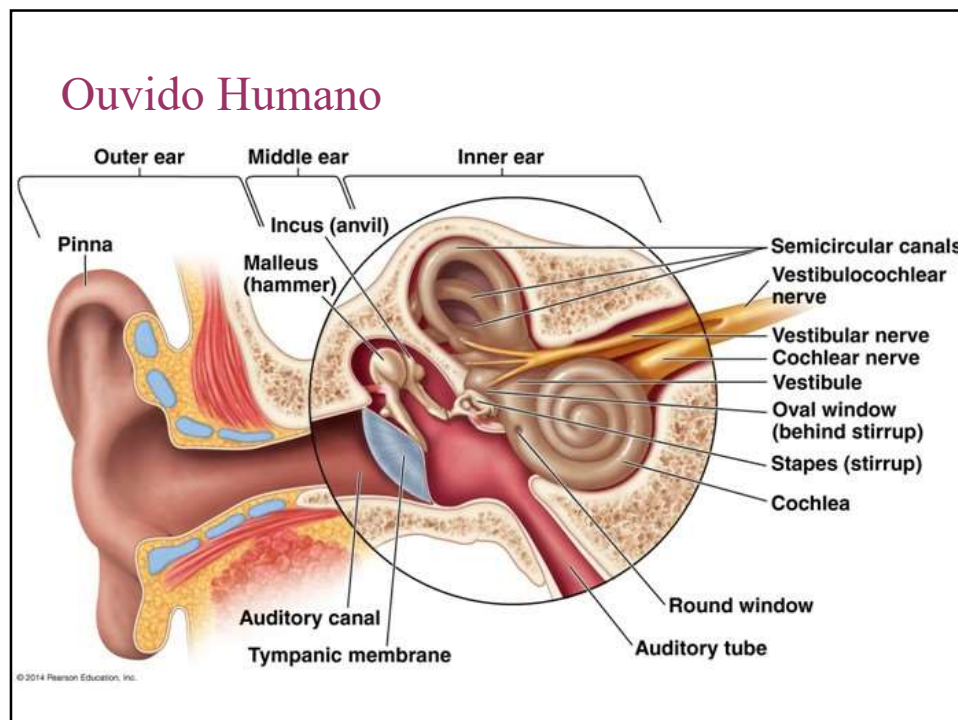
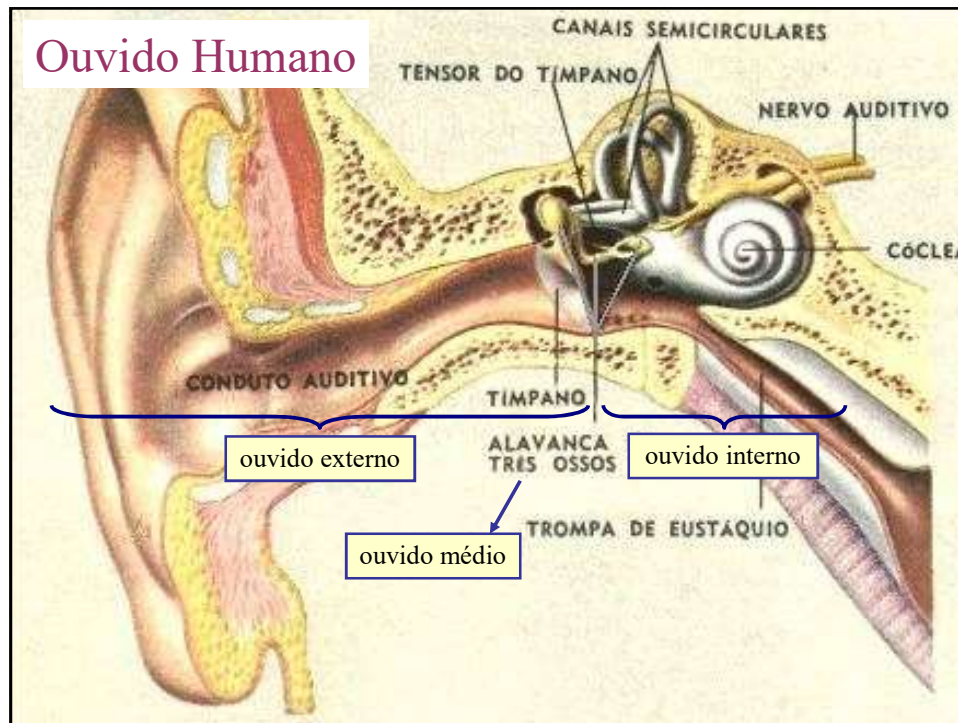
- Mas como nós ouvimos?
- Que frequências nós ouvimos?
- Como nosso ouvido se comporta?



Ouvido Humano

- Sistema sensível, delicado, completo e discriminativo
- Permite perceber e interpretar o som
- Transdutor – transforma som (vibração) em sinais elétricos
- Pode ser dividido em três diferentes partes:
 - Ouvido Externo
 - Ouvido Médio
 - Ouvido Interno





• Ouvido Externo

- Composto por 3 elementos – pavilhão, tubo ou canal auditivo e tímpano.
- Pavilhão – (ouvido visível – orelha) – forma afunilada para captar os sons.
- Tímpano (membrana timpânica, côncava) – as ondas sonoras o atingem e o fazem vibrar – transforma ondas sonoras em vibrações mecânicas.



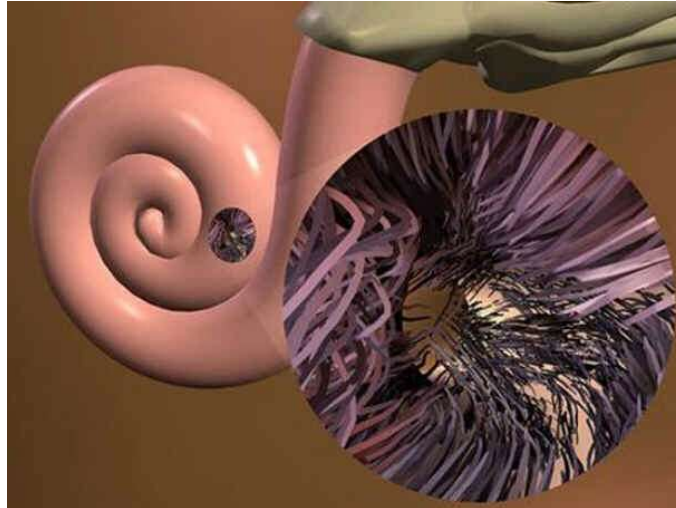
• Ouvido Médio

- Composto por 3 ossículos (martelo, bigorna e estribo), janela oval, janela circular e Trompa de Eustáquio.
- A vibração do tímpano é transmitida e amplificada ao longo dos ossículos, que também vibram.
- Contém importantes elementos para proteger o sistema de audição:
Trompa de Eustáquio – iguala a pressão dos dois lados do tímpano de forma automática e fornece oxigênio ao ouvido médio.



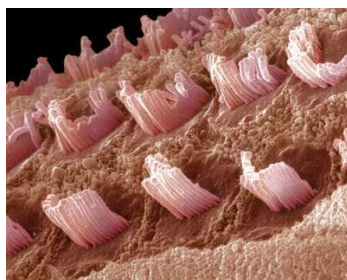
- **Ouvido Interno**

- Cóclea (caracol)
- cavidade em forma de espiral que contem um fluido e as células ciliadas.



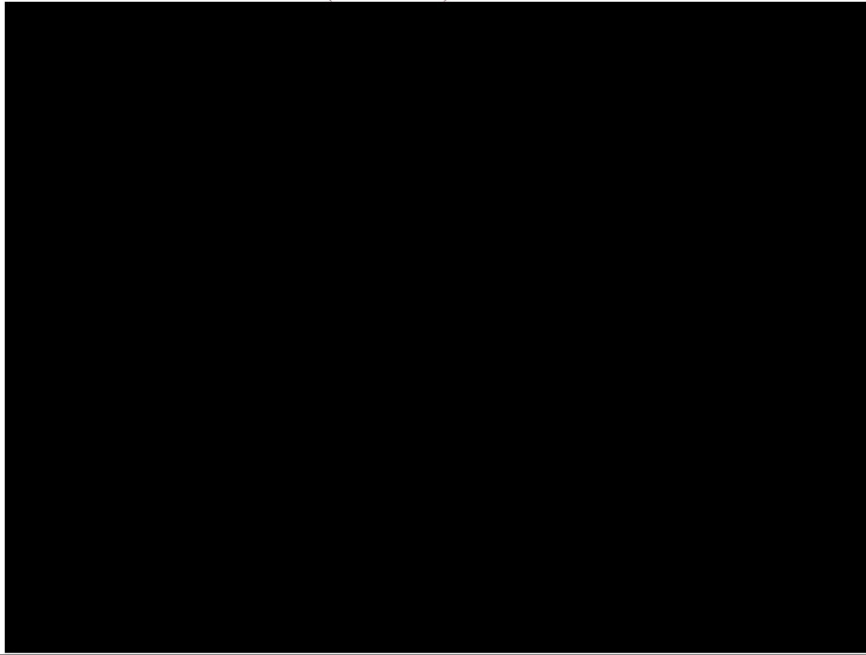
- **Ouvido Interno**

- Cóclea (caracol)
- 15000 células ciliadas – estimuladas pelas mudanças de pressão do líquido na cóclea, geram uma corrente elétrica que vai até o nervo auditivo.



- Nervo auditivo – transmite as informações (fluxo nervoso) até o cérebro.
- Canais semicirculares – manutenção do equilíbrio do corpo (informam ao cérebro sobre os movimentos da cabeça).

Ouvido Humano (vídeo)



- **Percepção espacial do som**

- É possível por termos dois ouvidos.
- Diferença de tempo e de intensidade que o som chega em um ouvido ou no outro.



- Informa a direção de chegada do som –
– localização ou direção da fonte.

- **Intensidade:**

- Está relacionado com a **amplitude** sonora, a pressão efetiva e a energia transportada.
- Esta grandeza é popularmente conhecida como **volume**.
- Permite classificar o som de fraco a forte (sons fracos / sons fortes).
- Decresce com a distância da fonte sonora.



- **Altura:**

- Está relacionada com a **frequência** da onda sonora (não à intensidade sonora).
- Permite classificar o som de grave a agudo (sons graves / médios / agudos).
- Usada quando se refere à música.



Grave



Médio



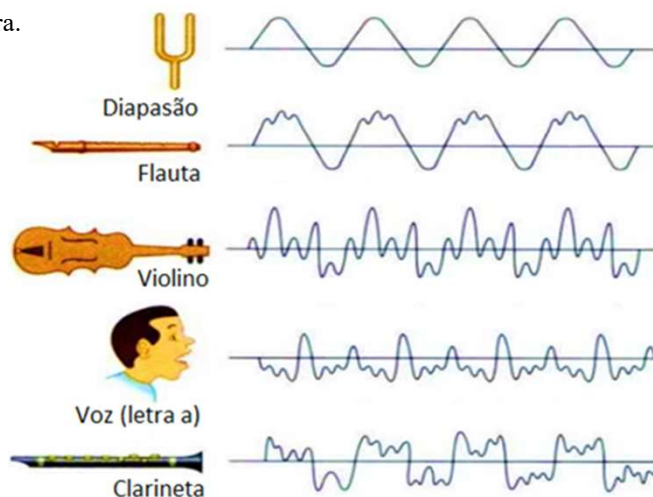
Agudo

Menor Frequência
Maior Comprimento de onda

Maior Frequência
Menor Comprimento de onda

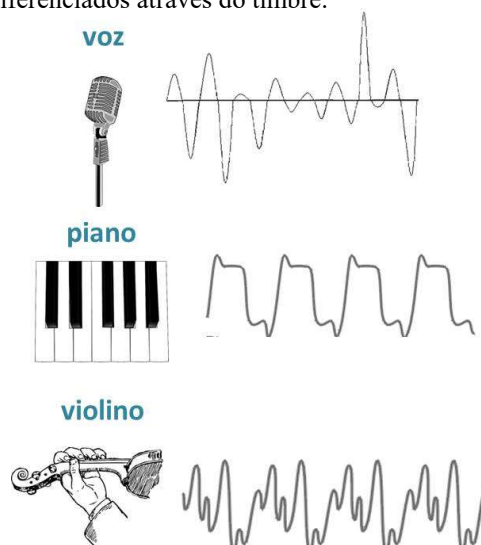
- **Timbre:**

- Característica da **fonte sonora**, e não do som.
- Permite diferenciar a fonte sonora.
- As ondas sonoras apresentam formatos diferentes que dependem da fonte emissora.



- **Timbre:**

- Quando sons possuem mesma frequência (altura) e intensidade, eles ainda podem ser diferenciados através do timbre.



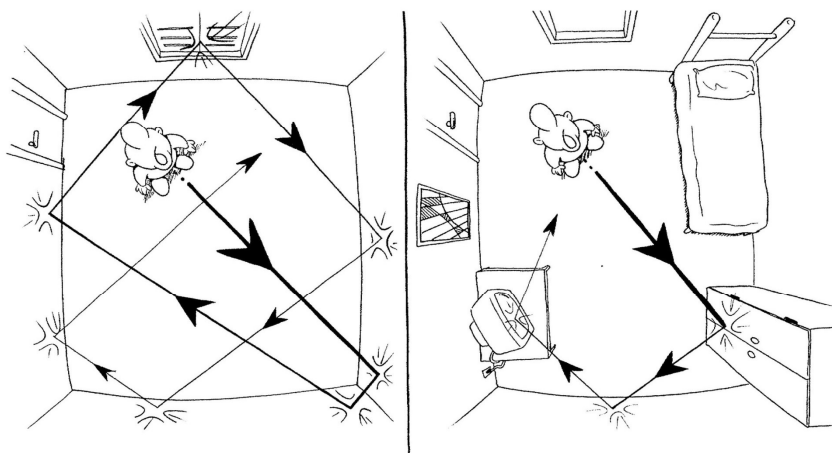
- **Inteligibilidade**

- Grau de compreensão da fala.
- Principal característica acústica de um ambiente;
- Reflete o grau de entendimento das palavras em seu interior;
- Locais onde a comunicação é primordial, a inteligibilidade é fator decisivo.



- **Inteligibilidade**

- pessoas e mobiliário – som passa a ser absorvido por estes facilitando a inteligibilidade.



- **Inteligibilidade**

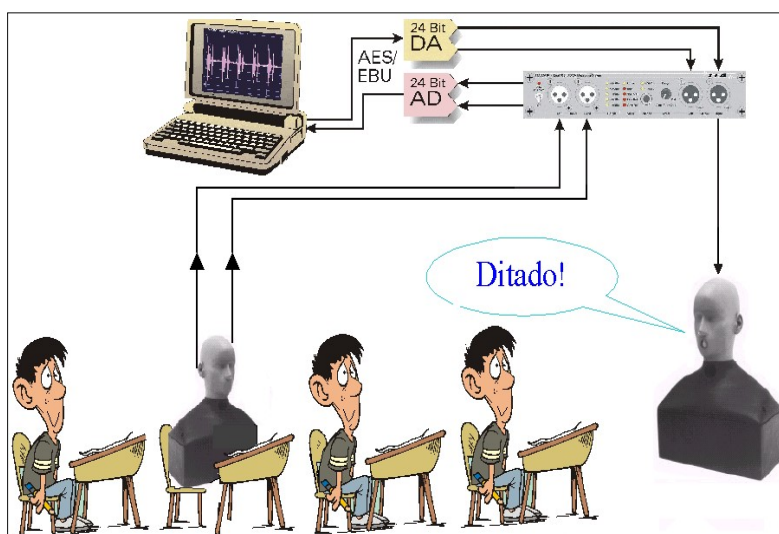
- Testes de inteligibilidade da palavra:
- Ditado!



Sala de aula

- **Inteligibilidade**

- Testes de inteligibilidade da palavra.



- **Privacidade**

- Depende de ouvir e ser ouvido, compreendendo a mensagem falada.
- Depende do tipo de atividade realizada em um ambiente e do tipo de informação a ser ou não ouvida por outras pessoas no mesmo ou em outro ambiente.
 - Conversação – sem necessidade de sigilo.
 - Concentração – atividades que requerem concentração e algum sigilo.
 - Contemplação – confidencial.



- **Mascaramento**

- Sobreposição de sons: Dois ou mais sons atingem ao mesmo tempo no mesmo ambiente e se “embaralham”, dificultando sua identificação.
- Sons de baixa frequência mascaram muito mais facilmente os sons de alta frequência, do que o contrário.
- O som de maior intensidade sobrepõe-se ao de menor intensidade.



- **Mascaramento**



- Em algumas situações um razoável ruído de fundo pode ser útil, para por exemplo:
 - mascarar sons indesejáveis. - minimizar o efeito de ruídos intrusivos.



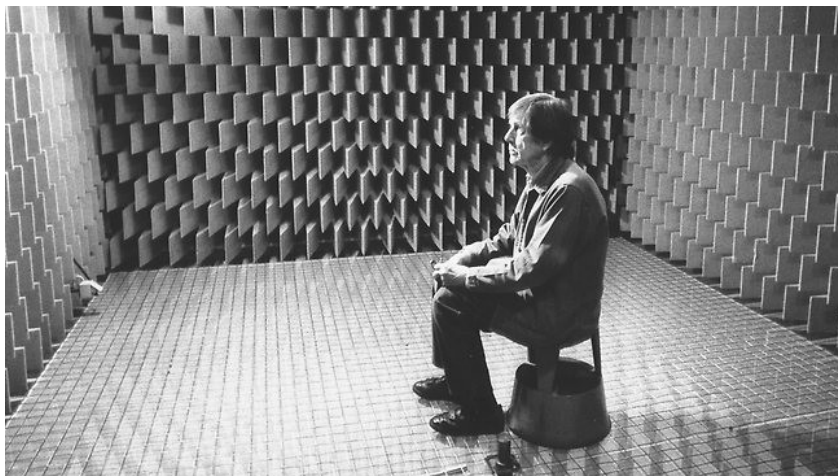
- **Mascaramento**

- mascarar o diálogo, mantendo a privacidade do mesmo em grandes ambientes.



- **Mascaramento**

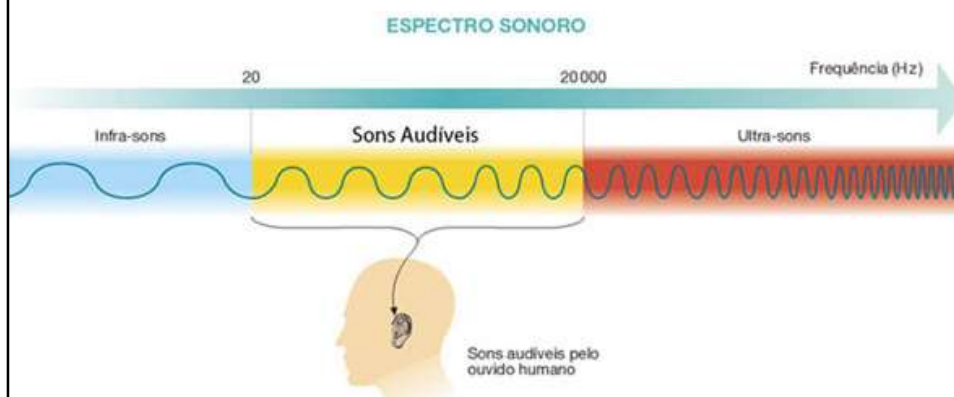
- manter a sanidade das pessoas: os humanos não conseguem tolerar silêncio absoluto num ambiente perfeitamente à prova de som (sem ruído).



Faixa de Audição Humana e Sensibilidade

- O som audível varia conforme a intensidade e a frequência.

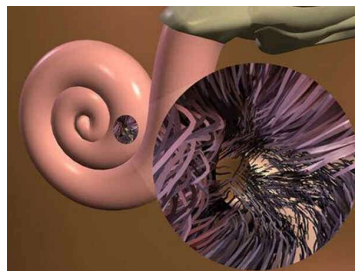
 sweep de 20 a 20 kHz



- **Percepção das frequências:**

- Até chegarem às células ciliadas na cóclea:
 - Ondas sonoras percorrem distâncias diferentes, com diferentes tempos de atraso.

- Distinção das frequências.



- Sons agudos: estimulam as células ciliadas próximas a entrada da cóclea – ondas sonoras percorrem distâncias menores.
- Sons graves: estimulam as células situadas mais no interior da cóclea – ondas sonoras percorrem distâncias maiores.

- **Resposta do ouvido em relação à frequência**



- A sensibilidade do ouvido é limitada, não percebendo todas as frequências de igual maneira. Ou seja, o ouvido não é igualmente sensível para todas as frequências:
50 dB em 100 Hz não soa tão alto quanto 50 dB em 500 Hz.
- Sons com o mesmo nível de intensidade e frequências diferentes não são percebidos como se fossem igualmente intensos.

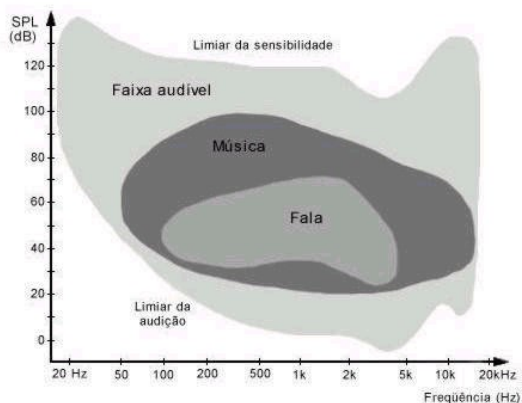
- **Resposta do ouvido em relação à frequência**

- Sensibilidade auditiva máxima - sons de frequências ≈ 4000 Hz.
- Sensibilidade diminui nas frequências mais altas e atenua-se fortemente e especialmente nas frequências baixas.

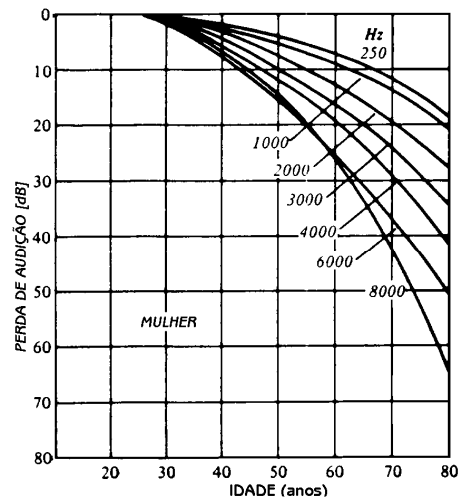
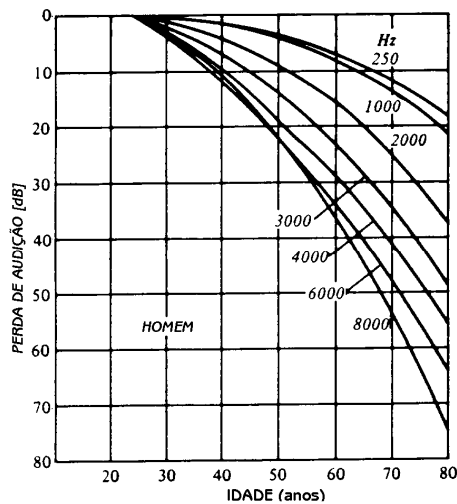


- **Gráfico de Audibilidade:**

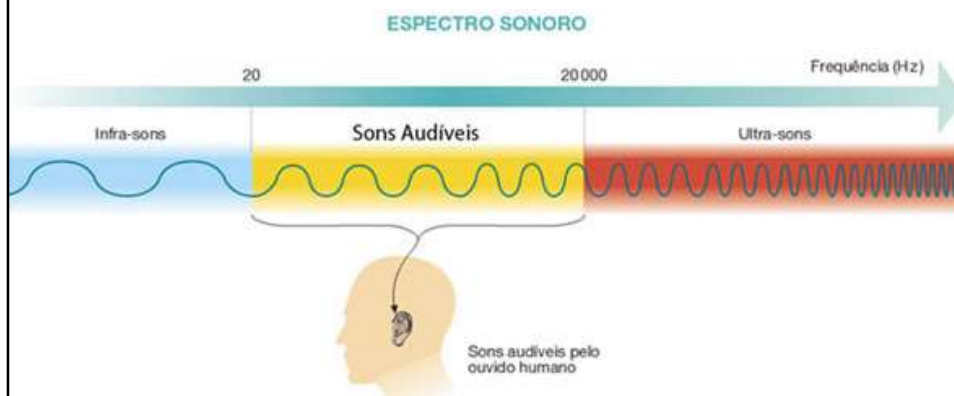
- Faixa de frequências e de níveis em decibels audíveis
- Percepção média de indivíduos com percepção normal
- Escala logarítmica
 - Limiar da audição (percepção) $\rightarrow$ Nível 0 dB para 1000 Hz.
 - Limiar da dor $\rightarrow \pm 120$ dB



- Variações médias no limiar da audição com a idade para tons puros



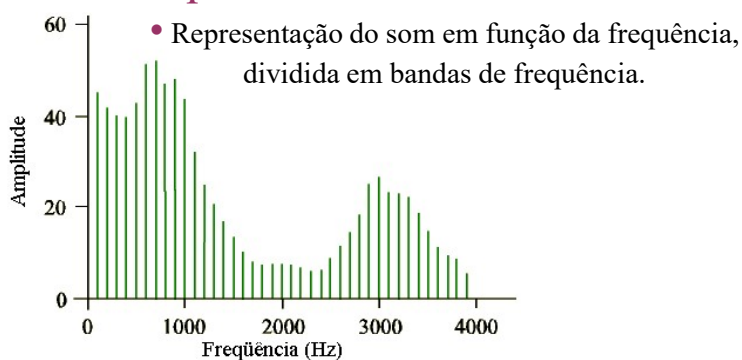
Faixa de frequência audível



Faixa de frequência audível

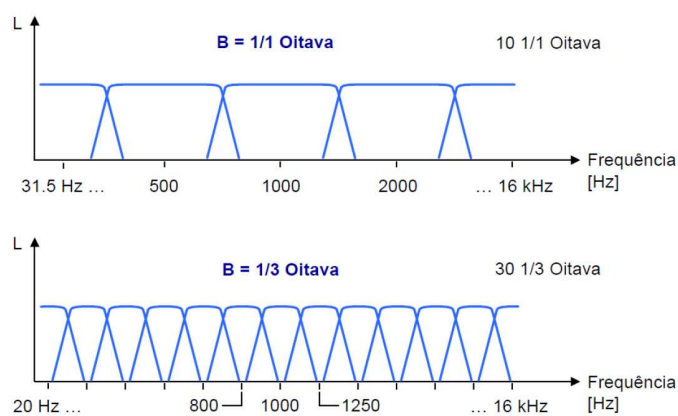
- Como é uma faixa de frequência muito grande, para padronizar as medições, surgiram as...

Bandas de frequência



Bandas de frequência

- Representação do som em função da frequência, dividida em bandas de frequência.



Bandas de oitava

Frequência Central [Hz]
125
250
500
1000
2000
4000

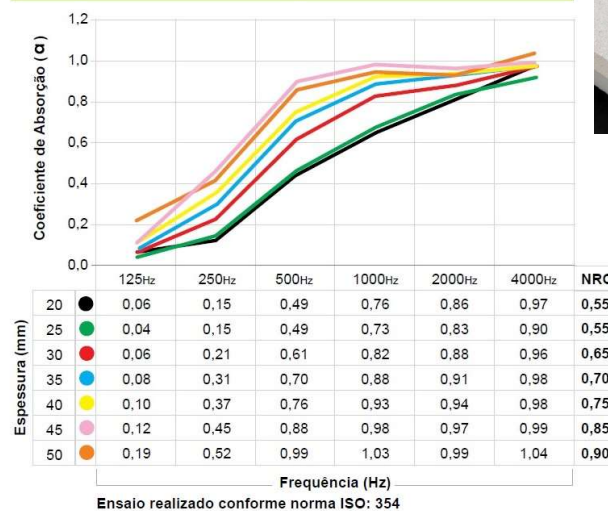
Bandas de terço de oitava

Frequência Central [Hz]
100
125
160
200
250
315

400
500
630
800
1000
1250
1600
2000
2500
3150
4000
5000

Absorção do material x Banda de oitava

Coefficientes de Absorção Sonora

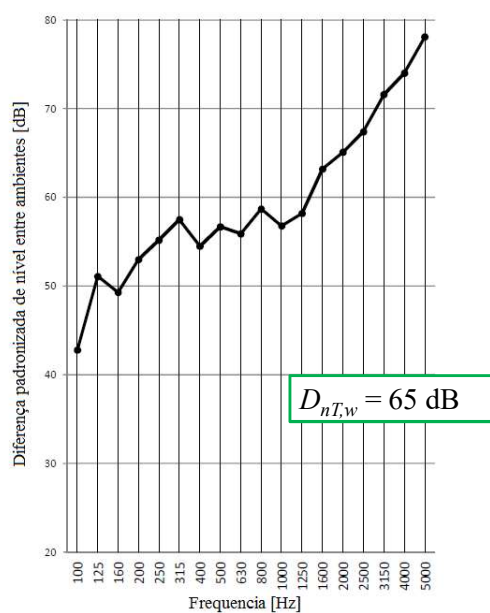


Absorção do material x Banda de oitava

Material					Frequência central da banda de oitava (Hz)						NRC	
					125	250	500	1.000	2.000	4.000		
Fibroso	Isover - Santa Marina Placa de lã de vidro aglomerado	Densidade (kg/m ³)	30	Espessura (mm)	25	0,08	0,27	0,50	0,87	0,98	1,04	0,66
					50	0,17	0,62	0,90	1,08	1,07	0,97	0,92
		60	25	0,05	0,27	0,68	0,94	1,03	1,05	0,73		
			50	0,13	0,75	0,96	1,03	0,88	0,96	0,91		
	Thermax - RockFibras Manta de lã de rocha basáltica	Densidade (kg/m ³)	32	Espessura (mm)	50	0,35	0,48	0,74	0,88	0,91	0,96	0,75
					100	0,85	0,98	1,10	1,11	1,09	1,18	1,07
		64	50	0,50	0,59	0,91	1,05	1,06	1,06	0,90		
			100	0,87	1,23	1,19	1,15	1,12	1,10	1,17		
Poroso	Espumex - Acústica São Luiz Espuma flexível de poliuretano poliéster incombustível			Espessura (mm)	40	0,06	0,19	0,38	0,52	0,48	0,65	0,39
					60	0,10	0,28	0,49	0,53	0,47	0,82	0,44
					70	0,15	0,42	0,75	0,74	0,66	0,95	0,64
					75	0,15	0,50	0,90	0,99	1,00	1,00	0,85
	Sonex - Ilbruck Espuma flexível de poliuretano poliéster (com retardadores de chama) Densidade: 32 kg/m ³			Espessura (mm)	20	0,04	0,12	0,28	0,44	0,60	0,73	0,36
					35	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89	0,58
					50	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01	0,72
					75	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00	0,85

Isolamento x Banda de terço de oitava

Frequência (Hz)	D_{nT} (dB)
100	42,8
125	51,1
160	49,3
200	53,0
250	55,2
315	57,5
400	54,5
500	56,7
630	55,9
800	58,7
1000	56,8
1250	58,2
1600	63,2
2000	65,1
2500	67,4
3150	71,6
4000	74,0
5000	78,1



Isolamento x Banda de oitava

Componente Construtivo	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz
Parede de tijolo maciço (480kg/m ²)	41	45	48	53	57
Parede de tijolo maciço (260kg/m ²)	32	41	48	51	52
Janela de vidro simples 4mm	19	22	25	28	27
Janela de vidro simples 6mm	21	25	27	31	25
Porta simples oca, sem vedação	12	13	14	16	18
Porta com recheio, 25kg/m ² , sem vedação	16	20	20	21	19
Porta com recheio, 25kg/m ² , com vedação	20	24	27	28	31
Telhado com forro (telhas de barro e estuque 9mm)	21	26	33	32	35