



INSTITUTO FEDERAL
Santa Catarina
Câmpus São José

Introdução às Ondas Sonoras

Fundamentos da Acústica — Aula 02

Seções 19.1, 19.2, 19.3 — Cap. 19 / Ramalho

Prof. Humberto L. Oliveira — IFSC/Câmpus São José

Origem e Natureza das Ondas Sonoras

Definição Fundamental

As ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais que necessitam de um meio elástico (sólido, líquido ou gasoso) para se propagarem.

Como se trata de um processo puramente mecânico de transferência de energia através de colisões moleculares, o som não pode se propagar no vácuo.

O Mecanismo de Propagação

- **Fontes Vibrantes:** Qualquer corpo que vibre (como as cordas de um violão ou a membrana de um alto-falante) empurra as moléculas de ar adjacentes.
- **Compressão:** Regiões onde há acúmulo temporário de moléculas de ar, resultando em maior densidade e pressão.
- **Rarefação:** Regiões onde as moléculas se afastam, resultando em menor densidade e pressão local.
- **Perturbação Periódica:** A alternância contínua entre zonas de compressão e rarefação se desloca pelo meio material como uma onda de pressão.

Espectro e Limites das Frequências Sonoras

INFRASSOM

< 20 Hz

Frequências abaixo do limite inferior da audibilidade humana. Produzidas por grandes massas físicas.

- Fontes: Abalos sísmicos, vulcões, ventos.
- Percepção: Elefantes, cavalos e cães conseguem detectar essas ondas.

SOM AUDÍVEL

20 Hz – 20 kHz

Faixa de frequências capaz de sensibilizar o sistema auditivo humano de um indivíduo normal.

- Limites convencionais que variam de acordo com a idade e saúde auditiva.
- Principal espectro da comunicação humana e da música.

ULTRASSOM

> 20.000 Hz

Frequências acima do limite superior audível humano. Comprimentos de onda curtíssimos.

- Percepção: Morcegos (ecolocalização), cães, gatos.
- Aplicação: Ultrassonografia diagnóstica e testes industriais.

A Velocidade do Som nos Diferentes Meios

Por que a velocidade varia?

Como o som se propaga por choques entre moléculas, a velocidade depende fundamentalmente da densidade e da elasticidade do meio.

- Meios Sólidos: As moléculas estão muito próximas, permitindo uma transmissão de pressão quase instantânea.
- Meios Gasosos: Moléculas afastadas exigem colisões mais demoradas para transferir a energia ondulatória.

Regra de Ouro da Acústica:

$$v_{\text{sólidos}} > v_{\text{líquidos}} > v_{\text{gases}}$$

Meio	Estado Físico	Velocidade
Ar (a 15 °C)	Gasoso	340 m/s
Água (a 15 °C)	Líquido	1.450 m/s
Ferro (a 15 °C)	Sólido	4.480 m/s

Temperatura, Velocidade e a Barreira do Som

Efeito Térmico nos Fluidos

O aumento de temperatura em gases e líquidos aumenta diretamente a agitação térmica de suas moléculas. Como consequência, as colisões mecânicas ocorrem mais rapidamente, elevando a velocidade de propagação do som.

- No ar a 0 °C: $v_{\text{som}} \approx 331 \text{ m/s}$.
- No ar a 15 °C: $v_{\text{som}} \approx 340 \text{ m/s}$ (padrão de referência).
- No ar a 20 °C: $v_{\text{som}} \approx 343 \text{ m/s}$.

O Número de Mach e Ondas de Choque

- Número de Mach: Relação adimensional entre a velocidade de um objeto (v) e a velocidade do som no meio (v_{som}).

$$\text{Mach} = v / v_{\text{som}}$$

- Barreira do Som: Ao atingir Mach 1, as frentes de onda de pressão emitidas pela aeronave se acumulam em seu nariz, criando uma muralha de ar comprimido extremamente densa.
- Estrondo Sônico (Sonic Boom): Ao ultrapassar Mach 1, as frentes de onda se sobrepõem formando um cone de onda de choque, percebido no solo como uma forte explosão.

Qualidades Fisiológicas: Altura

O que é Altura?

É a qualidade fisiológica que nos permite diferenciar sons graves (baixos) de sons agudos (altos). Ela depende unicamente da frequência da onda sonora.

- Sons Graves: Frequências baixas (ex: contrabaixo, voz masculina grossa, trovão).
- Sons Agudos: Frequências altas (ex: flauta, voz feminina fina, apito).

Intervalos Musicais

O intervalo musical entre duas frequências f_1 e f_2 é definido pelo quociente:

$$i = f_2 / f_1$$

- Uníssono: $i = 1$ ($f_2 = f_1$). Sons têm a mesma altura.
- Oitava: $i = 2$ ($f_2 = 2 * f_1$). Relação fundamental na escala.
- Tonalidades Naturais: O tom maior ($i = 9/8$), tom menor ($i = 10/9$), semitom ($i = 16/15$) e o sustenido ($i = 25/24$) definem a escala diatônica de dó maior.

Qualidades Fisiológicas: Intensidade Física

Intensidade e Energia

A intensidade auditiva (ou sonoridade) diferencia sons fracos de sons fortes. Ela está diretamente ligada à energia transportada pela onda e à sua amplitude de vibração.

- Som Forte: Alta amplitude, alta energia.
- Som Fraco: Baixa amplitude, baixa energia.

A intensidade física I é a potência (Pot) que atravessa uma área perpendicular (A):

$$I = \text{Pot} / A \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Limiares de Percepção Humana

O ouvido humano responde a uma faixa colossal de intensidades, cobrindo 12 ordens de magnitude.

- Limiar de Audição (I_0):

A menor intensidade física que sensibiliza um ouvido humano saudável:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \text{ (ou } 10^{-16} \text{ W/cm}^2\text{)}$$

- Limiar da Dor (I_{max}):

A máxima intensidade suportável sem causar danos físicos imediatos:

$$I_{\text{max}} = 1 \text{ W/m}^2 \text{ (ou } 10^{-4} \text{ W/cm}^2\text{)}$$

Nível Sonoro (dB) e Saúde Auditiva

Escala Logarítmica de Percepção

A resposta auditiva humana não é linear, mas sim aproximadamente logarítmica. Por isso, o nível sonoro (d) é expresso em decibéis (dB):

$$d = 10 * \log_{10}(I / I_0)$$

Prevenção de Danos Permanentes

A exposição continuada a níveis sonoros superiores a 85 dB pode causar degeneração progressiva e irreversível das células auditivas, exigindo o uso obrigatório de protetores auriculares.

Ambiente / Fonte	Nível Sonoro
Jardim silencioso	40 dB
Restaurante ruidoso / Tráfego	70 dB – 90 dB
Britadeira / Buzina de caminhão	100 dB
Show de rock (próximo às caixas) / Jato	110 dB – 130 dB

Qualidades Fisiológicas: Timbre

O que é Timbre?

É a qualidade fisiológica que nos permite diferenciar sons de mesma altura e mesma intensidade emitidos por fontes sonoras distintas.

- Identificação de Instrumentos: É graças ao timbre que uma pessoa distingue imediatamente o som de um piano, flauta ou violino tocando exatamente a mesma nota musical (mesma frequência fundamental).

- Identificação Vocacional: A 'assinatura' da voz de cada pessoa é governada por seu timbre individual.

A Origem Física: Forma da Onda

Fisicamente, as fontes sonoras raramente emitem ondas senoidais puras. Em vez disso, emitem um som complexo resultante da sobreposição do som fundamental (1º harmônico) com diversas outras ondas de frequências múltiplas (harmônicos superiores).

A forma geométrica final da onda de pressão acústica é a assinatura que define o timbre:

- Som Fundamental: Define a altura (frequência) da nota.
- Harmônicos Superiores: Modelam a geometria da onda complexa.

Propriedades das Ondas Sonoras



Impossibilidade de Polarização

As ondas sonoras sofrem diversos fenômenos ondulatórios típicos, como reflexão, refração, difração e interferência.

No entanto, por se tratarem de ondas longitudinais, as ondas sonoras **NÃO** podem ser polarizadas.

A polarização é um fenômeno exclusivo de ondas transversais (como a luz), onde as oscilações ocorrem em uma direção perpendicular à propagação.

Fenômenos Sonoros em Estudo

- **Reflexão:** Ocorre quando a onda sonora atinge um obstáculo e retorna ao meio de propagação originando eco ou reverberação.
- **Refração:** Mudança na velocidade e no comprimento de onda ao passar de um meio material para outro, mantendo a frequência.
- **Difração:** Capacidade das ondas de contornar obstáculos ou fendas que possuem dimensões comparáveis ao seu comprimento de onda.
- **Interferência:** Superposição de duas ou mais frentes de ondas sonoras no espaço, gerando pontos de reforço ou anulação acústica.

Reflexão Sonora: Reforço, Reverberação e Eco

REFORÇO

$$t_{\text{refletido}} \approx 0 \text{ s}$$

O obstáculo está tão próximo da fonte que o som refletido retorna quase instantaneamente.

- Efeito: O ouvido humano percebe ambos como um único som de intensidade reforçada.

REVERBERAÇÃO

$$t_{\text{refletido}} < 0.10 \text{ s}$$

O som refletido chega antes que a sensação do som direto tenha se extinguido no cérebro.

- Efeito: Sensação de prolongamento ou persistência do som no ambiente. Muito comum em catedrais e salas vazias.

ECO

$$t_{\text{refletido}} \geq 0.10 \text{ s}$$

O obstáculo está distante. O som direto e o refletido são distinguidos perfeitamente pelo ouvido.

- Distância Mínima no Ar: 17 m
(calculada a $v = 340 \text{ m/s}$)
- Distância na Água: 80 m

Refração e Difração Sonora

Refração Sonora

Ocorre quando a onda sonora atravessa a fronteira de separação entre dois meios com propriedades físicas distintas, provocando uma mudança na sua velocidade de propagação e no seu comprimento de onda.

- Frequência Constante: A frequência é determinada unicamente pela fonte emissora e NUNCA varia durante a refração.

- Equação de Propagação:

$$v = \lambda * f \Rightarrow \lambda_{\text{água}} / \lambda_{\text{ar}} = v_{\text{água}} / v_{\text{ar}}$$

Difração Sonora

A difração é a capacidade de uma onda de contornar obstáculos ou fendas. Este fenômeno só é expressivo quando as dimensões do obstáculo/fenda são semelhantes ao comprimento de onda (λ) da onda incidente.

- Comprimentos de Onda do Som: No ar ($v = 340$ m/s), o som audível (20 Hz a 20 kHz) tem comprimentos de onda de:

$$\lambda = 2 \text{ cm até } 17 \text{ metros}$$

- Consequência: Como os obstáculos do cotidiano (portas, muros, postes) possuem dimensões dentro dessa faixa, o som difrata muito facilmente, permitindo-nos ouvir alguém falando atrás de um muro.

Batimento e Cancelamento Ativo de Ruído

O Fenômeno dos Batimentos

Ocorre quando há interferência de duas ondas sonoras de frequências ligeiramente diferentes (por exemplo, $f_1 = 100$ Hz e $f_2 = 102$ Hz).

O som resultante tem uma oscilação de amplitude (modulação de volume), alternando periodicamente entre sons fortes (interferência construtiva) e silêncio (interferência destrutiva).

A frequência de batimento (f_b) é a diferença absoluta das frequências componentes:

$$f_b = |f_1 - f_2|$$

Tecnologia de Silêncio Ativo

Os fones de cancelamento de ruído ativos baseiam-se diretamente na interferência destrutiva das ondas.

1. Captação: Microfones embutidos captam em tempo real as ondas sonoras do ruído externo ambiente.
2. Inversão de Fase: Um processador digital eletrônico rápido gera uma onda idêntica em oposição de fase (180° fora de fase).
3. Anulação: Ambas as ondas interferem destrutivamente nos ouvidos do usuário, cancelando o barulho quase por completo.