

# Ondas mecânicas: Revisão

Física IV. Ondas

# Ondas mecânicas

A classificação em transversal ou longitudinal depende exclusivamente da relação angular entre o vetor de oscilação das partículas  $\vec{s}$  e o vetor de propagação da onda  $\vec{k}$ .

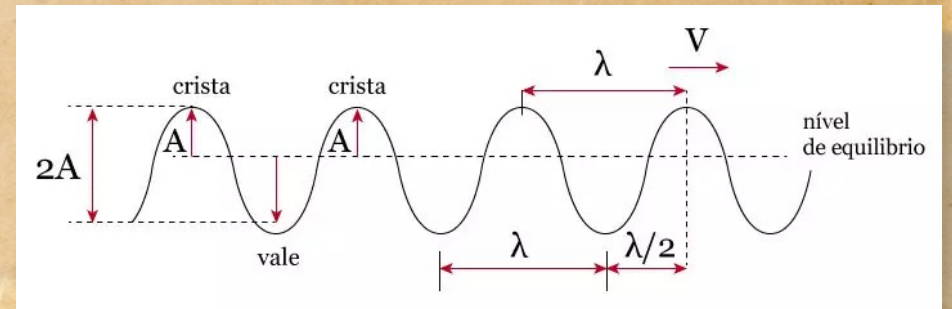
- **Ondas Mecânicas:** Exigem um meio material (deformável e elástico) para se propagar.
- **Transporte:** Transportam energia e quantidade de movimento, mas não transportam matéria de forma líquida.

# Ondas transversais (Ex: Corda)

## Características Principais

- **Geometria:** A oscilação do meio é perpendicular à direção de propagação.
- **Meio de Propagação:** Ocorrem tipicamente em sólidos ou superfícies de líquidos (exigem resistência ao cisalhamento).
- **Polarização:** Podem ser polarizadas (a oscilação pode ser restrita a um único plano).
- **Equação Típica (Corda):**  $v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}}$

Onde  $\tau$  é a tração e  $\mu$  a densidade linear.



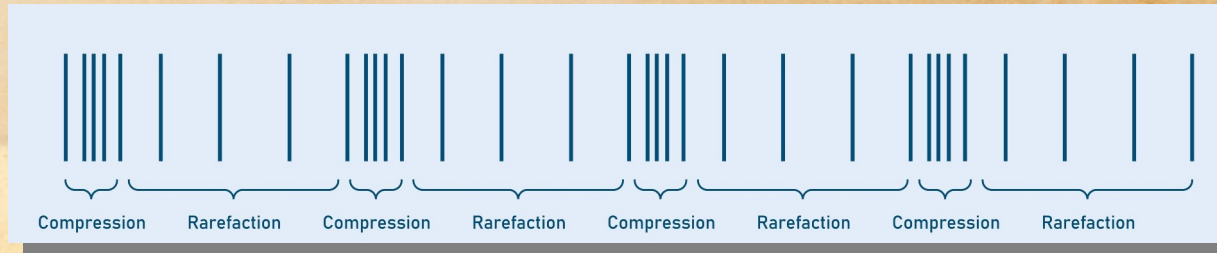
# Ondas longitudinais (Ex: Som)

## Características Principais

- **Geometria:** A oscilação do meio é paralela à direção de propagação.
- **Mecanismo:** Propagam-se através de sucessivas compressões (alta pressão) e rarefações (baixa pressão).
- **Meio de Propagação:** Ocorrem em sólidos, líquidos e gases (fluidos suportam deformação volumétrica).
- **Polarização:** Não podem ser polarizadas, pois a oscilação já ocorre na mesma linha da propagação.
- **Equação Típica (Fluidos):**

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Onde  $B$  é o módulo de elasticidade volumétrico e  $\rho$  a densidade volumétrica.



# Comparativo de Propriedades

Propriedade	Transversal (Corda)	Longitudinal (Som)
Oscilação vs. Propagação	Perpendicular ( $90^\circ$ )	Paralela ( $0^\circ$ )
Grandezas Variáveis	Deslocamento vertical ( $y$ )	Pressão ( $\Delta p$ ) e deslocamento ( $s$ )
Exemplo Comum	Corda de violão, ondas $S$ sísmicas	Ondas sonoras, ondas $P$ sísmicas
Polarização	Sim	Não
Elementos Geométricos	Cristas e Vales	Compressões e Rarefações

# Dualidade da onda sonora

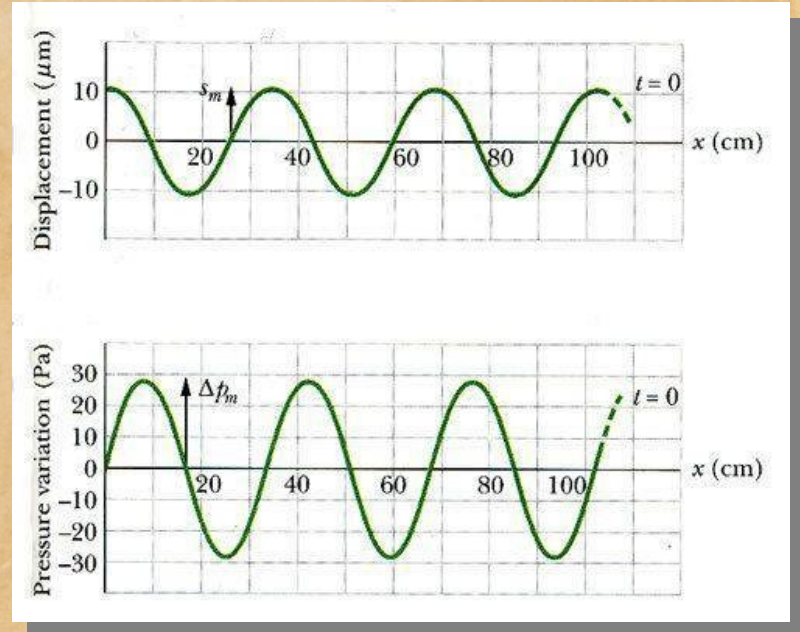
## Deslocamento vs. Pressão

Diferente da corda, onde visualizamos o deslocamento facilmente, a onda sonora é frequentemente analisada pela pressão.

- 1) **Onda de deslocamento:**  $s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t)$
- 2) **Onda de pressão:**  $\Delta p(x, t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t)$

### Ponto Crítico:

As duas funções estão defasadas em  $90^\circ$ . Onde o deslocamento é nulo (nó), a variação de pressão é máxima (ventre). Isso é fundamental para entender a ressonância em tubos abertos e fechados.



# Intensidade e energia

Como a energia flui?

- **Em cordas:** A potência depende da tração e da velocidade transversal.  $\tau = \mu v^2$

$$P_{med} = \frac{1}{2} \mu v \omega^2 y_m^2$$

- **No som:** A intensidade,  $I$ , depende da pressão média e da impedância do meio,  $\rho v$ :

$$I = \frac{(\Delta p_m)^2}{2 \rho v}$$

Conclusão: Enquanto a onda transversal deforma a “forma” do meio, a onda longitudinal deforma o “volume/densidade” do meio. Ambas obedecem ao princípio de superposição e podem gerar ondas estacionárias.

# Interferência de ondas (Princípio da superposição)

$$y'(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

Quando duas frentes de onda se encontram no mesmo ponto.

- **Interferência construtiva:** Ocorre quando as ondas chegam em fase ( $\phi = 0, 2\pi, \dots$ ). As amplitudes se somam ( $A = A_1 + A_2$ ).
  - Condição:  $\Delta L = n \lambda$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).
- **Interferência destrutiva:** Ocorre quando as ondas chegam em oposição de fase ( $\phi = \pi, 3\pi, \dots$ ). As amplitudes se subtraem ( $A = |A_1 - A_2|$ ).
  - Condição:  $\Delta L = (n + \frac{1}{2}) \lambda$ . ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).

# Ondas estacionárias

**Característica principal: confinamento da energia em cavidades.**

Resultam da superposição de duas ondas de mesma frequência e amplitude propagando-se em sentidos opostos (incidente e refletida).

- **Nós** (Nodes): Pontos de interferência sempre destrutiva.
- **Ventres** (Antinodes): Pontos de interferência construtiva.
- **Ressonância**: Ocorre quando a frequência externa coincide com uma das frequências naturais do sistema.

# Batimentos

## Interferência temporal.

Ocorre quando duas ondas de frequências ligeiramente diferentes ( $f_1 \approx f_2$ ) se sobrepõem.

- **Fenômeno:** A amplitude resultante oscila no tempo, criando uma percepção de “pulsação” do volume sonoro.
- Frequência de Batimento,  $f_{\text{bat}}$ : É a diferença absoluta entre as frequências originais:

$$f_{\text{bat}} = |f_1 - f_2|$$

- **Aplicação:** Afinação de instrumentos musicais e detecção de variações finas de velocidade.

# Efeito Doppler

## A percepção da mudança de frequência pelo movimento.

A mudança na frequência percebida,  $f'$ , devido ao movimento relativo entre fonte e observador.

- **Aproximação:** As frentes de onda são “comprimidas”, resultando em um comprimento de onda menor e frequência maior (Som mais agudo).
- **Afastamento:** As frentes de onda são “alongadas”, resultando em um comprimento de onda maior e frequência menor (Som mais grave).
- **Equação geral:**

$$f' = f \left( \frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right)$$

Aqui  $v$  é a velocidade do som,  $v_o$  do observador e  $v_s$  da fonte.

# Resumo

Fenômeno	Requisito Principal	Característica Observável
Interferência	Duas fontes	Zonas de silêncio e zonas de reforço.
Ondas Estacionárias	Reflexão e Confinamento	Padrões fixos de nós e ventres.
Batimentos	$f_1 \neq f_2$ (mas próximas)	Oscilação periódica do volume (intensidade).
Efeito Doppler	Movimento Relativo	Mudança na altura (frequência) do som.

# Problema: Nível de Intensidade Sonora (NIS)

O nível sonoro de uma fonte é aumentado em 30,0 dB.

- a) Por qual fator é multiplicada a intensidade do som?
- b) Por qual fator é multiplicada a amplitude da pressão do ar?

# Problema: Poço com água

Um poço com paredes verticais e água no fundo ressoa em 7,00 Hz e em nenhuma outra frequência mais baixa. (A parte do poço cheia de ar se comporta como um tubo com uma extremidade fechada e outra aberta.) O ar no interior do poço tem uma massa específica de  $1,10 \text{ kg/m}^3$  e um módulo de elasticidade volumétrico de  $1,33 \times 10^5 \text{ Pa}$ .

A que profundidade está a superfície da água?

# Problema: Cordas de piano

Duas cordas de piano iguais têm uma frequência fundamental de 600 Hz quando são submetidas a uma mesma tração. Que aumento relativo da tração de uma das cordas faz com que haja 6,0 batimentos por segundo quando as duas cordas oscilam simultaneamente?

# Problema: Vento e efeito de Doppler

Uma sirene de 2.000 Hz e um funcionário da defesa civil estão em repouso em relação ao solo. Que frequência o funcionário ouve se o vento está soprando a 12 m/s

- a) da sirene para o funcionário e
- b) do funcionário para a sirene?

# Problema: Efeito de Doppler

Uma menina está sentada perto da janela aberta de um trem que viaja para leste a uma velocidade de  $10,00 \text{ m/s}$ . O tio da menina está parado na plataforma e observa o trem se afastar. O apito da locomotiva produz um som com uma frequência de  $500,0 \text{ Hz}$ . O ar está parado.

- a) Que frequência o tio ouve?
- b) Que frequência a menina ouve?

Um vento vindo do leste começa a soprar a  $10,00 \text{ m/s}$ .

- c) Que frequência o tio passa a ouvir?
- d) Que frequência a menina passa a ouvir?

# Modelagem de atenuação de energia em meios dissipativos

Em projetos de controle de poluição sonora ou análise de propagação de plumas de contaminação, é comum que a energia de uma perturbação (onda) não se conserve integralmente devido à interação com o meio (viscosidade do fluido, absorção por sedimentos ou folhagens). Este fenômeno de dissipação pode ser modelado por uma função de onda cuja amplitude  $A(x)$  decai exponencialmente à medida que a onda penetra no meio degradador.

# Problema: Modelagem de atenuação de energia em meios dissipativos

Considere uma onda progressiva se propagando em um meio dissipativo ao longo do eixo  $x$ . A função de onda é descrita por:

$$y(x, t) = A(x) \sin(kx - \omega t)$$

Onde a amplitude varia com a distância segundo a lei de Beer-Lambert adaptada:  $A(x) = A_0 e^{-bx}$

Sendo  $A_0$  a amplitude na fonte ( $x = 0$ ) e  $b$  o coeficiente de atenuação do meio ( $\text{m}^{-1}$ ).

1. Determine a expressão da potência média transportada pela onda como função da posição  $P(x)$ , para  $x > 0$ .
2. Calcule a taxa de dissipação de energia por unidade de comprimento ( $R = -dP/dx$ ) e interprete o significado físico do fator  $2b$  que aparece na solução.
3. Se este meio fosse uma barreira acústica vegetal e o coeficiente  $b$  dobrasse devido ao aumento da densidade foliar, como isso afetaria a distância necessária para que a potência da onda caísse à metade da inicial?

# Problema: Baleia

Nos oceanos, as baleias se comunicam por transmissão sonora através da água. Uma baleia emite um som de 50,0 Hz para dizer a um filhote teimoso para voltar ao grupo. A rapidez do som na água é de cerca de 1500 m/s.

- a) Quanto tempo leva para o som chegar ao filhote, se ele está afastado de 1,20 km?
- b) Qual é o comprimento de onda deste som na água?
- c) Se as baleias estão próximas da superfície, parte da energia sonora pode refratar para o ar. Quais seriam a frequência e o comprimento de onda do som no ar?

# Problema: Morcego

Um morcego, voando de encontro a um obstáculo estacionário a  $120 \text{ m/s}$ , emite pulsos sonoros breves, de alta frequência, com uma frequência de repetição de  $80,0 \text{ Hz}$ . Qual é o intervalo entre os tempos de chegada dos pulsos refletidos percebidos pelo morcego?