

Ondas

Flaviano Williams Fernandes

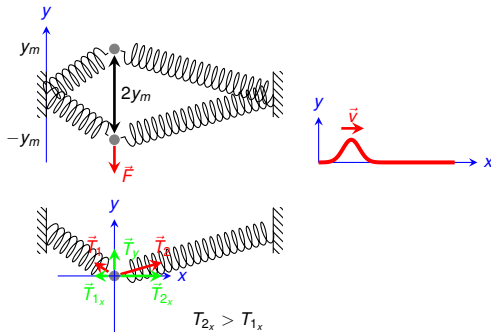
Instituto Federal do Paraná
Campus Irati

12 de novembro de 2025

Sumário

- 1 Ondas progressivas
- 2 Fenômenos ondulatórios
- 3 Interferência
- 4 Ondas sonoras
- 5 Aplicações
- 6 Apêndice

Ondas progressivas numa mola

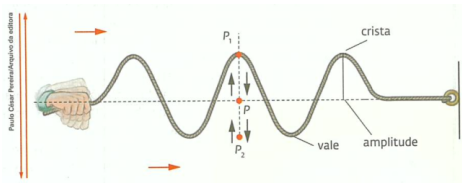


Surgimento de um pulso numa mola.

- ✓ As forças nas direções x e y produz um pulso de energia que se propaga na horizontal com velocidade \vec{v} ;
- ✓ O pulso propaga energia mas não propaga matéria;
- ✓ A força na direção y produz um movimento harmônico simples que faz oscilar o fragmento da mola de massa m na vertical.

Ondas progressivas numa corda (continuação)

Uma onda é formada a partir de uma série de pulsos propagando-se na mesma direção e sentido a cada intervalo de tempo igual ao período de oscilação T .

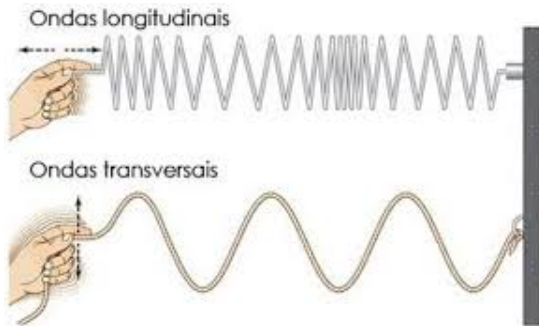


Pulsos se propagando numa corda.

Corollary

Uma onda mecânica necessita de um meio material para se propagar.

Tipos de ondas progressivas



Diferença entre onda longitudinal e transversal [3].

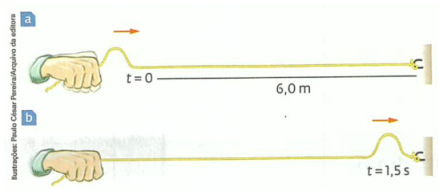
- ✓ Numa onda longitudinal, a direção de oscilação é paralela a direção de propagação dessa onda.
- ✓ Numa onda transversal, a direção de oscilação é perpendicular a direção de propagação dessa onda.

Velocidade de uma onda progressiva

Se cada pulso percorrer uma distância ΔS num intervalo de tempo Δt , a velocidade v desse pulso será

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

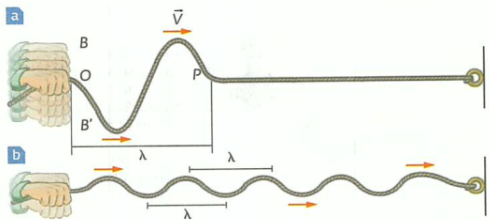
Por exemplo, se $\Delta S = 6,0 \text{ m}$ e $\Delta t = 1,5 \text{ seg}$, a velocidade dessa onda será 4 m/s .



Corollary

A velocidade de propagação de uma onda numa corda depende da densidade ($\frac{\text{massa}}{\text{comprimento}}$) dessa corda e da tensão aplicada sobre ela.

Propriedades de uma onda



- ✓ **Amplitude da onda:** A mesma amplitude da oscilação vertical.
- ✓ **Frequência da onda:** A mesma frequência da oscilação vertical.
- ✓ **Comprimento de onda (λ):** Distância que a onda percorre durante um período T .

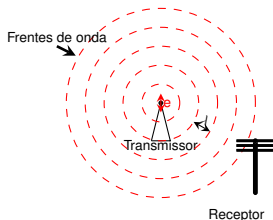
Corollary

Sendo v a velocidade de propagação da onda e T o período, o comprimento de onda é dado por

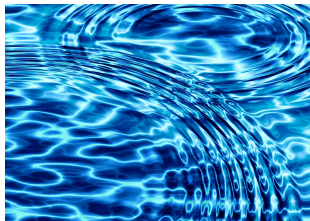
$$\lambda = vT$$

Ondas progressivas em duas e três dimensões

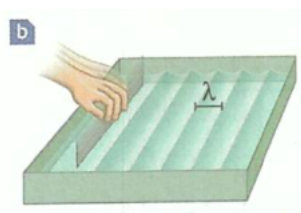
- ✓ As frentes de onda de um pulso eletromagnético são esferas com o centro na origem do pulso.
- ✓ As frentes de onda em um lago são circunferências com o centro na origem do pulso.



Pulso eletromagnético.



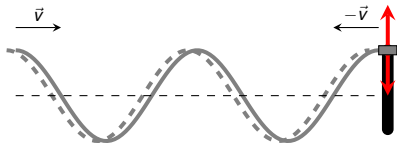
Ondas bidimensionais.



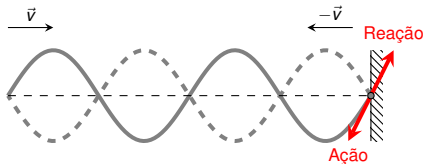
Ondas planas na água.

Reflexão

- ✓ Na extremidade móvel, o pulso é refletido e retorna igual ao pulso incidente;
- ✓ Na extremidade fixa, o pulso é refletido e retorna invertido ao pulso incidente;
- ✓ Numa corda, somente pode existir números inteiros de comprimentos de onda.



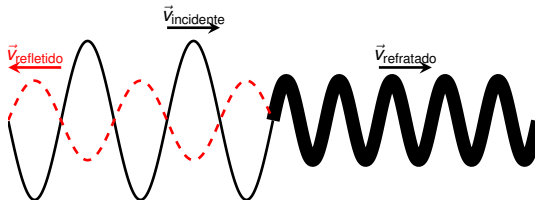
Extremidade móvel. A onda se propaga livremente na corda, e para manter o seu movimento ela é refletida para a esquerda.



Extremidade fixa. Afim de satisfazer a conservação do momento, a onda refletida deve estar em sentido oposto ao onda incidente.

Refração (meio mais denso)

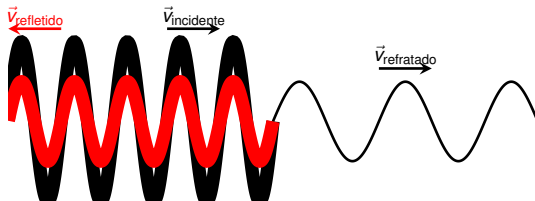
- ✓ A velocidade de uma onda diminui quando ela atravessa o meio 1 (mais fino) para o meio 2 (mais denso);
- ✓ O comprimento de onda também diminui quando ela atravessa um meio mais fino para o mais grosso;
- ✓ Parte do pulso é refratado e parte é refletido de maneira invertida;
- ✓ A frequência é a mesma da fonte geradora do pulso, portanto ela não se altera no processo.



Refração da onda no meio mais denso.

Refração (meio menos denso)

- ✓ A velocidade de uma onda aumenta quando ela atravessa o meio 1 (mais fino) para o meio 2 (mais denso);
- ✓ O comprimento de onda também aumenta quando ela atravessa um meio mais fino para o mais grosso;
- ✓ A onda é refletida de maneira direta e não invertida;
- ✓ A frequência é a mesma da fonte geradora do pulso, portanto ela não se altera no processo.

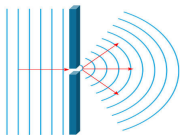


Refração da onda no meio menos denso.

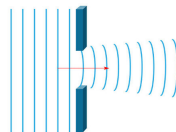
Difração

Difração de uma onda

Propriedade que uma onda possui de contornar obstáculos.



Difração em uma fenda pequena [4].



Propagação retilínea em uma fenda grande [4].

Corollary

A difração é acentuada se a largura do orifício for muito menor que o comprimento de onda.

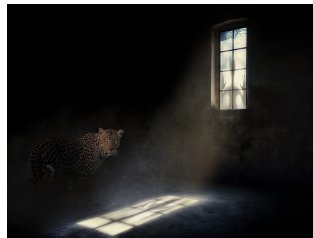
Difração da luz e ondas sonoras

Corollary

O comprimento de onda da luz é muito pequeno, tornando difícil observar fenômenos referentes a difração que podem ocorrer naturalmente.

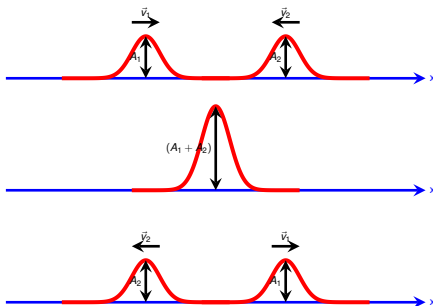


Difração do som numa parede.

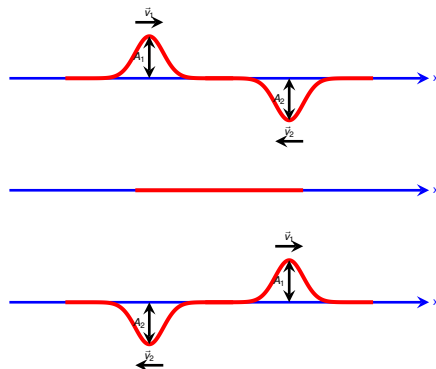


Propagação linear dos raios de luz.

Interferência



Interferência construtiva.

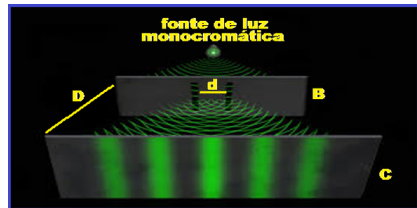


Interferência destrutiva.

Experiência de Young

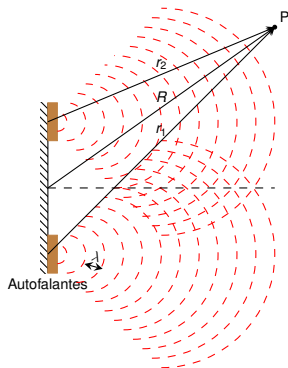
A experiência de Young ou da fenda dupla foi um experimento feito por Thomas Young onde foi possível reforçar o caráter ondulatório da luz. Nele um feixe de luz atravessa duas fendas bem finas. Ao atravessá-las a luz sofre difração e se espalha como ondas circulares. Essas ondas ao se encontrarem sofrerão efeitos de interferência construtiva e destrutiva, que pode ser percebido se colocarmos um filme fotossensível a uma distância fixa das fendas. Nesse filme, regiões onde ocorre interferência construtiva teremos feixes

bem claros, enquanto que nas regiões escuras ocorre interferência destrutiva.

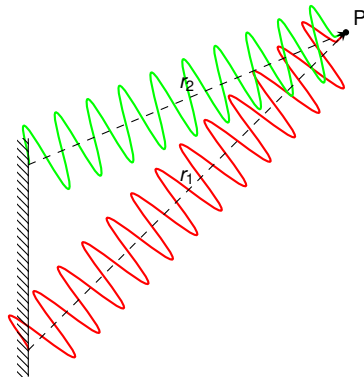


Experiência de Young da fenda dupla.

Ondas com mesmo comprimento de onda saindo de dois alto-falantes



Superposição de duas ondas esféricas



Representação do caminho da onda

Interferência construtiva

Teremos interferência construtiva no ponto P se a diferença dos caminhos percorridos pelas duas ondas forem números inteiros de comprimentos de onda, ou seja,

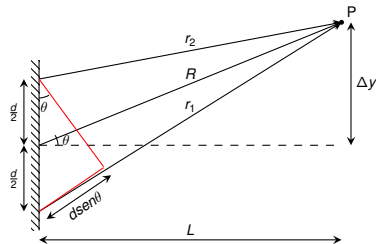
$$r_1 - r_2 = n\lambda, \quad n = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

mas $r_1 - r_2 = d \sin \theta$, portanto

$$d \sin \theta = n\lambda, \quad n = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Sabemos também que $\tan \theta = \frac{\Delta y}{L}$, se considerarmos $\tan \theta \approx \sin \theta$ podemos dizer que

$$\Delta y = \frac{nL}{d} \lambda, \quad n = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



Interferência construtiva no ponto P.

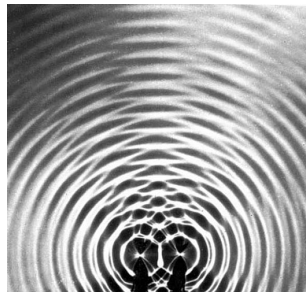
Interferência destrutiva e a experiência de Young

Teremos interferência destrutiva se a diferença dos caminhos percorridos pelas duas ondas for um valor semi-inteiro do comprimento de onda, ou seja,

$$r_1 - r_2 = \left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda, \quad n = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Corollary

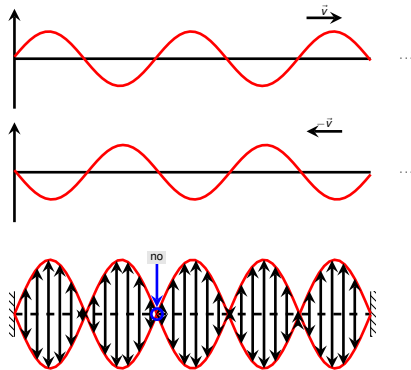
$$r_1 - r_2 = d \sin \theta = \begin{cases} n\lambda, & (\text{Construtiva}) \\ \left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda, & (\text{Destrutiva}) \end{cases}$$
$$n = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$$



Interferencia de ondas na água.

Ondas estacionárias

Uma onda estacionária é formada quando duas ondas com a mesma amplitude, número de onda e frequência se encontram em sentidos contrários. O resultado é uma onda que não se propaga no espaço. A onda estacionária pode ser obtida em instrumentos de corda. Nesses instrumentos, a onda progressiva sofre reflexão nas extremidades da corda e retorna invertida com a mesma amplitude e comprimento de onda.



Ondas estacionárias.

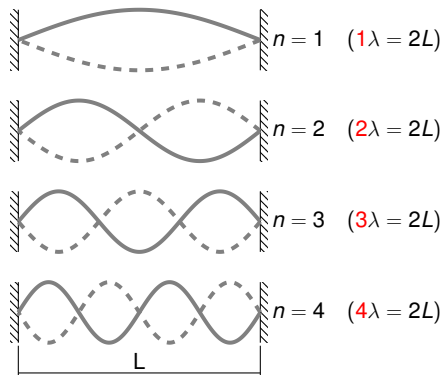
Modos normais de vibração

Considerando que na ida e vinda o percurso completo da onda seria $2L$, onde L é o comprimento da corda, teremos

$$n\lambda = 2L,$$

onde n representa o modo normal de vibração (veja a figura ao lado). Sabendo que $v = \lambda f$, teremos

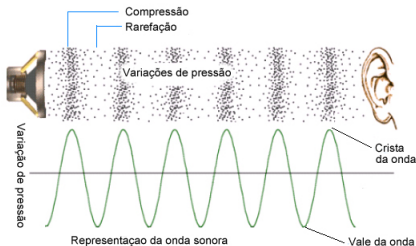
$$\nu = \frac{nv}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$



Modos normais de vibração.

O que é som

O som é uma onda mecânica longitudinal que se propaga ao longo do meio material (sólido, líquido ou gás), numa frequência entre 20 a 20000 Hz.



Som se propagando da fonte até o ouvido.

Corollary

Cada pulso se propaga através da variação de pressão entre as moléculas que compõem a matéria (as moléculas que estão atrás empurram as que estão justamente a frente, e assim a energia do pulso se propaga no meio).

Propriedades de uma onda sonora

Qualidades usadas para distinguir o som

- ✓ **Intensidade**: Energia média transmitida por unidade de tempo e área (depende da amplitude da onda sonora).
- ✓ **Altura**: Sensação que permite distinguir entre sons graves e agudos (diretamente associado com a frequência da onda).
- ✓ **Timbre**: Capacidade de distinguir sons de mesma altura (frequência) e intensidade em instrumentos diferentes (coloração do som).

Corollary

A velocidade da onda sonora no ar é 340 m/s e aumenta com a temperatura, além do mais, já é conhecido que $v_{\text{sólido}} > v_{\text{líquido}} > v_{\text{gás}}$.

Altura

A característica física de uma onda sonora associada a altura é a frequência.

Notas musicais (Hz).

Nota	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Freq.	264	297	330	352	396	440	495	528

Corollary

- ✓ *Um som grave possui baixa frequência (som baixo), enquanto que um som alto possui alta frequência (som alto);*
- ✓ *Infrassons são ondas sonoras cuja frequência estão abaixo de 20 Hz enquanto que ultrassons estão acima de 20000 Hz.*

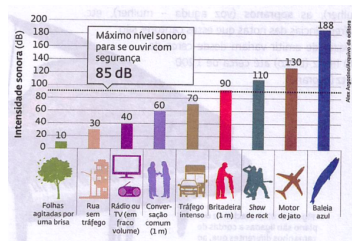
Intensidade de uma onda sonora

A intensidade de uma onda é definida como

$$I = \frac{1}{A} \left(\frac{\Delta E}{\Delta t} \right).$$

No SI usa-se a unidade $[I] = \frac{W}{m^2}$ mas na prática usa-se decibéis (dB),

$$\beta = 10 \log_{10}(I/I_0) \text{ dB.}$$



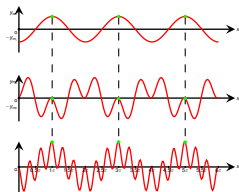
Intensidades sonoras de alguns objetos.

Corollary

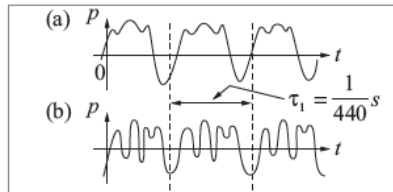
I_0 é a mínima intensidade perceptível por uma pessoa ($I_0 = 10^{-12} W/m^2$).

Timbre

Embora com perfis diferentes, o ouvido humano pode perceber duas ondas sonoras periódicas de mesma frequência.



Três ondas com a mesma frequência.



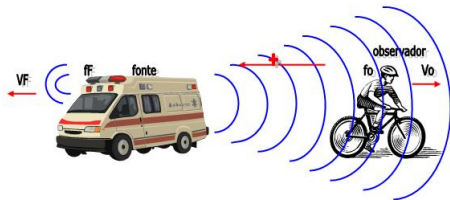
Nota Lá tocada por dois instrumentos.

Corollary

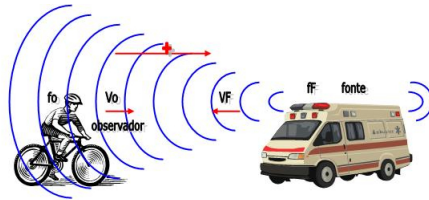
A característica que distingue um som musical de um ruído é a periodicidade.

Efeito Doppler

A frequência do som que o observador poderá ouvir muda dependendo das velocidades da fonte e do observador.



Frequência grave ouvida pelo observador [5].

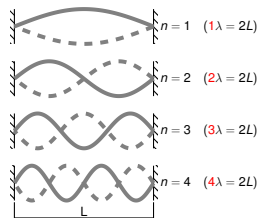


Frequência aguda ouvida pelo observador [5].

Cordas vibrantes



Ondas na corda do violão.

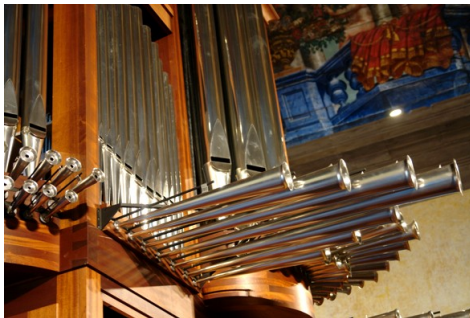


Modos normais de vibração.

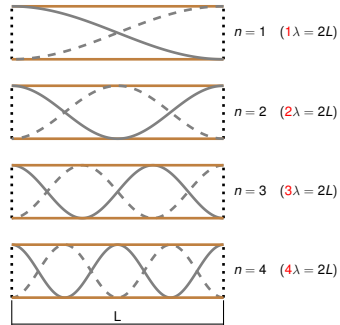
Corollary

À partir da tensão aplicada, densidade e o comprimento da corda, é possível gerar uma onda com frequência bem definida.

Tubo sonoro



Órgão musical [2].









Modos normais no tubo sonoro.

Alfabeto grego

Alfa	A	α	Ni	N	ν
Beta	B	β	Csi	Ξ	ξ
Gama	Γ	γ	ômicon	O	o
Delta	Δ	δ	Pi	Π	π
Epsílon	E	ϵ, ε	Rô	P	ρ
Zeta	Z	ζ	Sigma	Σ	σ
Eta	H	η	Tau	T	τ
Teta	Θ	θ	Ípsilon	Υ	v
Iota	I	ι	Fi	Φ	ϕ, φ
Capa	K	κ	Qui	X	χ
Lambda	Λ	λ	Psi	Ψ	ψ
Mi	M	μ	Ômega	Ω	ω

Referências e observações¹

-  A. Máximo, B. Alvarenga, C. Guimarães, Física. Contexto e aplicações, v.2, 2.ed., São Paulo, Scipione (2016)
-  http://www.snpcultura.org/vol_festival_orgao_madeira_2010.html
-  <http://www.explicatorium.com/cfq-8/caracteristicas-das-ondas.html>
-  <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-difracao.htm>
-  <https://www.colegioweb.com.br/acustica/efeito-doppler-fizeau.html>
-  https://fisicaevestibular.com.br/novo/wp-content/uploads/migracao/ondulatoria/young/o_df2a6c83e5aea870.html

Esta apresentação está disponível para download no endereço
<https://flavianowilliams.github.io/education>

¹ Este material está sujeito a modificações. Recomenda-se acompanhamento permanente.