

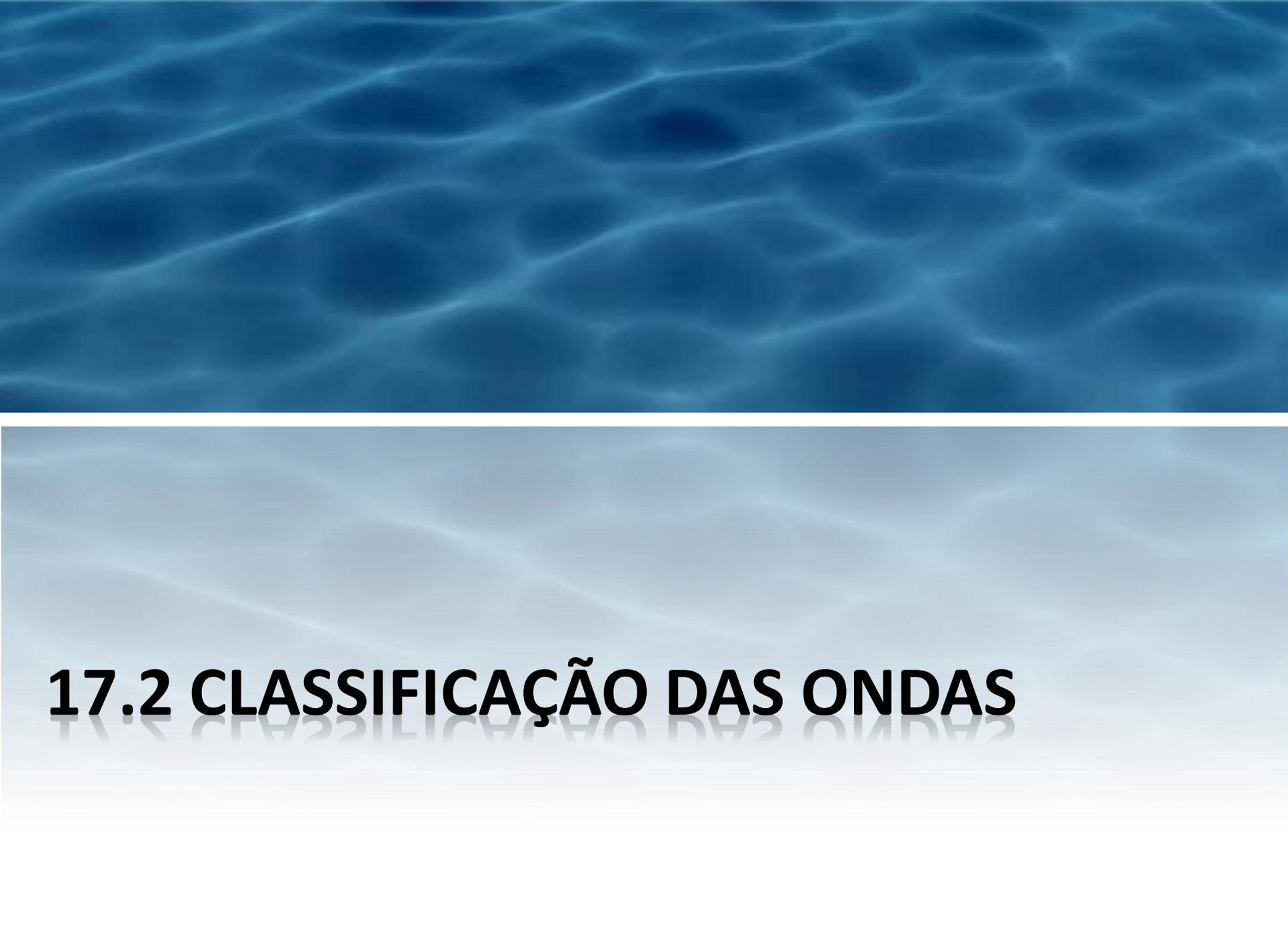
17. Ondas

Prof. Ronaldo Xavier

17.1 Definição

Onda é qualquer perturbação que se propaga, em relação aos demais pontos do meio, transportando energia sem o transporte de matéria.





17.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS

17.2.1 Quanto à natureza

a) **Ondas mecânicas** – são aquelas que necessitam obrigatoriamente de um meio material para se propagarem.

Ex.: Ondas do mar, pulsos em fios e molas, terremotos, som, etc.

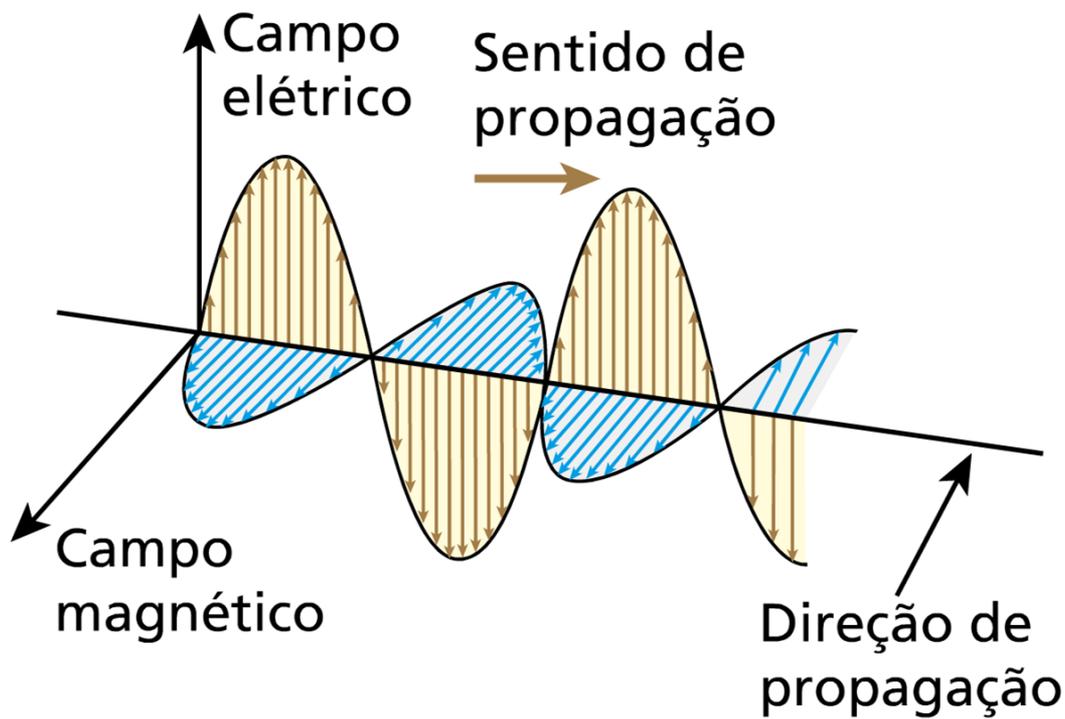


b) **Ondas eletromagnéticas** – conseguem se propagar até mesmo no vácuo, ou seja, não dependem de um meio material.

Ex.: Luz, ondas de rádio, micro-ondas, raios-X, etc.



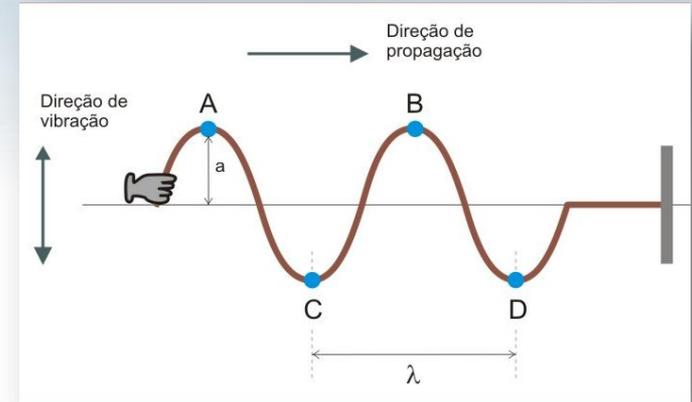
As ondas eletromagnéticas são formadas por um campo elétrico (\vec{E}) e por um campo magnético (\vec{B}), que oscilam em planos ortogonais.



17.2.2 Quanto ao modo de vibração

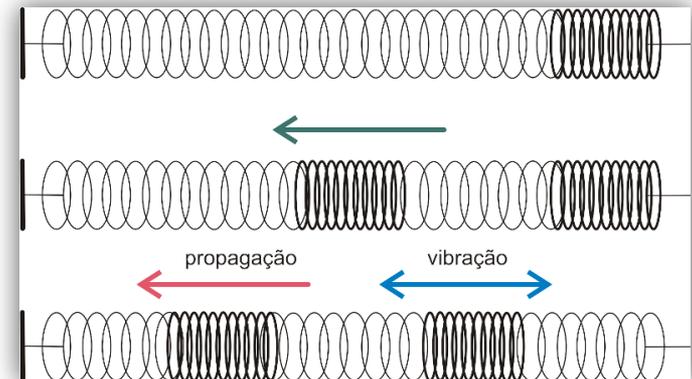
a) **Ondas transversais** – são aquelas que o eixo de vibração é perpendicular ao eixo de propagação.

Ex.: Ondas do mar, pulsos em fios, todas as ondas eletromagnéticas, etc.



b) **Ondas longitudinais** – seu eixo de vibração coincide com o eixo de propagação, ou seja, ambos ocorrem em uma mesma direção.

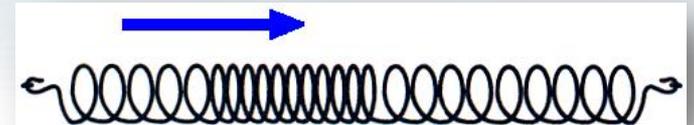
Ex.: som, pulsos longitudinais em molas, etc.



17.2.3 Quanto às dimensões

a) Ondas unidimensionais – são ondas que se propagam em apenas uma direção.

Ex.: pulsos em fios, em molas, etc.



b) Ondas bidimensionais – seu movimento ocorre por uma superfície, ou seja, tem dois eixos de propagação.

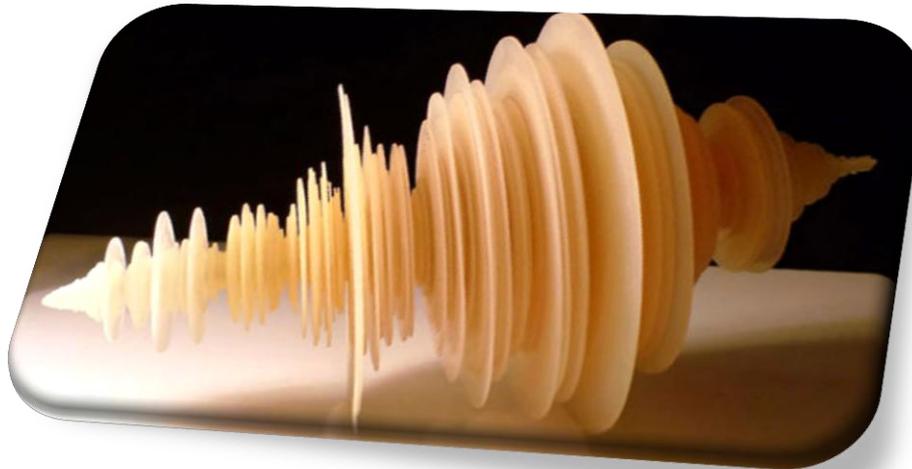
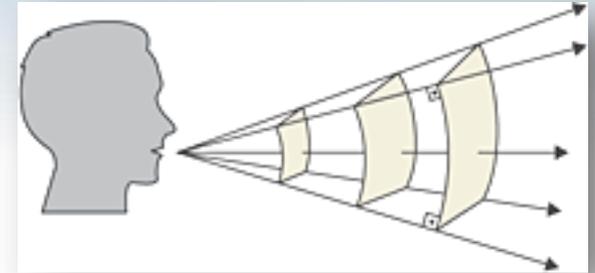
Ex.: ondas circulares em um lago.



17.2.3 Quanto às dimensões

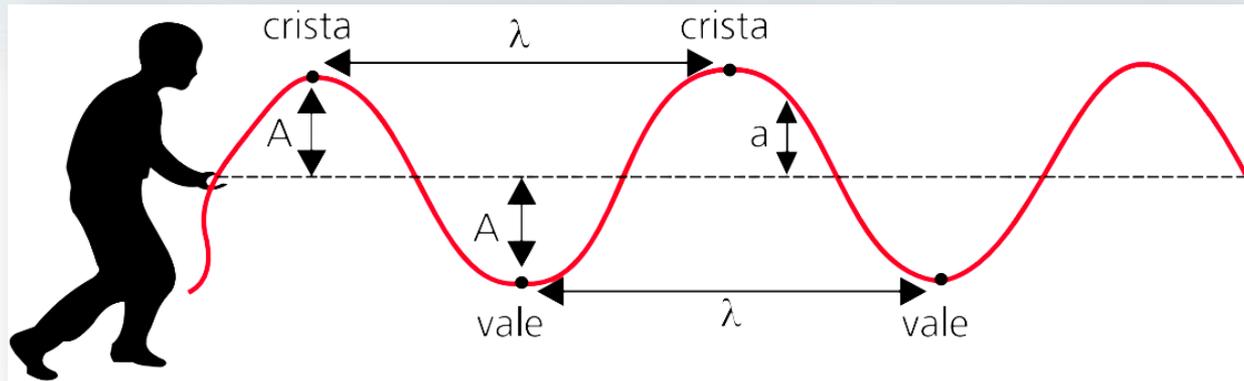
c) **Ondas tridimensionais** – ocorrem de forma volumétrica ou espacial, ou seja, nas três dimensões.

Ex.: ondas sonoras na atmosfera.



17.3 Ondas Periódicas

São ondas produzidas por uma série de pulsos iguais e sucessivos.



A (amplitude da onda);

λ (comprimento de onda – distância entre duas cristas ou vales sucessivos).

A velocidade de uma onda pode ser calculada pelo produto entre o comprimento de onda (λ) e a frequência (f), vejamos:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow$$

$$v = \lambda \cdot f$$

17.4 PULSOS EM FIOS

17.4.1 Densidade linear (μ)

É definida como a razão entre a massa (m) e o comprimento do fio (ℓ), assim temos:

$$\mu = \frac{m}{\ell}$$

Obs.: A unidade de densidade linear é dada por:

$$[\mu] = \frac{[M]}{[L]} \Rightarrow [\mu] = \text{kg/m}$$

17.4.2 Velocidade do pulso em fio

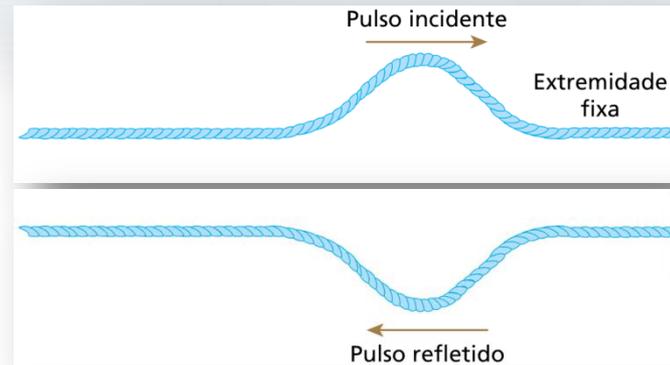
A velocidade do pulso em um fio é dada pela equação de Taylor:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

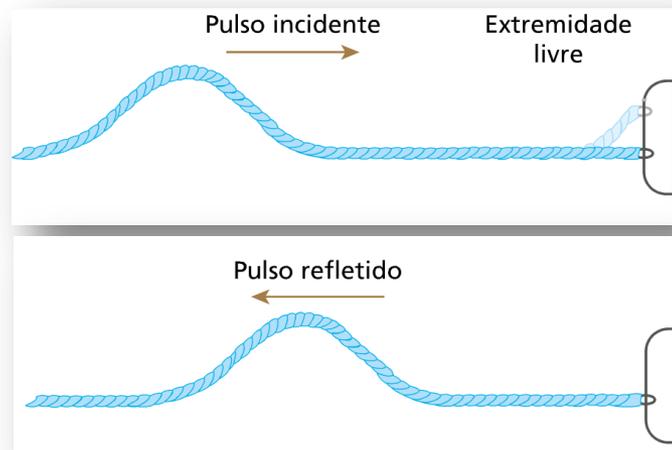
Onde, T é a força de tração (tensão) do fio.

17.4.3 Reflexão de pulso

a) **Extremidade fixa:** O pulso reflete com inversão de fase.

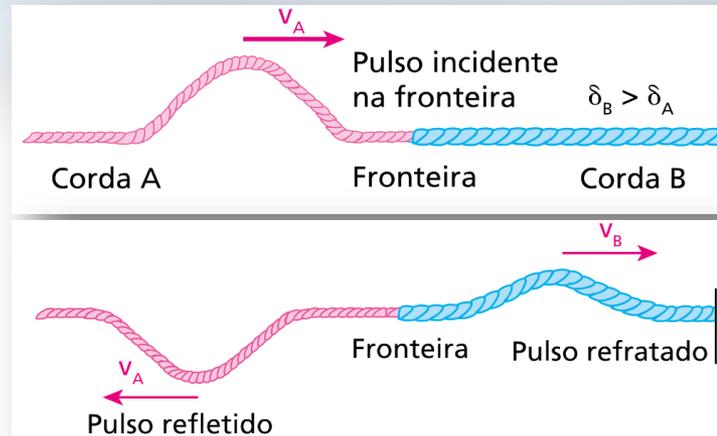


b) **Extremidade móvel:** O pulso reflete na mesma fase.

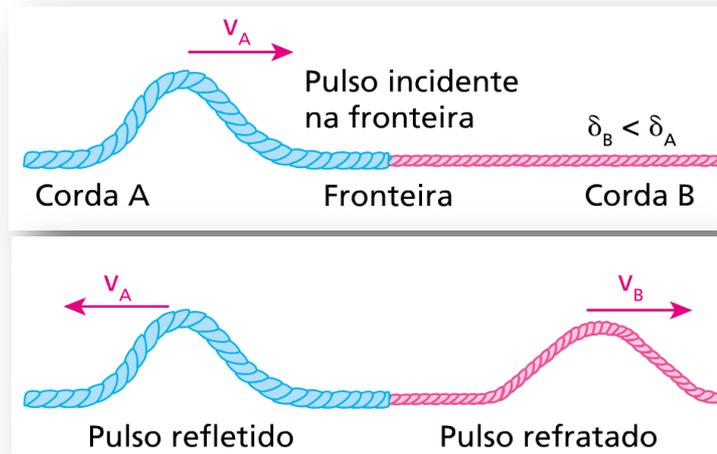


17.4.4 Refração de pulso

a) **Da menor para maior densidade:** O pulso reflete com inversão de fase.

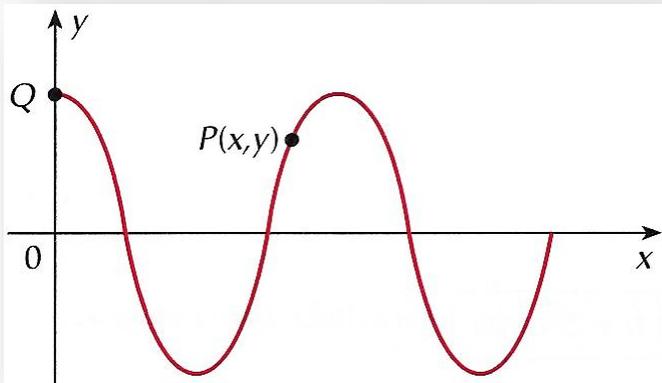


b) **Da maior para menor densidade:** O pulso reflete na mesma fase.



17.5 Função de onda

Tome uma ponto Q que oscila realizando MHS. Quando o movimento inicia, o ponto P, mais a frente, só entrará em movimento após um intervalo de tempo Δt , assim P está defasado em relação a Q.



$$y_Q = A \cos(\varphi_0 + \omega t)$$
$$y_P = y = A \cos(\varphi_0 + \omega t')$$
$$\Delta t = t - t' \Rightarrow t' = t - \Delta t$$
$$\Delta t = \frac{x}{v}$$

$$y = A \cos(\varphi_0 + \omega t') \Rightarrow y = A \cos[\varphi_0 + \omega(t - \Delta t)] \Rightarrow$$

$$y = A \cos\left[\varphi_0 + \omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] \Rightarrow y = A \cos\left(\varphi_0 + \omega t - \frac{\omega}{v} x\right)$$

17.5 Função de onda

$$y = A \cos\left(\varphi_0 + \omega t - \frac{\omega}{v} x\right) \Rightarrow$$

$$y = A \cos(\varphi_0 + \omega t - kx)$$

$$\boxed{k = \frac{\omega}{v}} \rightarrow \text{Número de onda.} \rightarrow k = \frac{2\pi/T}{\lambda/T} \Rightarrow$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Sabemos que $\omega = \frac{2\pi}{T}$, então:

$$y = A \cos\left(\varphi_0 + \omega t - \frac{\omega}{v} x\right) \Rightarrow y = A \cos\left(\varphi_0 + \frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{T \cdot v} x\right) \Rightarrow$$

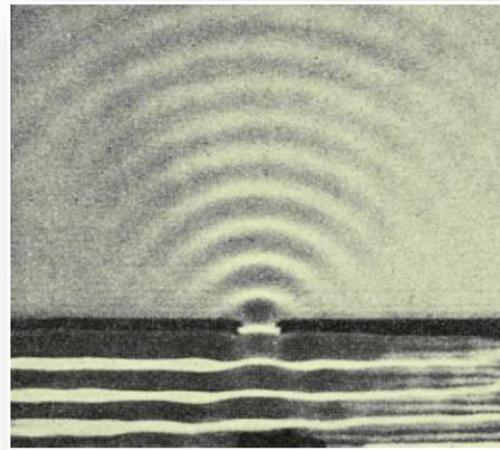
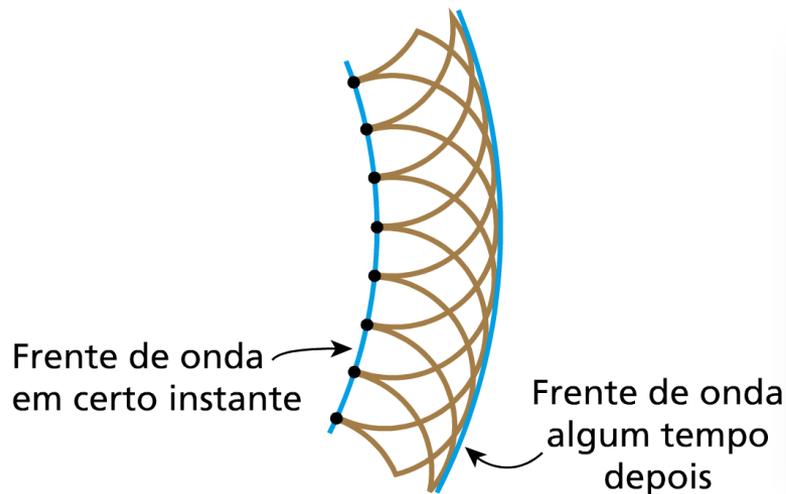
$$y = A \cos\left[\varphi_0 + 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$



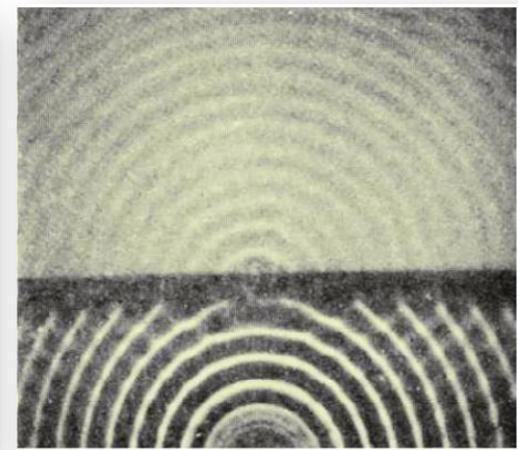
17.6 FENÔMENOS ONDULATÓRIOS

17.6.1 Princípio de Huygens

Cada ponto de uma frente de onda pode ser tratado como uma pequena fonte de ondas circulares, com as mesmas características da frente original (frequência, comprimento de onda e velocidade). Decorrido um certo intervalo de tempo, a nova linha de onda será tangente às ondas secundárias emitidas por esses pontos.



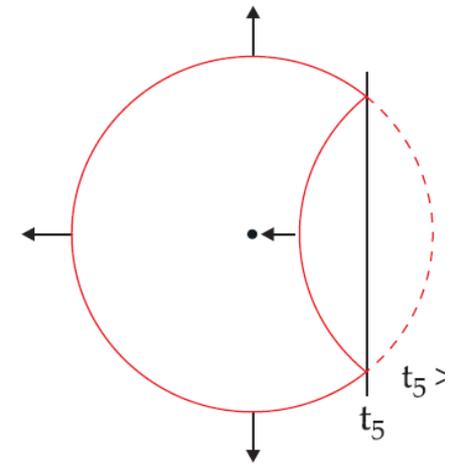
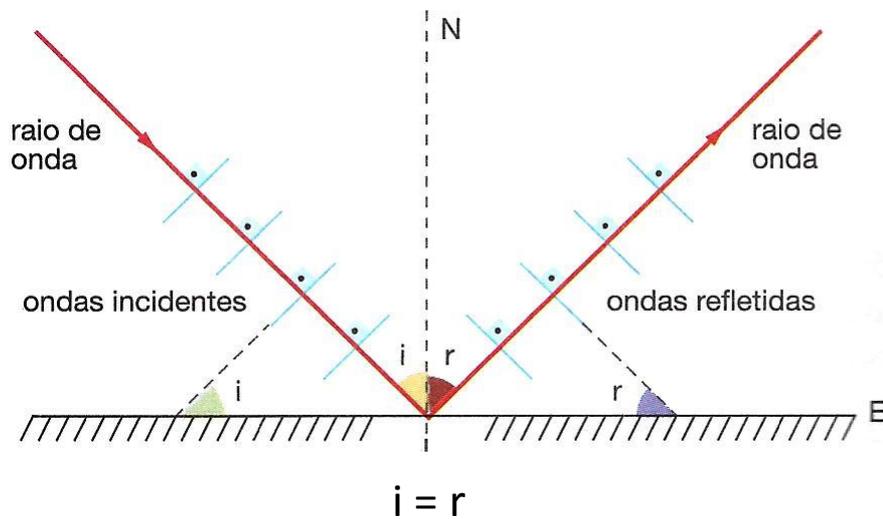
Frente de ondas planas



Frente de ondas circulares

17.6.2 Reflexão de ondas

Durante a reflexão de uma onda, o ângulo de incidência i será igual ao ângulo de reflexão r .

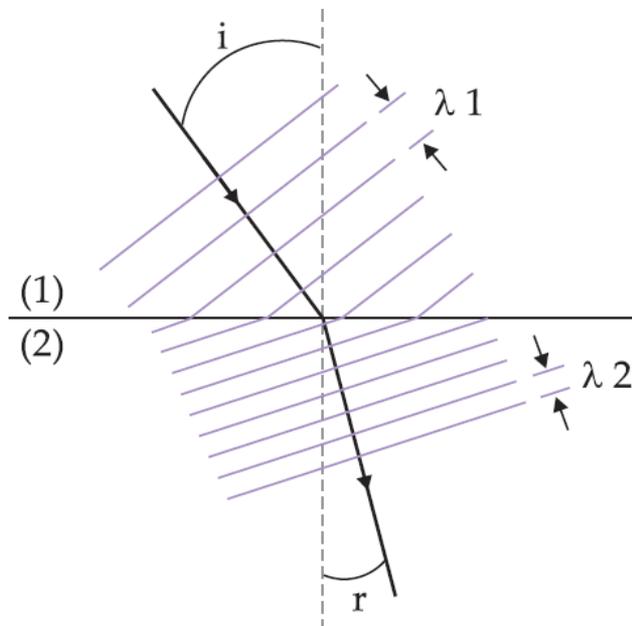


Reflexão de uma onda circular

17.6.3 Refração de ondas

As mesmas leis vistas na refração luminosa são aplicáveis às ondas.

Obs.: Durante a refração a frequência da onda permanece constante.

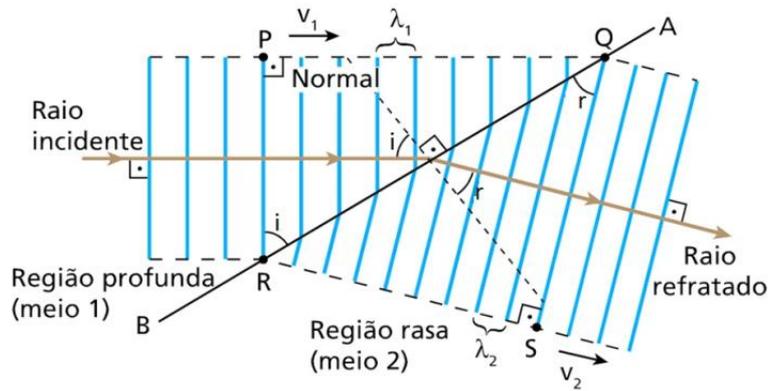


1ª Lei – Os raios incidente, refratado e a normal são coplanares.

2ª Lei (Snell-Descartes) – A razão entre o seno do ângulo formado junto à normal e a velocidade da onda no meio é constante.

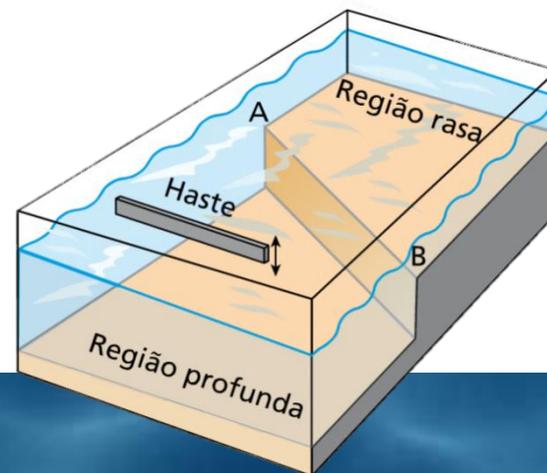
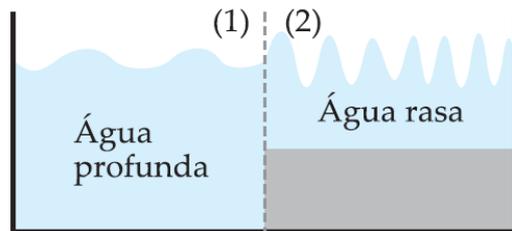
$$\frac{\text{Sen } i}{v_1} = \frac{\text{Sen } r}{v_2}$$

Quando uma onda é produzida em um líquido – seja em um recipiente ou até mesmo em mar aberto – sua velocidade varia de acordo com a profundidade. A onda é mais rápida ($v_1 > v_2$) na região profunda, onde seu comprimento de onda é maior ($\lambda_1 > \lambda_2$). Observe os esquemas.



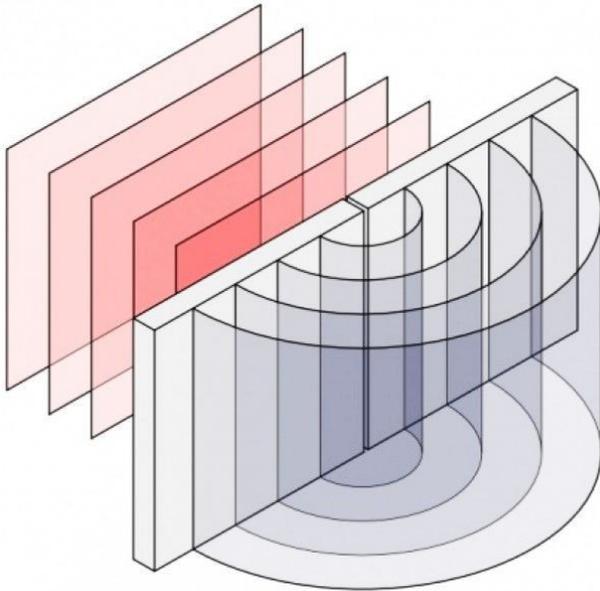
$$f_1 = f_2 \Rightarrow$$

$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}$$

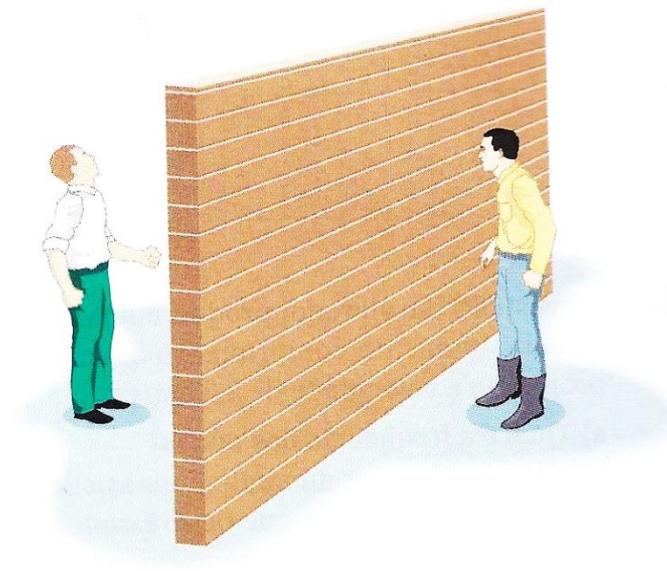


17.6.4 Difração de ondas

É a capacidade que uma onda tem de passar por fendas ou contornar objetos quando é parcialmente interrompida por eles. Por isso que conseguimos ouvir duas pessoas conversando através de uma porta, ou ouvir alguém por trás de um muro.



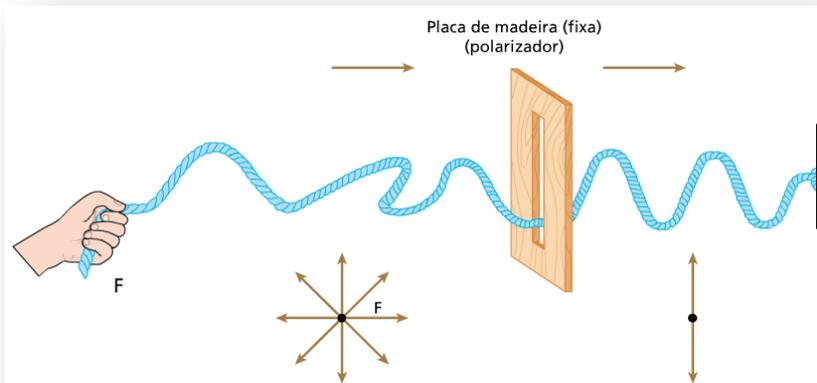
Onda plana passando por uma fenda.



Apesar do muro, duas pessoas conseguem conversar.

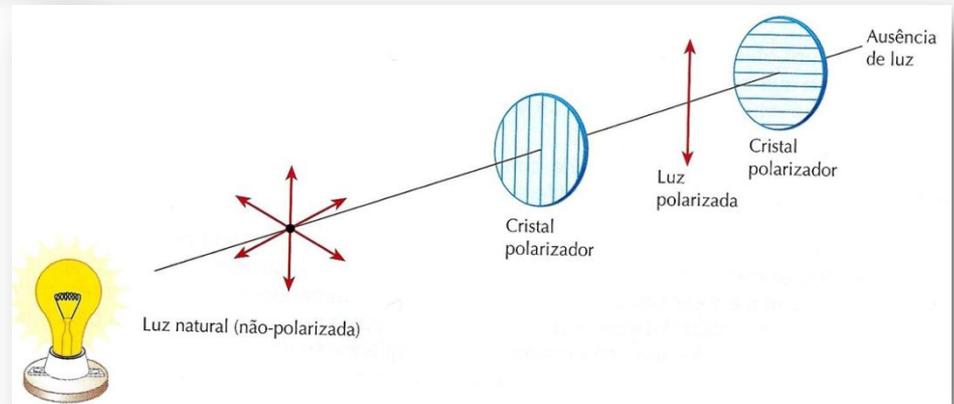
17.6.5 Polarização

Podemos utilizar um filtro polarizador para selecionarmos a direção que a onda deve passar. A polarização é uma característica exclusiva das ondas transversais.



Polarização de uma onda mecânica.

Polarização de uma onda eletromagnética.



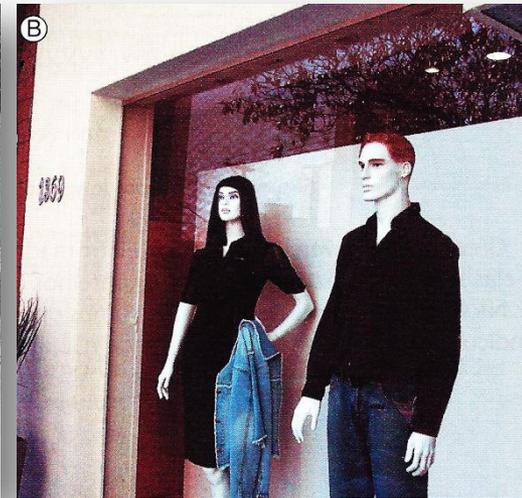
Ex. 1. O cinema 3D (IMAX) usa lentes polarizadoras – cada lente permite a passagem da luz em uma direção diferente, fazendo com que cada olho receba imagens ligeiramente diferentes, criando a ilusão do tridimensional.



Ex. 2. Parte da luz refletida em uma superfície é polarizada em uma determinada direção. Podemos, em uma fotografia, fazer uso de um filtro polarizador para reduzirmos o reflexo.



Sem polarizador.



Com polarizador.

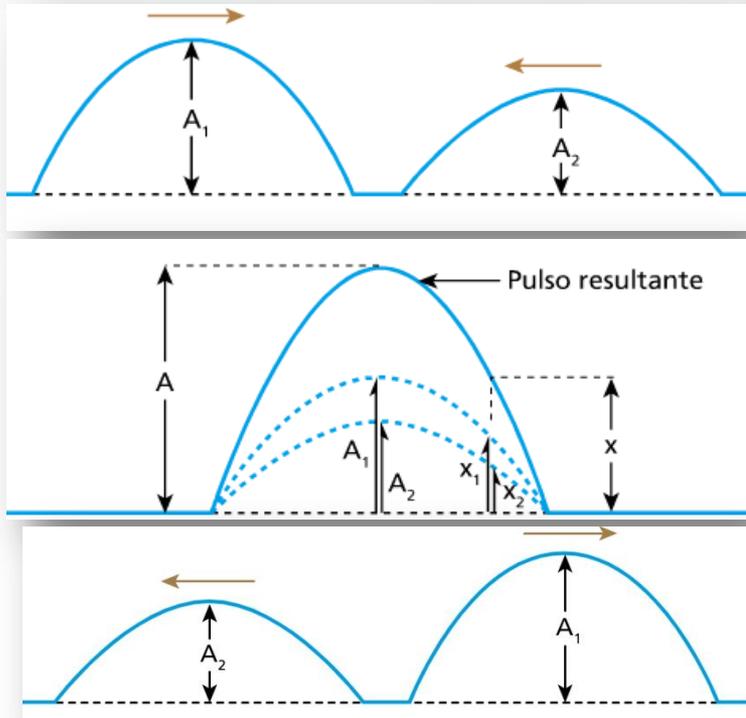
17.7 INTERFERÊNCIA OU SUPERPOSIÇÃO

É o fenômeno que decorre do encontro de duas ondas de mesma natureza. Como veremos, a interferência pode ser de dois tipos: construtiva e destrutiva.

17.7.1 Interferência Unidimensional

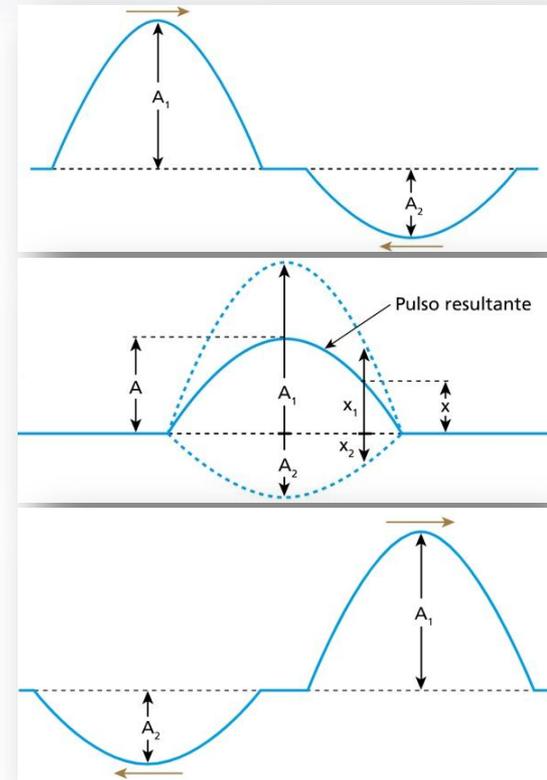
Vejamos o que acontece quando dois pulsos produzidos em um mesmo fio se encontram.

a) **Pulsos em fase:** interferência construtiva.



$$A = A_1 + A_2$$

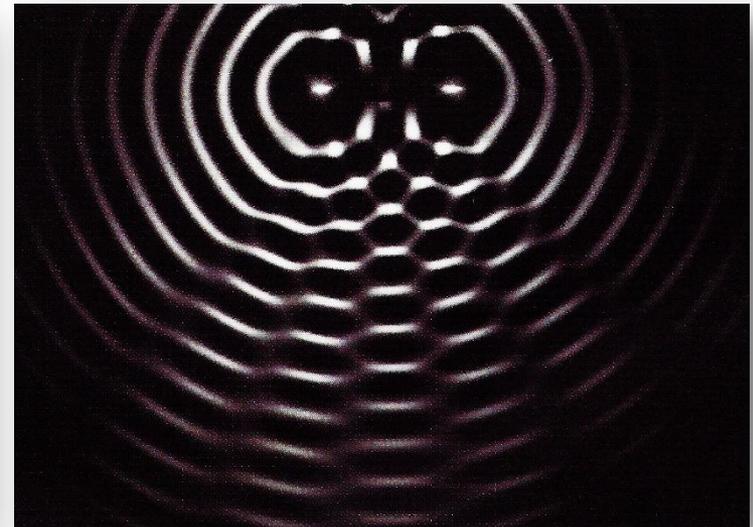
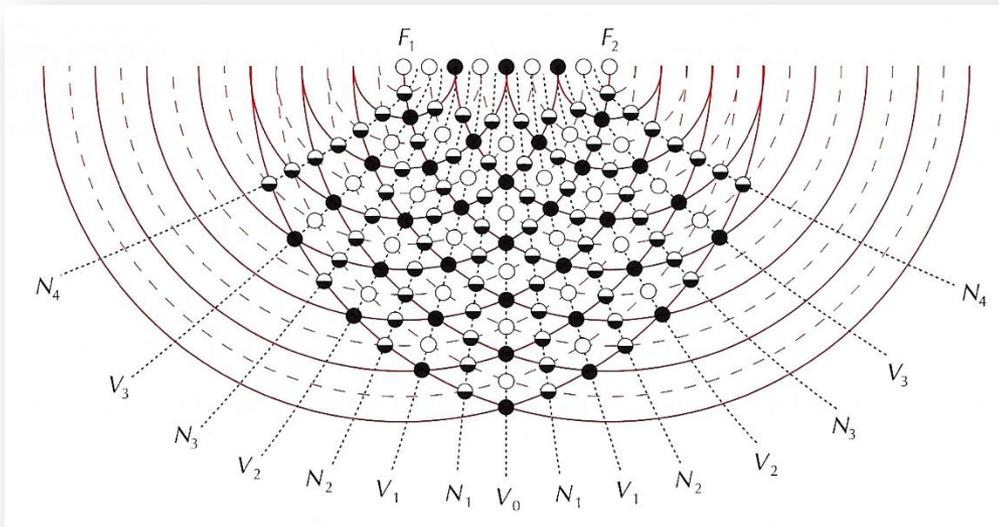
b) **Pulsos em oposição de fase:** interferência destrutiva.



$$A = A_1 - A_2$$

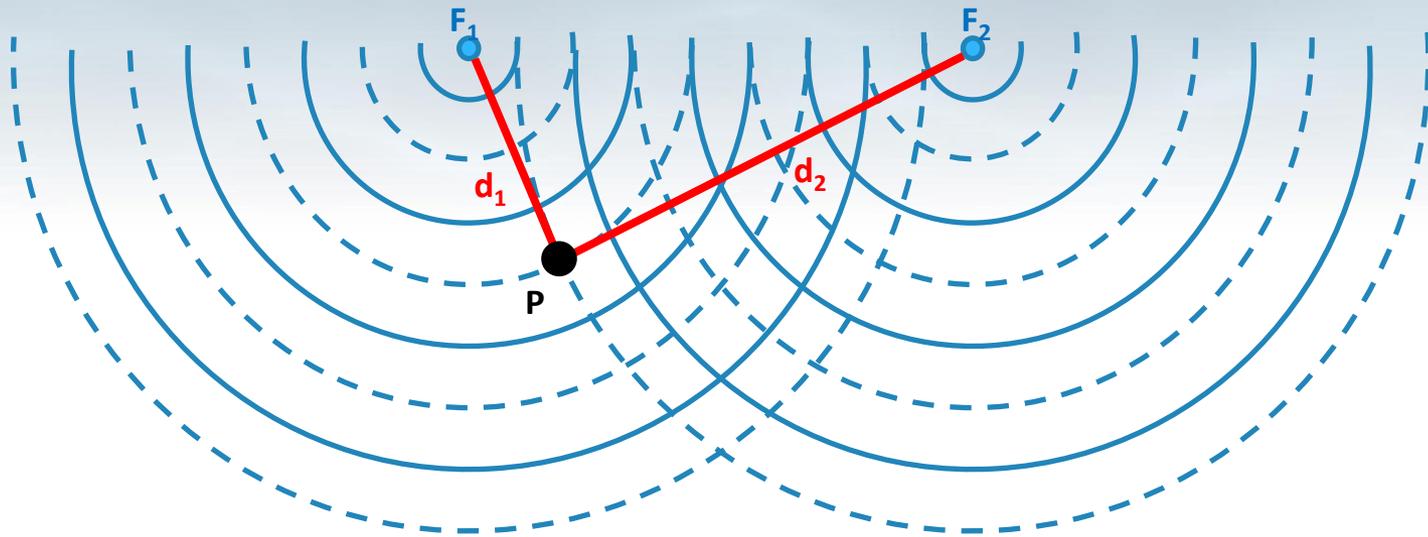
17.7.1 Interferência Bidimensional

Tomemos o exemplo de duas fontes (F_1 e F_2) que tocam simultaneamente na água (**fontes em fase**) dando origem a várias ondas.



Os pontos totalmente pretos ou brancos representam interferências construtivas, enquanto os pontos pretos e brancos representam interferência destrutiva. As linhas formadas por interferências destrutivas são as nodais (N) e as por construtivas são as ventrais.

a) Interferência construtiva



$$d_1 = 2\lambda$$

$$d_2 = 4\lambda$$

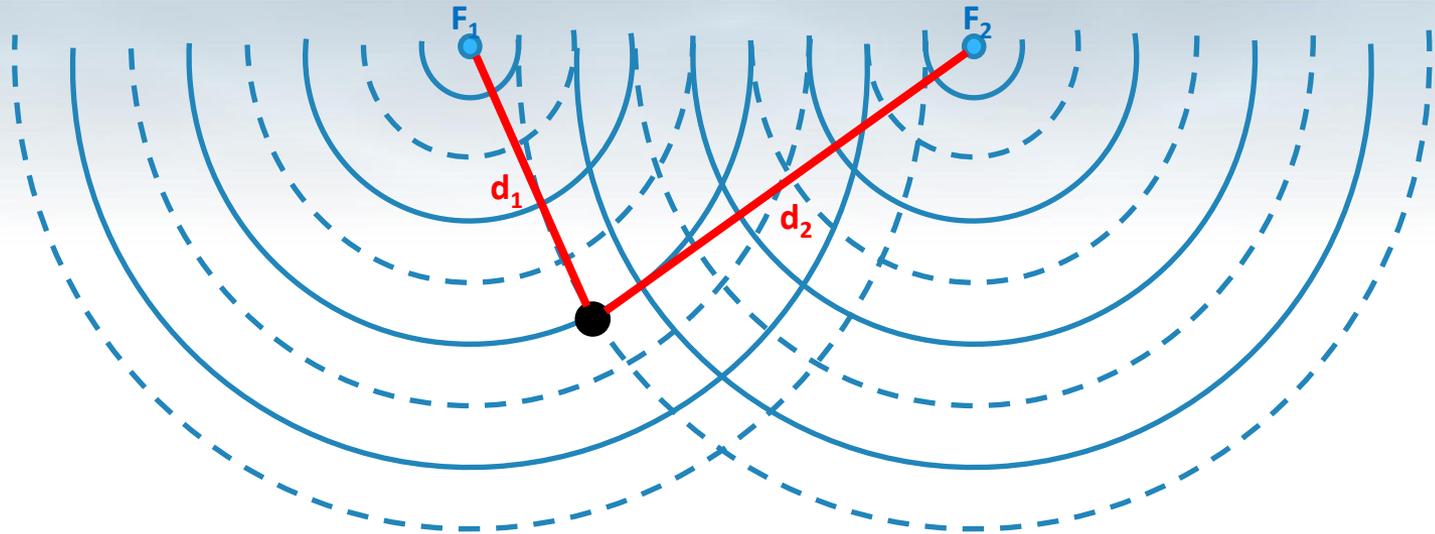
$$d_2 - d_1 = 2\lambda$$

Nos pontos onde ocorre interferência construtiva, a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas é sempre igual a n vezes meio comprimento de onda, onde n é um número par.

$$\Delta d = d_2 - d_1 = n \frac{\lambda}{2}$$

$$n = 0, 2, 4, \dots$$

b) Interferência destrutiva



$$d_1 = 2,5\lambda$$

$$d_2 = 4\lambda$$

$$d_2 - d_1 = 1,5\lambda$$

Nos pontos onde ocorre interferência destrutiva, a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas é também, sempre igual, a n vezes meio comprimento de onda, onde dessa vez, n é um número ímpar.

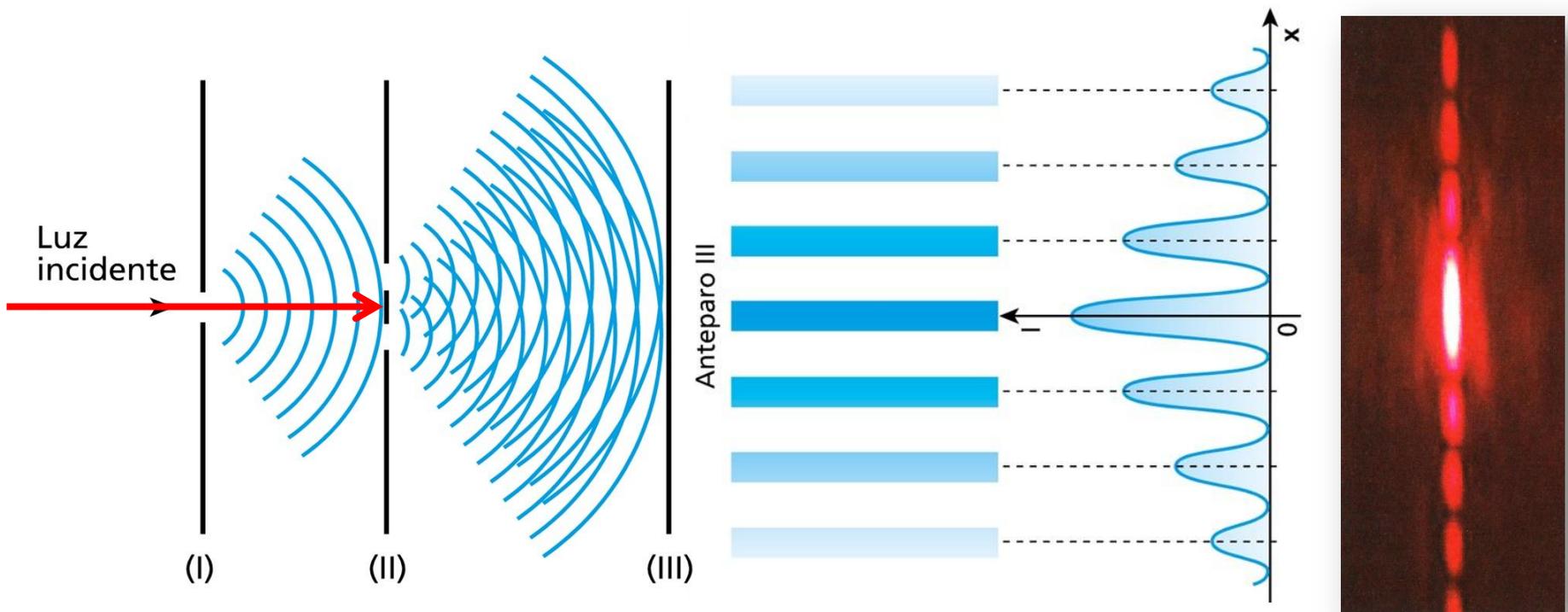
$$\Delta d = d_2 - d_1 = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Atenção!!!

Se as fontes trabalhassem em **oposição de fase**, a **interferência construtiva** ocorreria quando n fosse **ímpar**, enquanto a **destrutiva** apresentaria os **números (n) pares**, invertendo a regra.

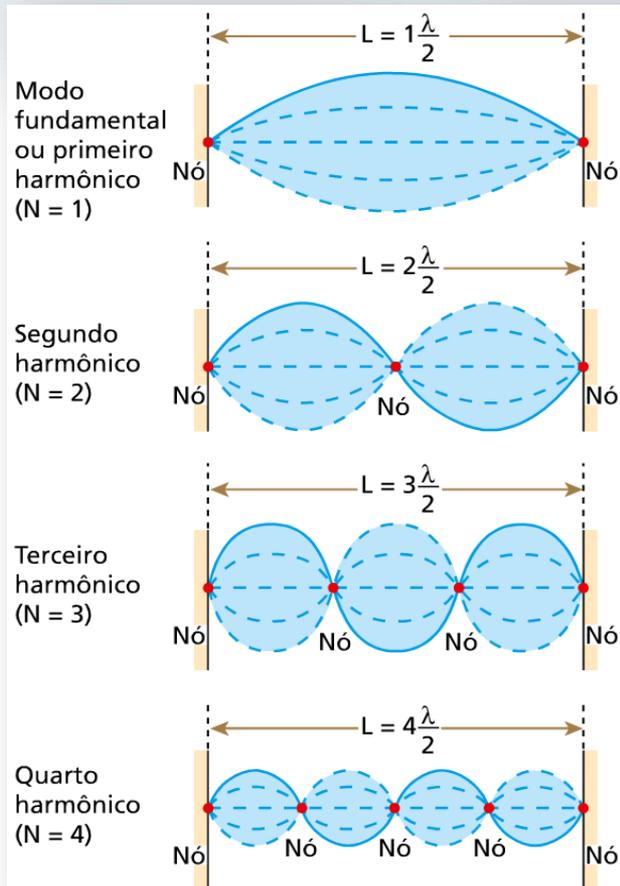
17.8 Experiência de Young

Nessa experiência, a luz passará pela fenda do anteparo (I), e depois pelas fendas do anteparo (II). Se a luz tivesse natureza apenas corpuscular, quando fosse aplicado o princípio da propagação retilínea, a mesma ficaria bloqueada pelo anteparo (II). Com seu experimento, Young provaria que a luz é uma onda, pois observamos o fenômeno da difração e da interferência ocorrendo, além da aplicação do princípio de Huygens, o que não se observa nas partículas.



17.9 Ondas estacionárias (harmônicos)

Quando colocamos uma corda para vibrar a velocidade de propagação é constante, haja vista que a mesma só depende da tração e da densidade linear (equação de Taylor).



Para determinadas frequências, perceberemos a formação de ventres, cujo número coincide com o número de harmônicos. Conforme a figura ao lado, é fácil de ver que o número de harmônicos (n) é calculado por:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \boxed{n = \frac{2L}{\lambda}}$$

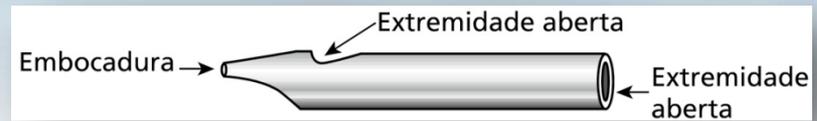
Para cada harmônico existe uma frequência fundamental, facilmente obtida por:

$$\left. \begin{aligned} L = n \cdot \frac{\lambda}{2} &\Rightarrow \lambda = \frac{2L}{n} \\ v = \lambda \cdot f &\Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} \end{aligned} \right\} \frac{2L}{n} = \frac{v}{f} \Rightarrow \boxed{f = \frac{n \cdot v}{2L}}$$

17.10 TUBOS SONOROS

17.10.1 Tubos abertos

São assim chamados aqueles que têm as duas extremidades abertas.



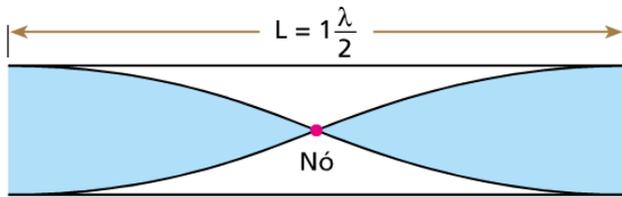
Conforme a figura ao lado, é fácil de ver que o número de harmônicos (n) é calculado por:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \boxed{n = \frac{2L}{\lambda}}$$

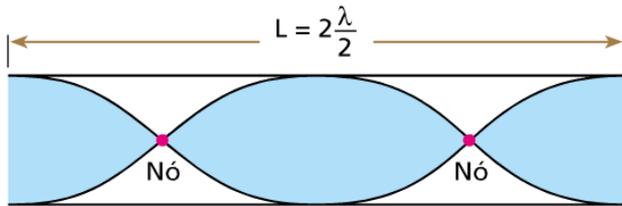
Analogamente ao que ocorre nas cordas vibrantes, para cada harmônico existe uma frequência fundamental (f_n), facilmente obtida por:

$$\left. \begin{aligned} L = n \cdot \frac{\lambda}{2} &\Rightarrow \lambda = \frac{2L}{n} \\ v = \lambda \cdot f &\Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} \end{aligned} \right\} \frac{2L}{n} = \frac{v}{f} \Rightarrow \boxed{f_n = \frac{n \cdot v}{2L}}$$

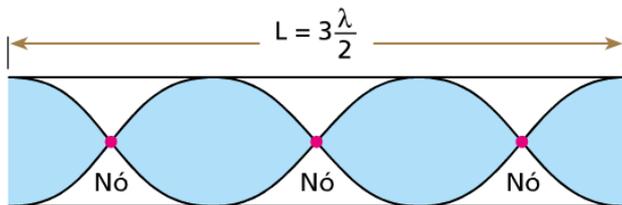
Modo fundamental ou primeiro harmônico ($N = 1$)



Segundo harmônico ($N = 2$)

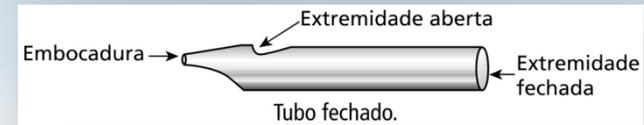


Terceiro harmônico ($N = 3$)



17.10.2 Tubos fechados

São assim chamados aqueles que têm uma das extremidades fechada.



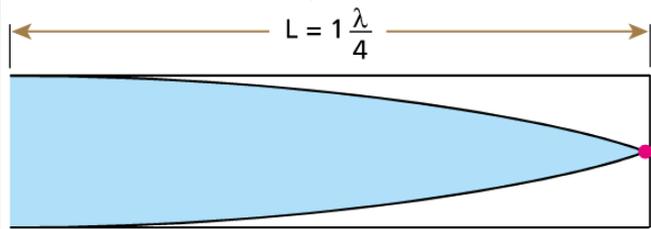
Conforme a figura ao lado, é fácil de ver que o número de harmônicos (n) é calculado por:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \boxed{n = \frac{4L}{\lambda}}$$

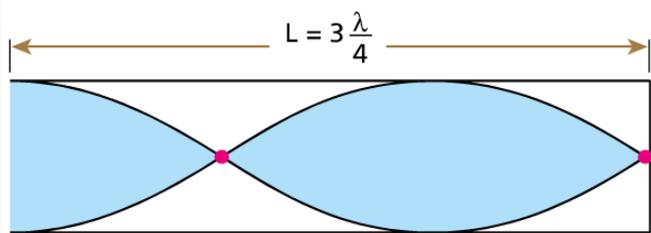
Semelhantemente ao que foi demonstrado nos tubos abertos, teremos:

$$\left. \begin{array}{l} L = n \cdot \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \lambda = \frac{4L}{n} \\ v = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} \end{array} \right\} \frac{4L}{n} = \frac{v}{f} \Rightarrow \boxed{f_n = \frac{n \cdot v}{4L}}$$

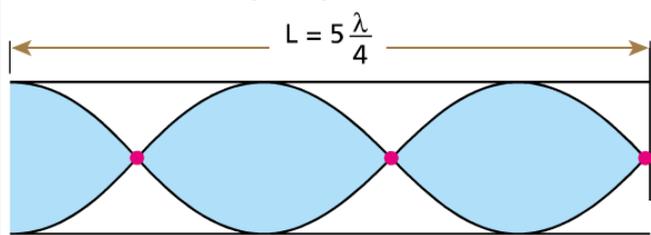
Modo fundamental ou primeiro harmônico ($N = 1$)



Terceiro harmônico ($N = 3$)



Quinto harmônico ($N = 5$)



17.11 ACÚSTICA

17.11.1 Velocidade do som

Via de regra, os sólidos propagam o som melhor do que os líquidos, e estes, melhor do que os gases. Tal fato decorre da proximidade das moléculas, ou seja, de uma maior densidade. Observe as velocidades na tabela abaixo:

Meio	Velocidade (m/s)
Ar (20° C)	343
Álcool (25° C)	1.207
Hidrogênio (0° C)	1.280
Água (20° C)	1.480
Prata (0° C)	2.700
Cobre (0° C)	3.560
Vidro (0° C)	4.540
Alumínio (0° C)	5.000
Ferro (0° C)	5.200
Aço (0° C)	5.940
Granito (0° C)	6.000

17.11.2 Qualidades fisiológicas do som

a) **Altura ou tom:** permite classificar o som em grave ou agudo. Quanto maior a frequência do som mais agudo será o mesmo. A voz do homem tem frequência que varia entre 100 Hz e 200 Hz, já a mulher entre 200 Hz e 400 Hz. Nosso ouvido capta frequências entre 20 Hz e 20.000 Hz.

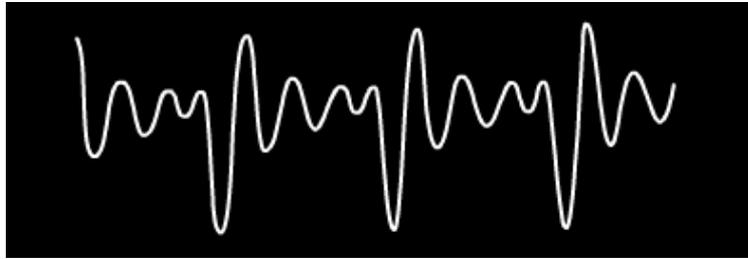
b) **Intensidade, sonoridade ou volume:** é a qualidade que permite distinguirmos se um som é forte ou fraco (alto ou baixo). Tal característica está ligada a amplitude das ondas, que quanto maior, mais alto é o som.

A sensação de aumento de volume não é linear, experimentalmente tem se demonstrado que tal relação é logarítmica. Dessa forma, podemos calcular a intensidade sonora β pela relação:

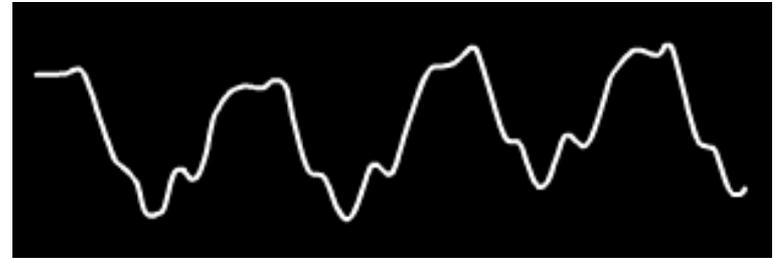
$$\beta = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Onde β é dado em decibel (dB) e I_0 é a mínima intensidade física de uma onda audível – algo próximo de 10^{-12} w/m².

c) **Timbre:** é a característica que permite identificar um som de mesma frequência. É a “impressão digital” do som. Por melhor que seja o imitador, ele não conseguirá imitar o timbre de voz de uma pessoa, pois tal característica é única. Observe as impressões da nota Fá no trompete e no violão.



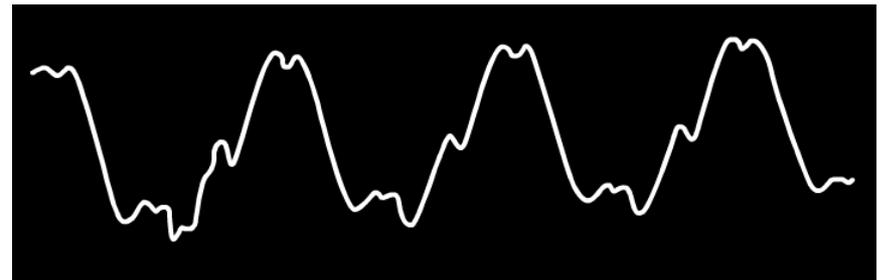
Trompete



Violão



Trompete sintetizado



Violão sintetizado

17.11.3 Efeito Doppler

Quando uma pessoa se aproxima de uma fonte sonora em repouso, a frequência ouvida será maior do que quando a pessoa se afasta. O mesmo acontece quando a pessoa está em repouso e a fonte se aproxima. Assim, a frequência percebida depende do movimento relativo entre a fonte e o observador.

$$\frac{f_O}{v_S \pm v_O} = \frac{f_F}{v_S \pm v_F}$$

f_O (frequência ouvida pelo observador);
 f_F (frequência emitida pela fonte);
 v_S (velocidade do som no ar);
 v_O (velocidade do observador);
 v_F (velocidade da fonte).



WWW.RONALDOXAVIER.BLOGSPOT.COM.BR

ronaldoxavier@gmail.com



[@ronaldoxavier](https://twitter.com/ronaldoxavier)



[facebook.](https://www.facebook.com/profronaldoxavier)

[www.fb.com/profronaldoxavier](https://www.facebook.com/profronaldoxavier)