

*Física IV*

# Movimento Ondulatório

**Prof. Dr. Lucas Barboza Sarno da Silva**

# *Movimento Oscilatório no cotidiano*



Ondas no mar



Fontes de energia renovável

# *Movimento Oscilatório no mundo moderno*



Indústria da Música



Gravadora



Concerto ao vivo

# *Movimento Oscilatório*

Tipos de ondas:

- **ONDAS MECÂNICAS**, como ondas do mar, ondas numa corda, ondas sonoras, ondas sísmicas, ondas de choque...  
*Características: são governadas pelas leis de Newton e existem apenas em meios materiais.*
- **ONDAS ELETROMAGNÉTICAS**, como a luz visível, ondas de rádio, os sinais de televisão, os raios X...  
*Característica: não necessita de um meio material para existir.*
- **ONDAS DE MATÉRIA**, são associadas a elétrons, prótons e outras partículas elementares.

# *Ondas Mecânicas*

O conceito de onda é meio abstrato.

- Ondas em água, o que vemos é uma deformação da superfície da água. Sem a água não haveria a onda.
- Uma numa corda.
- As ondas sonoras (variações de pressão de ponto para ponto).

*Então, o que interpretamos como onda corresponde a uma perturbação de um corpo, ou meio, de propagação. Portanto, podemos considerar uma onda como o movimento de uma perturbação.*

# *Movimento Oscilatório*

## Exemplos:

- A onda se desloca de um ponto para outro, mas a água não é arrastada pela onda.



- O vento ao passar em campo de trigo.

As partículas que constituem o meio efetuam apenas pequenas vibrações, mas o movimento global é o de uma onda que avança.



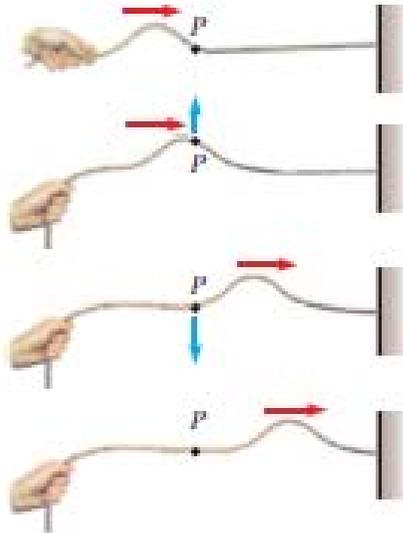
# *Ondas Mecânicas*

- Fonte de alimentação
- Meio que possa ser perturbado
- Alguma conexão física, ou mecanismo físico, mediante o qual partes vizinhas do meio possam se influenciar mutuamente

*Todas as ondas transportam energia.*

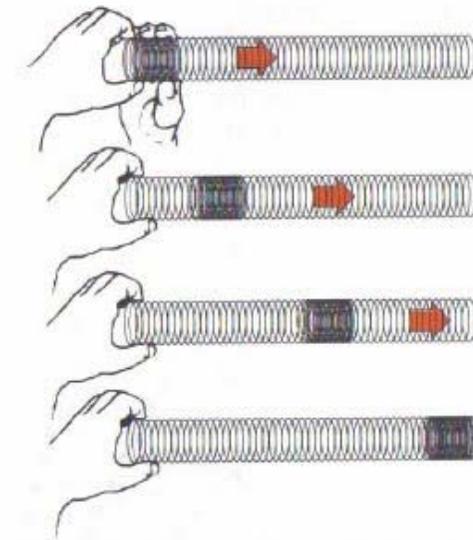
# *Tipos de onda:*

**Ondas progressiva**, é uma onda que se propaga com uma velocidade definida.



*Onda transversal*

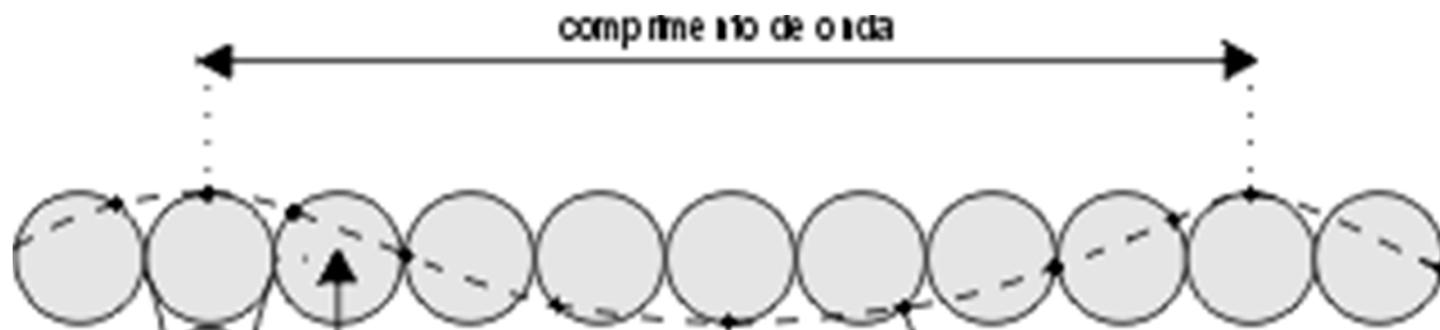
*As partículas do meio se deslocam perpendicularmente à direção da velocidade da onda.*



*Onda longitudinal*

*As partículas do meio se deslocam paralelamente à direção do movimento da onda.*

Ondas num lago?



Transversal e longitudinal

*Quando a onda passa, as moléculas da água, nas cristas, deslocam-se na direção da onda, e as moléculas no fundo da onda se movem na direção oposta, traçando trajetórias quase circulares.*

# Descrição quantitativa de ondas progressivas unidimensionais

$y = f(x - vt)$   $\longrightarrow$  Deslocamento para direita

$y = f(x + vt)$   $\longrightarrow$  Deslocamento para esquerda

- O deslocamento  $y(x,t)$  é chamado de **função de onda**, e representa a coordenada  $y$  de qualquer ponto P, em qualquer instante  $t$ .
- Se  $t$  for fixo, então a função de onda  $y$  define a curva que representa a forma real do pulso nesse instante.

# *Interferência de ondas*



Ondas num lago



Conversa entre duas pessoas

# Interferência de ondas

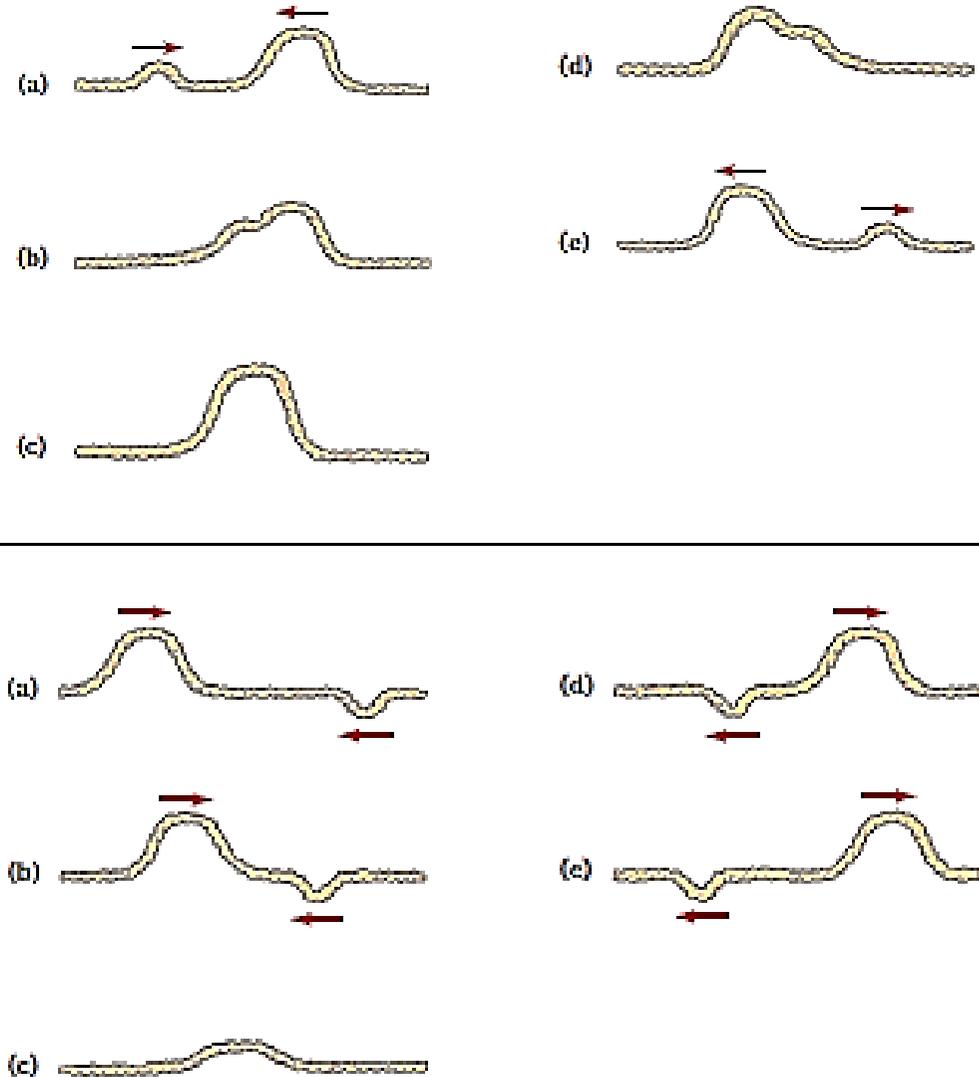
Princípio da Superposição:

Onda 1:  $y_1 = f_1(x - vt)$

Onda 2:  $y_2 = f_2(x + vt)$

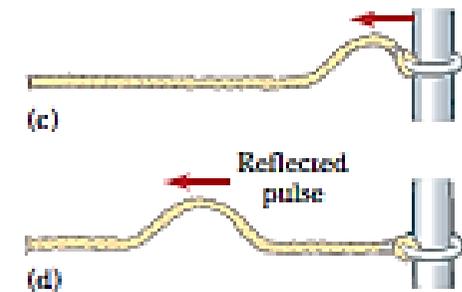
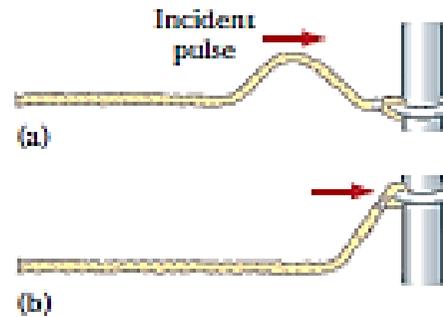
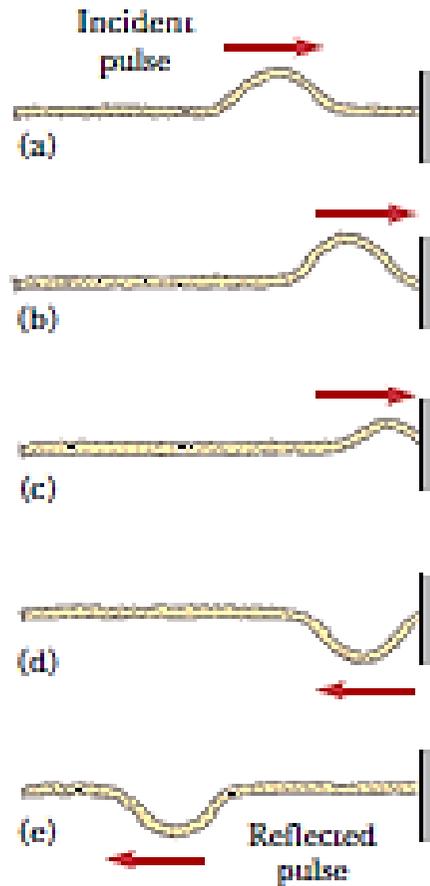
$$y'(x, t) = y_1 + y_2$$

$$y'(x, t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$$



# Reflexão de onda

## Reflexão de um pulso ondulatório



O pulso refletido não está invertido

O pulso refletido está invertido

# *Ondas Harmônicas*

- Fonte de alimentação
- Meio que possa ser perturbado
- Alguma conexão física, ou mecanismo físico, mediante o qual partes vizinhas do meio possam se influenciar mutuamente

Todas as ondas transportam energia

Características de uma onda:

- **Comprimento de onda**
- **Frequência**
- **Velocidade da onda**

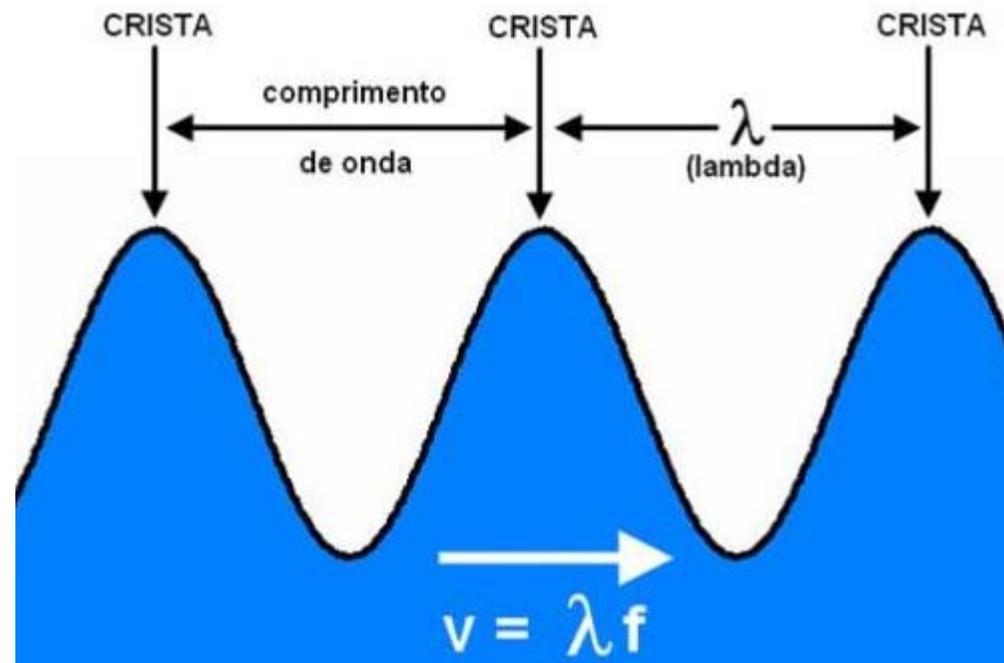
**Comprimento de onda:** a distância mínima entre dois pontos quaisquer de uma onda que se comportam identicamente.

**Frequência:** é a taxa temporal em que a perturbação se repete.

As ondas se deslocam, ou se propagam, com certa **velocidade**, que depende do meio que está sendo perturbado.

**Velocidade de som no ar a 20°C:** 344 m/s

**Velocidade de uma onda eletromagnética, no vácuo:**  $3 \times 10^8$  m/s



# *Ondas Harmônicas*

- Uma onda harmônica tem a forma senoidal

Em  $t = 0$  o deslocamento da curva pode ser escrito como:

$$y = A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

$A$  = amplitude da onda

$\lambda$  = comprimento de onda

# *Ondas Harmônicas*

Função de onda de uma onda harmônica:  $y = A \sin(kx - \omega t - \phi)$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \longrightarrow \text{número de onda}$$

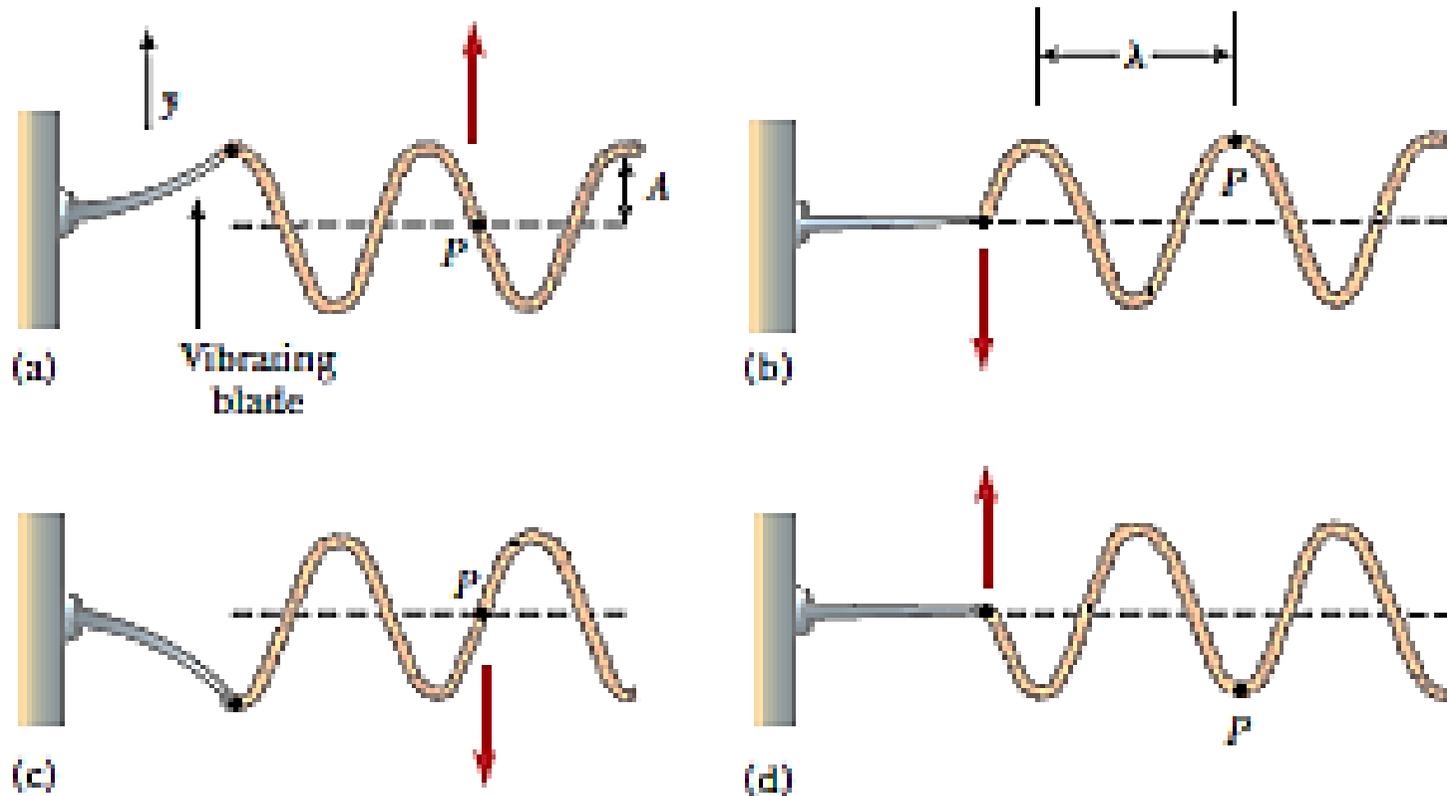
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \longrightarrow \text{frequência angular}$$

$$f = \frac{1}{T} \longrightarrow \text{frequência}$$

$$v = \frac{\omega}{k} = \lambda f \longrightarrow \text{velocidade de fase}$$

$$\phi \longrightarrow \text{constante de fase}$$

# *Ondas harmônicas numa corda*



# *Princípio da superposição aplicado a ondas harmônicas*

*Exemplos:*

- Uma corda tensionada, fixa nas duas extremidades, tem um conjunto discreto de formas de oscilação, denominados modos de vibração, que dependem da tensão na corda e da massa por unidade de comprimento. (Instrumentos musicais de cordas)
- Alguns outros instrumentos musicais usam as frequências naturais de ondas acústicas em tubos ocos. Essas frequências dependem do comprimento do tubo, da forma tubo e de uma extremidade estar aberta ou fechada. (Órgão e a flauta)

# *Ondas Estacionárias*

Se uma corda elástica tensionada estiver fixa em ambas as pontas, as ondas progressivas na corda se refletem nas extremidades fixas e provocam ondas que nela se propagam em duas direções.

As ondas incidente e refletida se combinam conforme o princípio da superposição.

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = A_0 \text{sen}(kx - \omega t) \\ y_2 = A_0 \text{sen}(kx + \omega t) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = A_0 \text{sen}(kx - \omega t) \\ y_2 = A_0 \text{sen}(kx + \omega t) \end{array} \right.$$

$$y = y_1 + y_2 = A_0 \text{sen}(kx - \omega t) + A_0 \text{sen}(kx + \omega t)$$

Identidade trigonométrica  $\longrightarrow \text{sen}(a \pm b) = \text{sen}(a)\cos(b) \pm \cos(a)\text{sen}(b)$

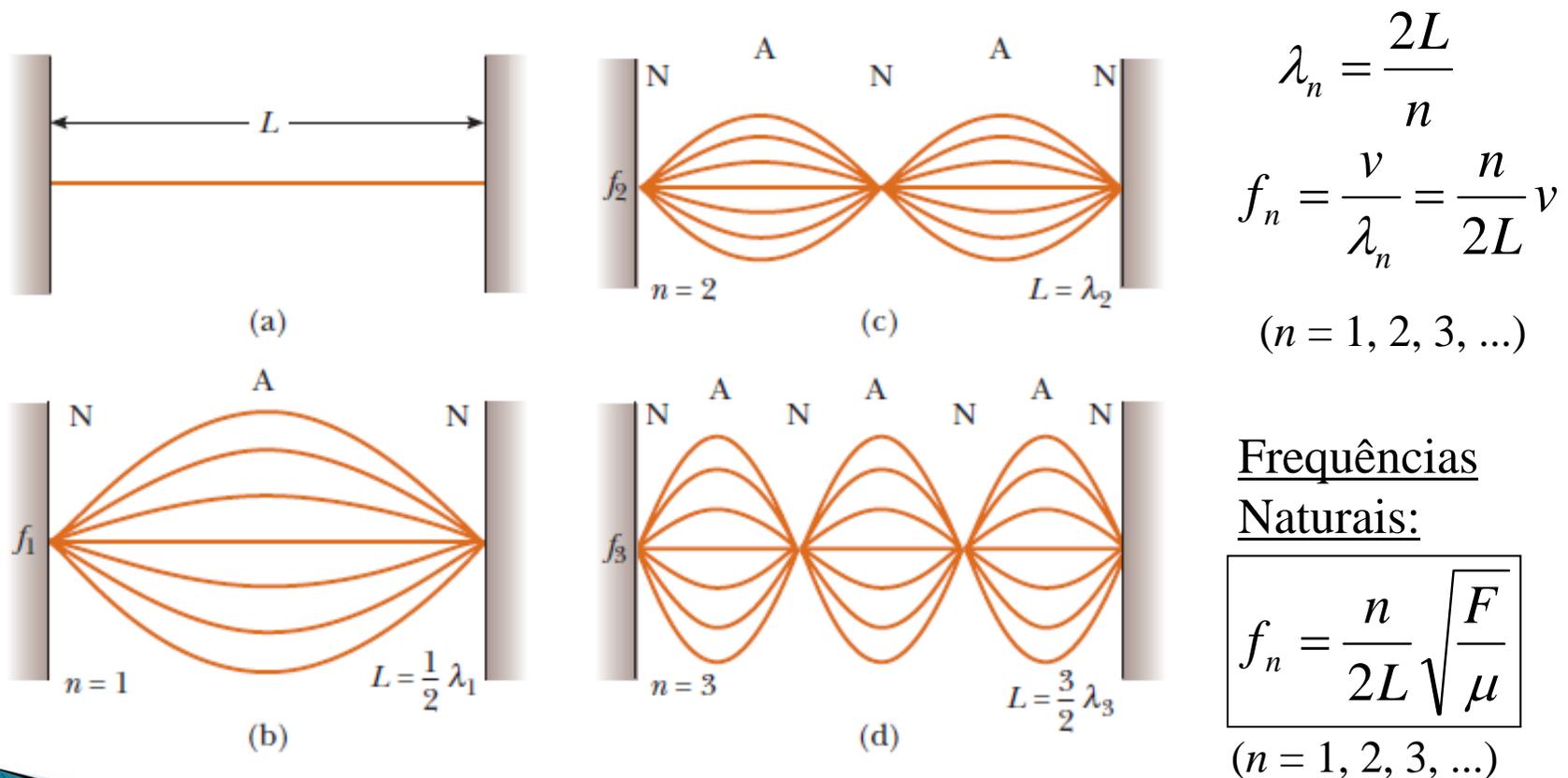
Função de onda resultante de uma **onda estacionária**:

$$y = [2A_0 \text{sen}(kx)] \cos(\omega t)$$

- A amplitude do movimento depende de  $x$ .

# *Ondas estacionárias numa corda fixa nas duas extremidades*

A corda tem diversas figuras naturais de vibrações: **os modos normais**



A frequência **fundamental**,  $n = 1$ :  $\longrightarrow f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$

Os outros modos de vibração, denominados **harmônicos**, são múltiplos inteiros da frequência fundamental.

$$2f_1, 3f_1, 4f_1, \dots$$

**Série harmônica:**  $f_1, 2f_1, 3f_1, 4f_1, \dots, nf_1$

*Primeiro harmônico:*  $f_1$

*Segundo harmônico:*  $2f_1$

*Terceiro harmônico:*  $3f_1$

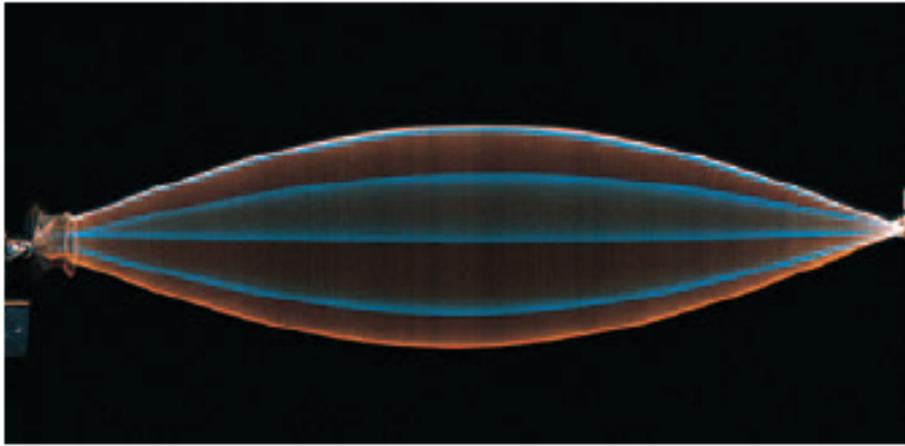
$\vdots$

*N-ésimo harmônico:*  $nf_1$

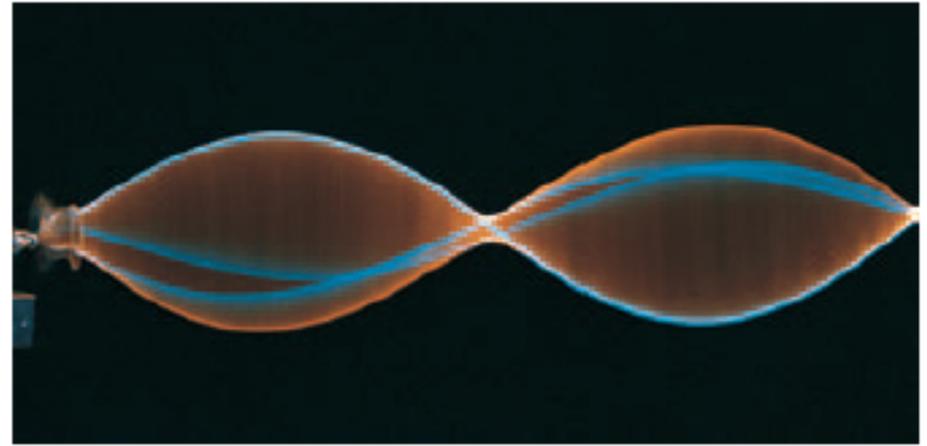
$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

- A tensão é utilizada para afinar o instrumento em determinada frequência.
- A medida que o comprimento diminui a frequência sobe.

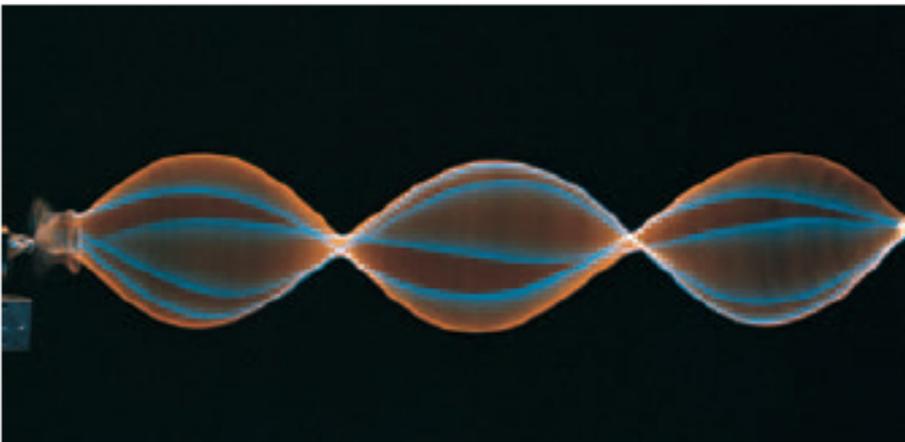




(a)



(b)



(c)

© Richard Megna, Fundamental Photographs

Multiflash photographs of standing-wave patterns in a cord driven by a vibrator at the left end. The single-loop pattern in (a) represents the fundamental frequency ( $n = 1$ ), the two-loop pattern in (b) the second harmonic ( $n = 2$ ), and the three-loop pattern in (c) the third harmonic ( $n = 3$ ).