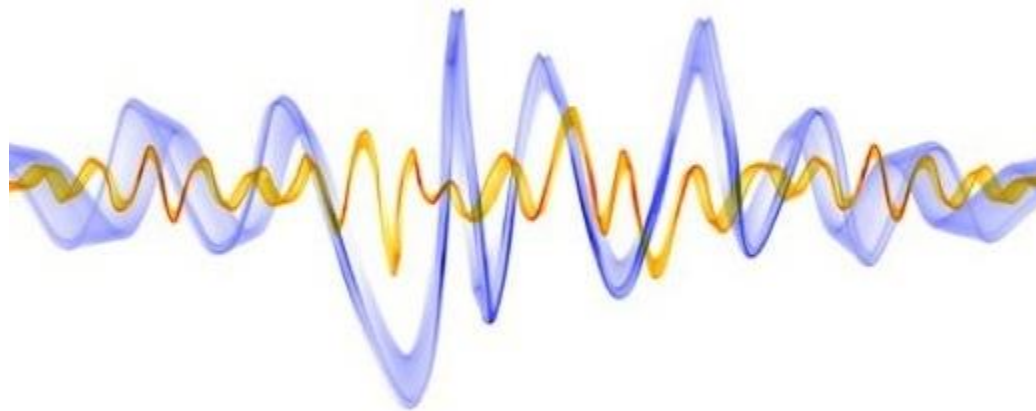
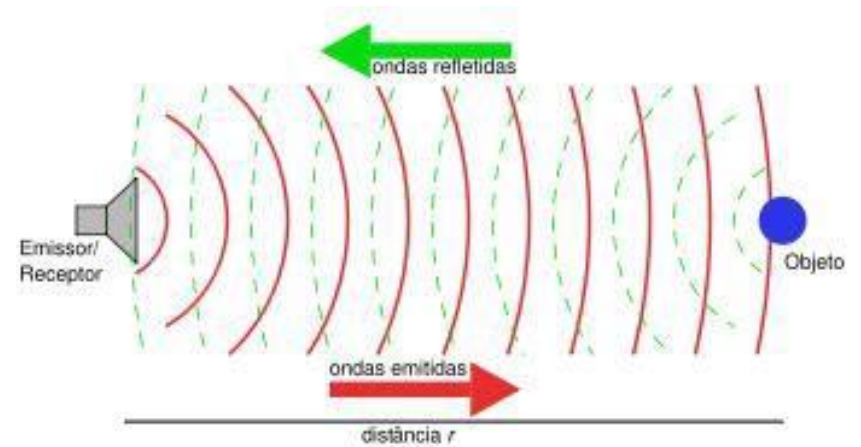
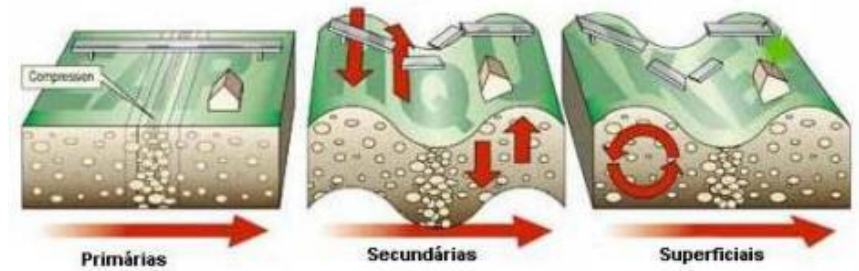
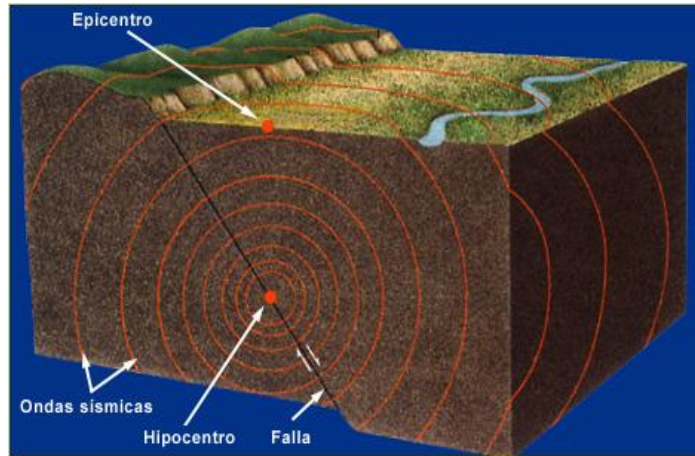


Módulo 03 - Física da Fala e da Audição

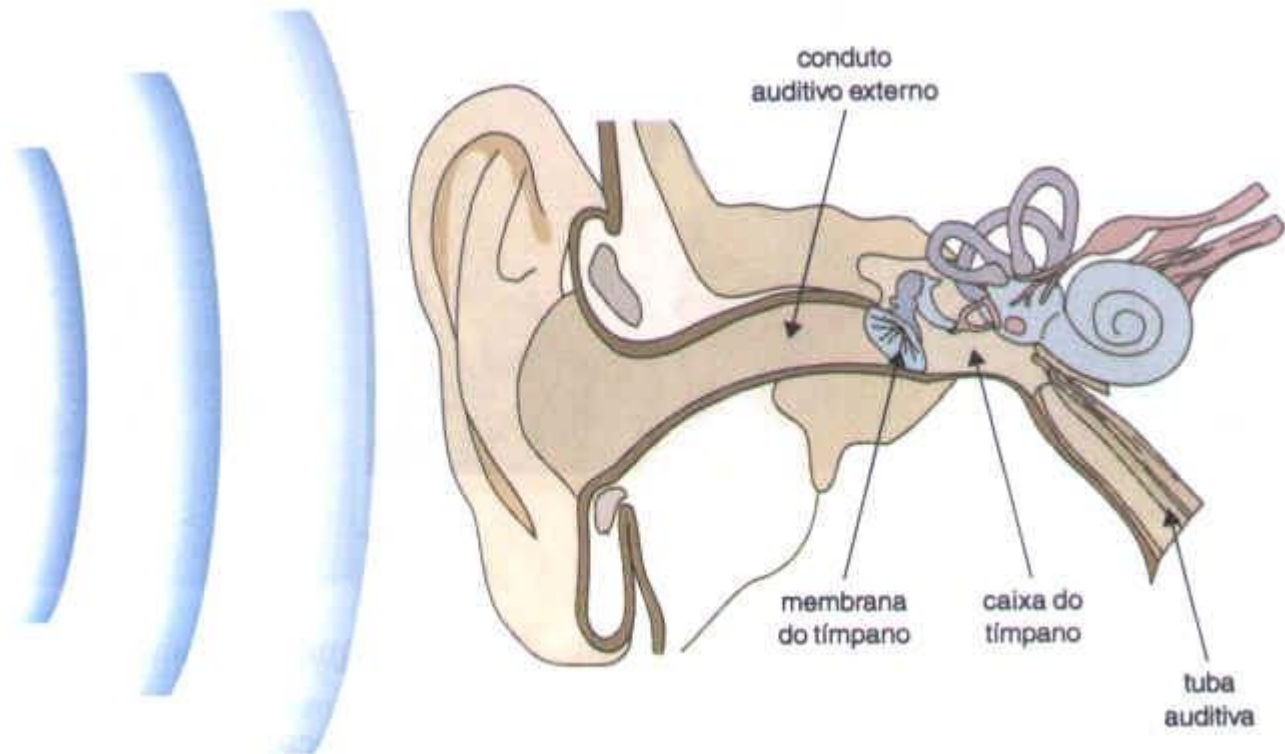
ONDAS



Ondas...

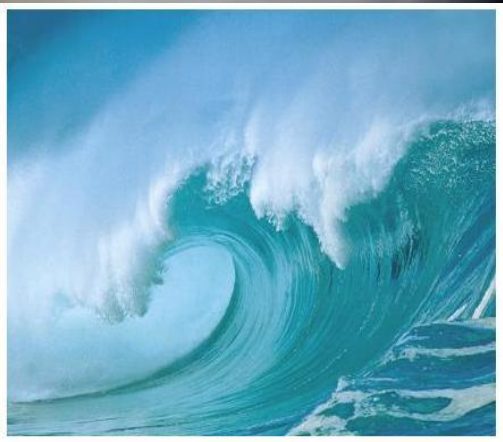
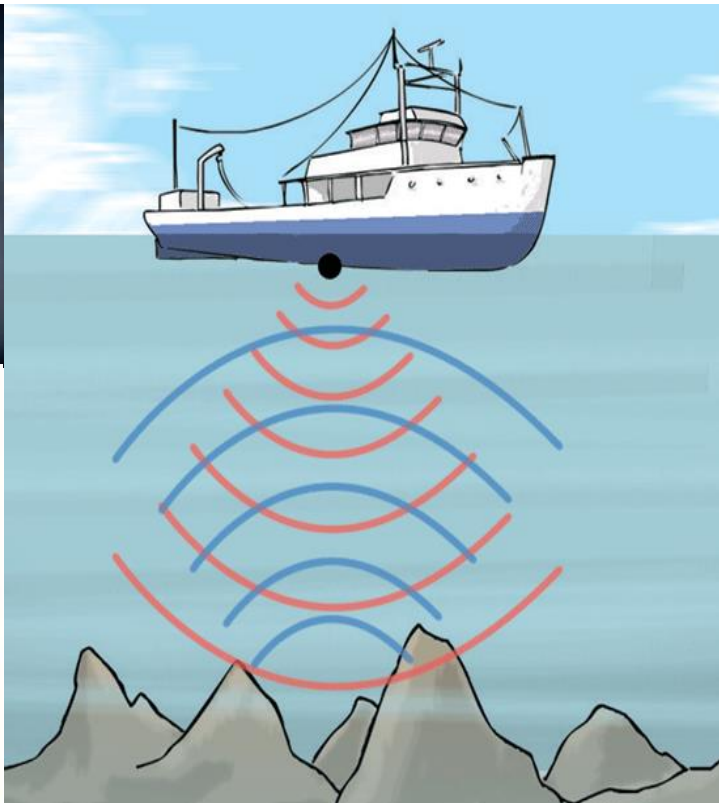


Ondas...



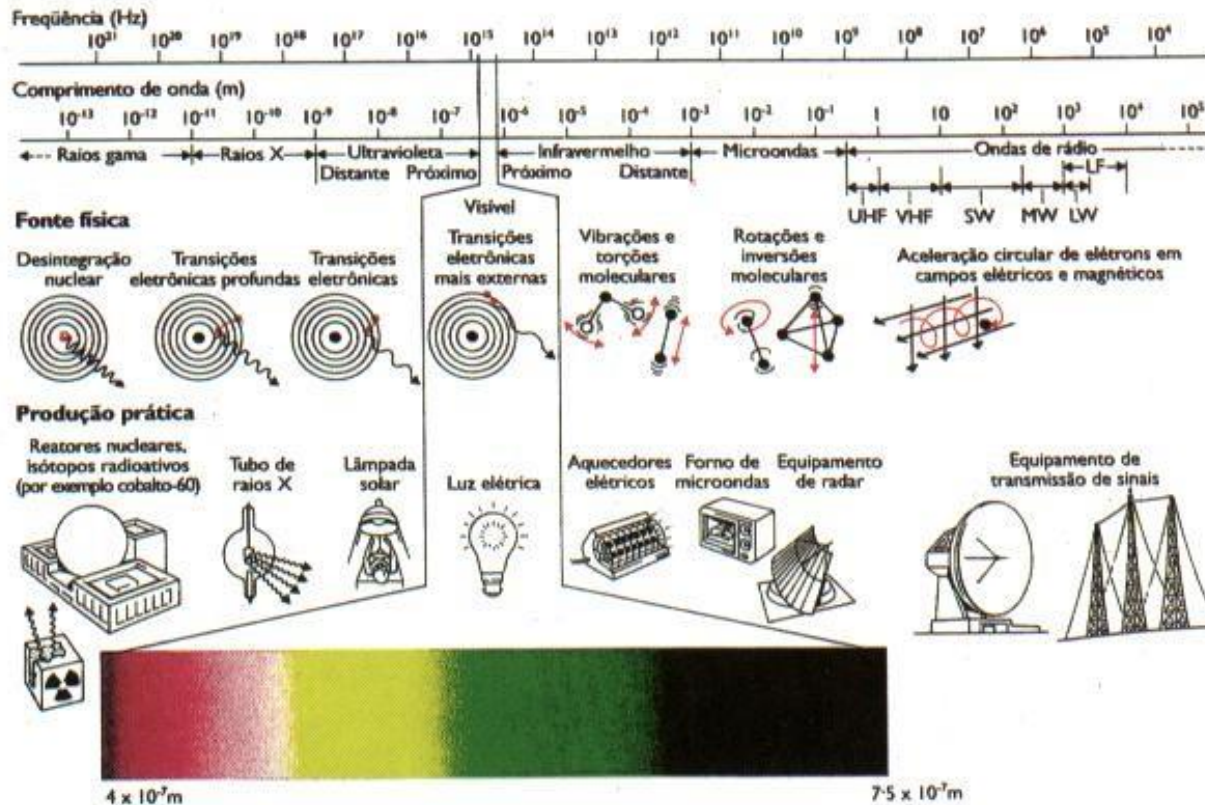
Tipos de Ondas

Ondas Mecânicas - São governadas pelas Leis de Newton e existem apenas em um meio material

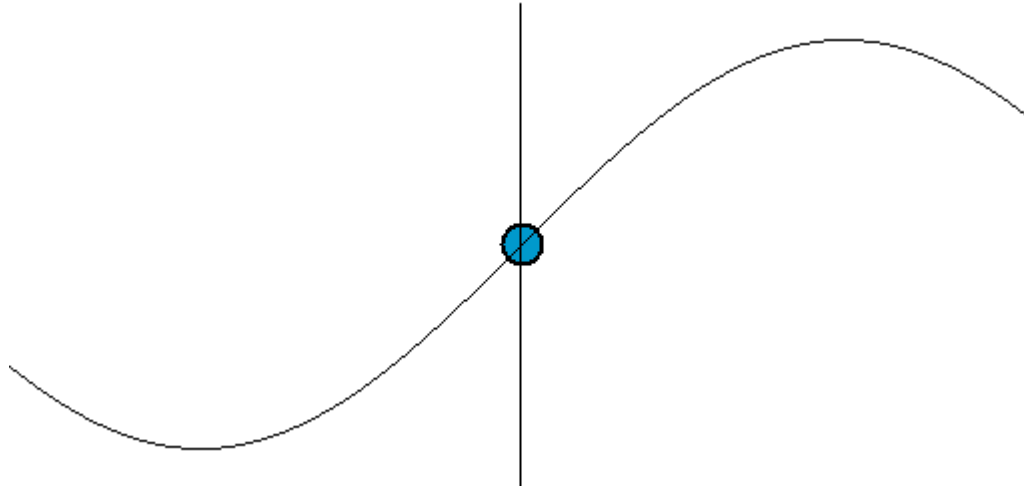


Tipos de Ondas

Ondas Eletromagnéticas - Não precisam de um meio material para se propagarem. Todas se propagam no vácuo com a mesma velocidade $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$

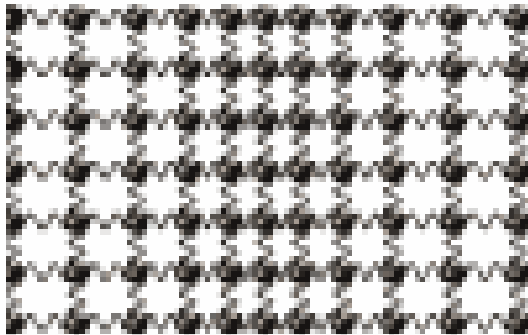
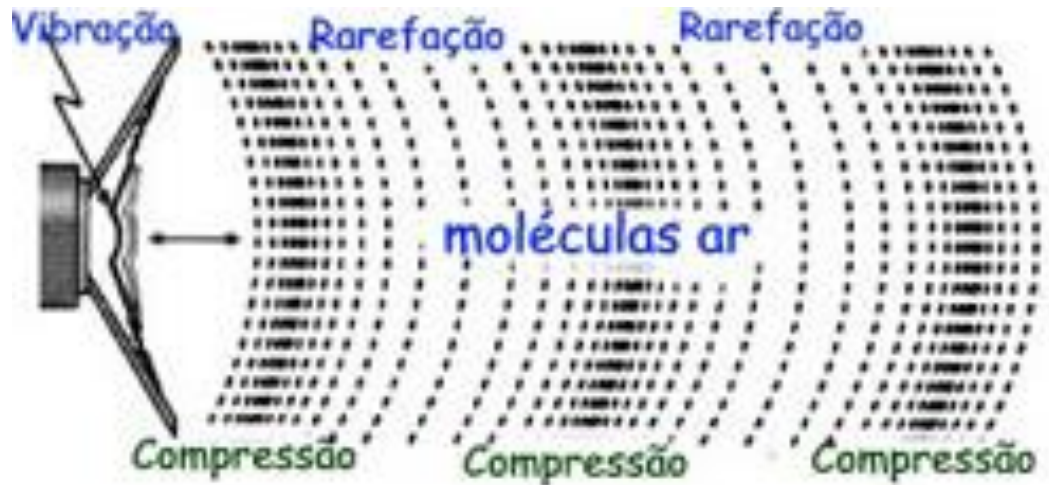
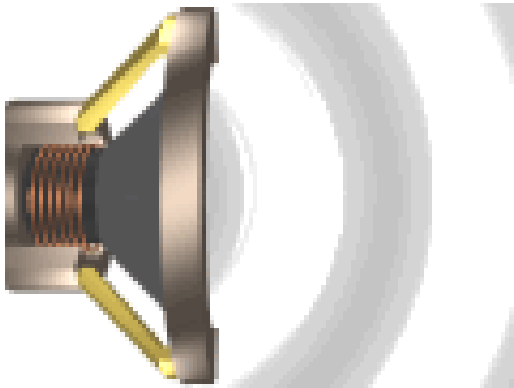


Ondas Transversais e Longitudinais



Onda Transversal - O deslocamento dos elementos é sempre perpendicular a direção de propagação...

Ondas Transversais e Longitudinais



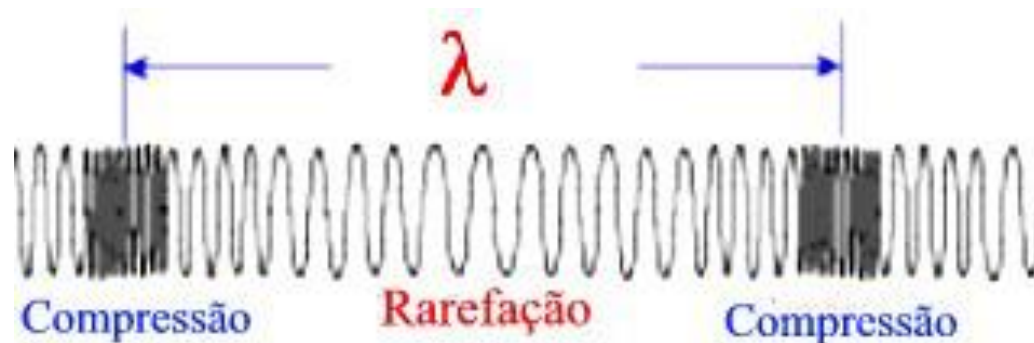
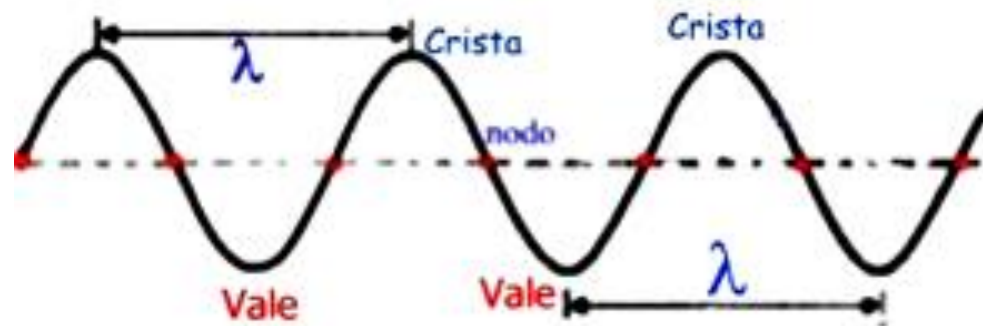
Onda Longitudinal - O deslocamento das moléculas de ar é paralelo à direção de propagação da onda...

Comprimento de Onda e Freqüência

The diagram illustrates the wave equation $y(x, t) = y_m \text{sen}(kx - \omega t)$ with various parameters labeled. Blue arrows and brackets identify the overall terms: 'Deslocamento' (Displacement) points to the entire equation; 'Amplitude' points to y_m ; 'Fator Oscilatório' (Oscillatory Factor) points to the argument of the sine function, $kx - \omega t$; and 'Fase' (Phase) points to the entire argument. Red arrows and labels identify the individual variables: 'Número de Onda' (Wave Number) points to k ; 'Posição' (Position) points to x ; 'Freqüência Angular' (Angular Frequency) points to ω ; and 'Tempo' (Time) points to t .

$$y(x, t) = y_m \text{sen}(kx - \omega t)$$

Comprimento de Onda e Freqüência



Comprimento de Onda e Freqüência

Número de Onda \longrightarrow $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Freqüência Angular \longrightarrow $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Período T - tempo que um elemento leva para realizar uma oscilação completa

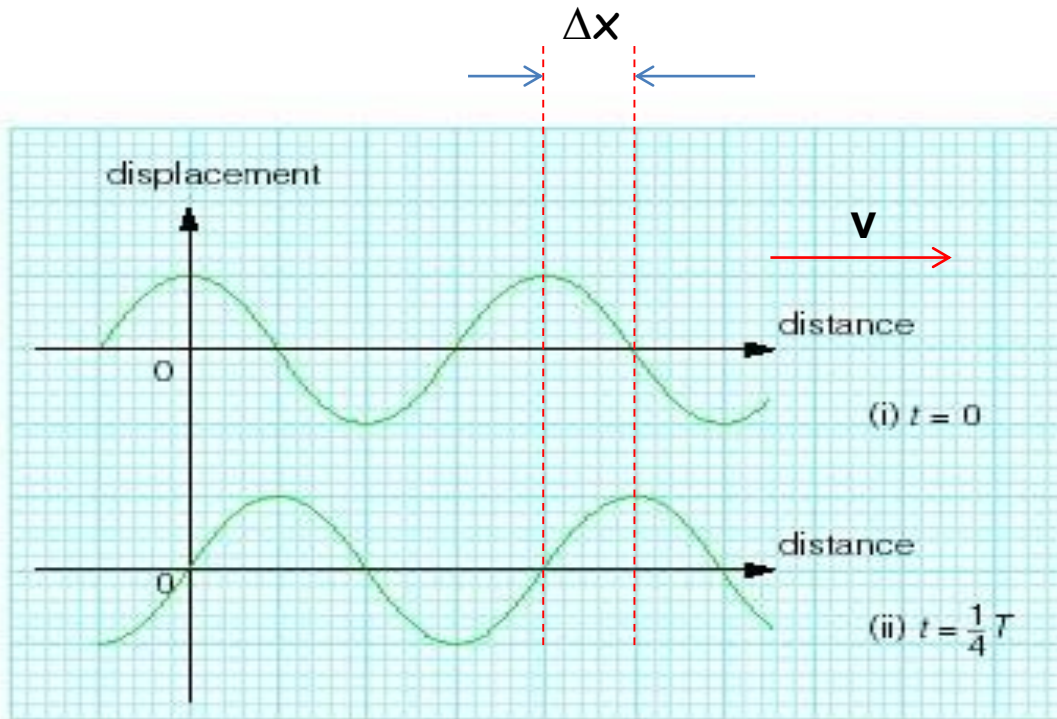
Freqüência \longrightarrow $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$

Forma Geral

$$y(x, t) = y_m \text{sen}(kx - \omega t + \phi)$$

Constante de Fase

Velocidade de uma Onda Progressiva



$$kx - \omega t = \text{constante}$$

$$k \frac{dx}{dt} - \omega = 0$$

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{\omega}{k}$$

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

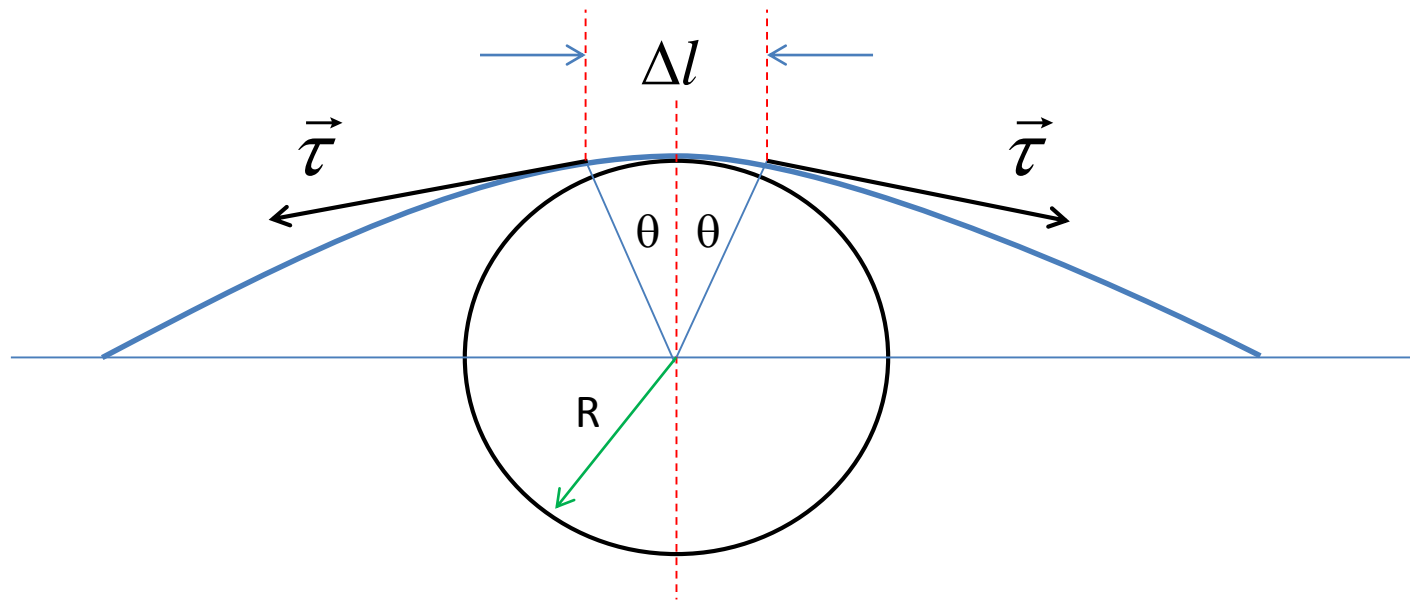
$$y(x, t) = y_m \text{sen}(kx - \omega t)$$

Se propaga no sentido positivo de x

$$y(x, t) = y_m \text{sen}(kx + \omega t)$$

Se propaga no sentido negativo de x

Velocidade da Onda em uma Corda Esticada



Velocidade da Onda em uma Corda Esticada

As componentes horizontais se cancelam, mas as verticais se somam

$$F = 2(\tau \sin \theta) \approx \tau(2\theta) = \tau \frac{\Delta l}{R}$$

A massa do elemento é dada por $\Delta m = \mu \Delta l$

Ele possui uma aceleração em direção ao centro do círculo $a = \frac{v^2}{R}$

Usando a 2ª Lei de Newton

$$\frac{\tau \Delta l}{R} = (\mu \Delta l) \frac{v^2}{R}$$

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



Conclusões?

EXERCÍCIO: (a) Escreva uma expressão que descreva uma onda transversal se propagando numa corda, no sentido $+x$ com um comprimento de onda de 10 cm, uma frequência de 400 Hz e uma amplitude de 2,0 cm. (b) Qual é a velocidade escalar máxima de um ponto da corda? (c) Qual é a velocidade escalar da onda?

EXERCÍCIO: Uma corda esticada tem uma massa por unidade de comprimento de $5,0 \text{ g/cm}$ e uma tensão de 10 N . Uma onda senoidal nessa corda tem uma amplitude de $0,12 \text{ mm}$ e uma frequência de 100 Hz e se propaga no sentido de x decrescente. Escreva uma equação para essa onda.

Energia e Potência de uma Onda Progressiva

Energia cinética $dK = \frac{1}{2} dm u^2$ Onde u é a velocidade transversal

$$u = \frac{\partial y}{\partial t} = -\omega y_m \cos(kx - \omega t)$$

Fazendo $dm = \mu dx$ \longrightarrow $dK = \frac{1}{2} (\mu dx) (-\omega y_m)^2 \cos^2(kx - \omega t)$

Dividindo por dt \longrightarrow $\frac{dK}{dt} = \frac{1}{2} \mu v \omega^2 y_m^2 \cos^2(kx - \omega t)$

A taxa média de transporte de energia será

$$\left[\frac{dK}{dt} \right]_{\text{méd}} = \frac{1}{2} \mu v \omega^2 y_m^2 \left[\cos^2(kx - \omega t) \right]_{\text{méd}} = \frac{1}{4} \mu v \omega^2 y_m^2$$

E a potência média $P_{\text{méd}} = 2 \left[\frac{dK}{dt} \right]_{\text{méd}} = \frac{1}{2} \mu v \omega^2 y_m^2$

Equação de Onda

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

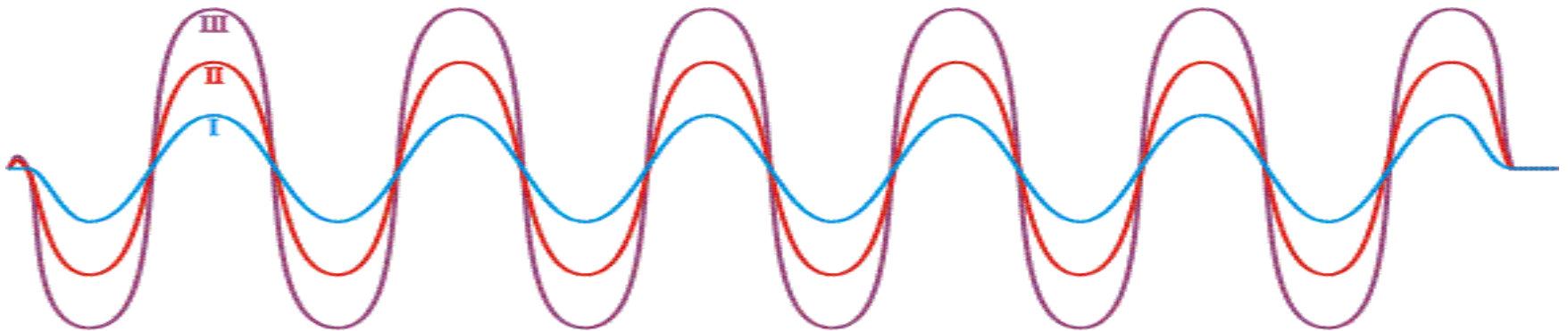
Esta é a equação diferencial geral que governa a propagação de ondas de todos os tipos

Princípio de Superposição

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

Ondas superpostas se somam algebricamente para produzir uma onda resultante

Ondas superpostas não se afetam mutuamente



Interferência

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \phi)$$

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx - \omega t + \phi)$$

ϕ : Diferença de fase
entre as ondas

$$\operatorname{sen} a + \operatorname{sen} b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$y(x, t) = 2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

Interferência

Amplitude

Fase

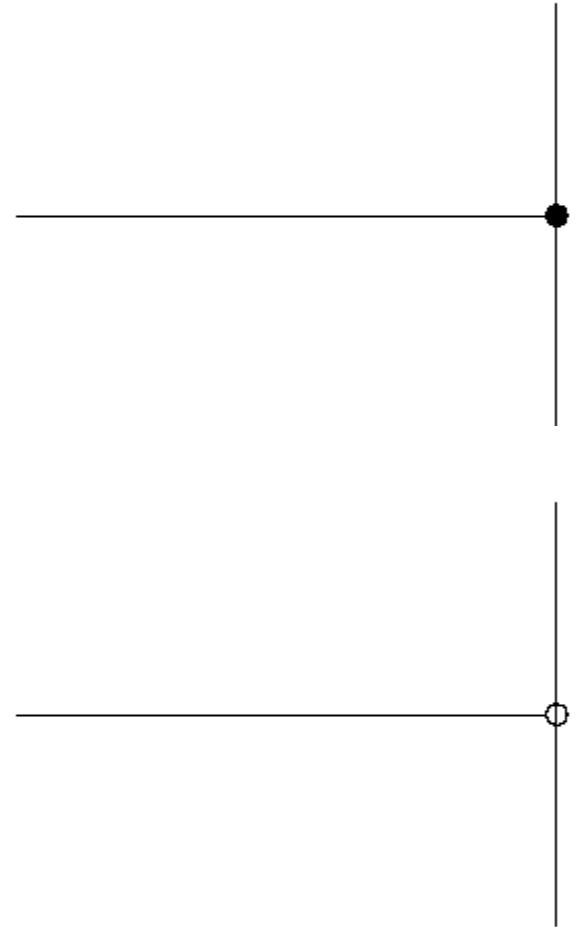
$$y(x, t) = 2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

Se $\phi = 0 \rightarrow$ Amplitude = $2A$
Interferência construtiva

Se $\phi = \pi \rightarrow$ Amplitude = 0
Interferência destrutiva

Reflexão de ondas

- Cordas com uma extremidade fixa:
 - Pulso refletido retorna invertido com relação ao incidente
- Cordas com uma extremidade solta
 - Pulso refletido retorna igual ao incidente.



Reflexão de ondas

- Reflexão em uma interface suave-dura



- Reflexão em uma interface dura-suave



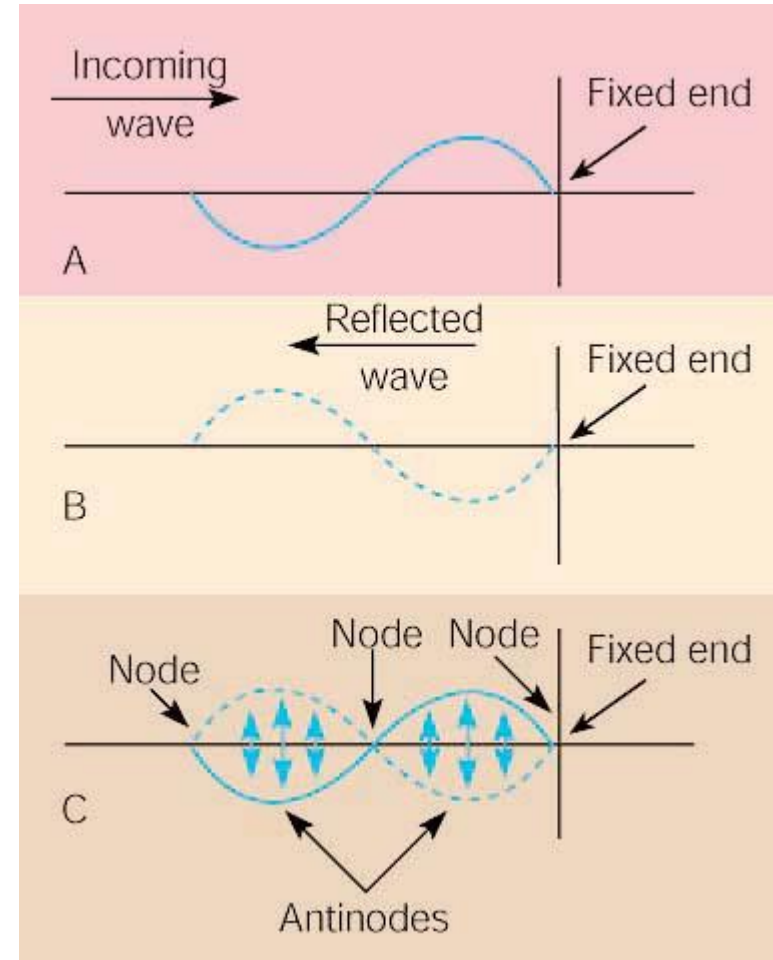
Formação de Ondas Estacionárias

Onda incidente
em extremidade fixa

+

Onda refletida
mesma amplitude e
frequência

= Onda estacionária



Onda estacionária com 1λ de comprimento: 3 nós e 2 anti-nós

Ondas Estacionárias

Se duas ondas senoidais de mesma amplitude e mesmo comprimento de onda se propagam em sentidos opostos em uma corda, a interferência mútua produz uma onda estacionária

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \qquad y_2(x, t) = A \sin(kx + \omega t)$$



Usando o Princípio da Superposição e a relação

$$\operatorname{sen} a + \operatorname{sen} b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$y(x, t) = 2A \sin(kx) \cos(\omega t)$$

Ondas Estacionárias

Amplitude depende de x

$$y(x, t) = 2A \sin(kx) \cos(\omega t)$$

Variação temporal

NÃO tem termo $(kx - \omega t)$ → **NÃO** é uma onda progressiva
→ **É uma onda estacionária**

Pontos de amplitude máxima

$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$$

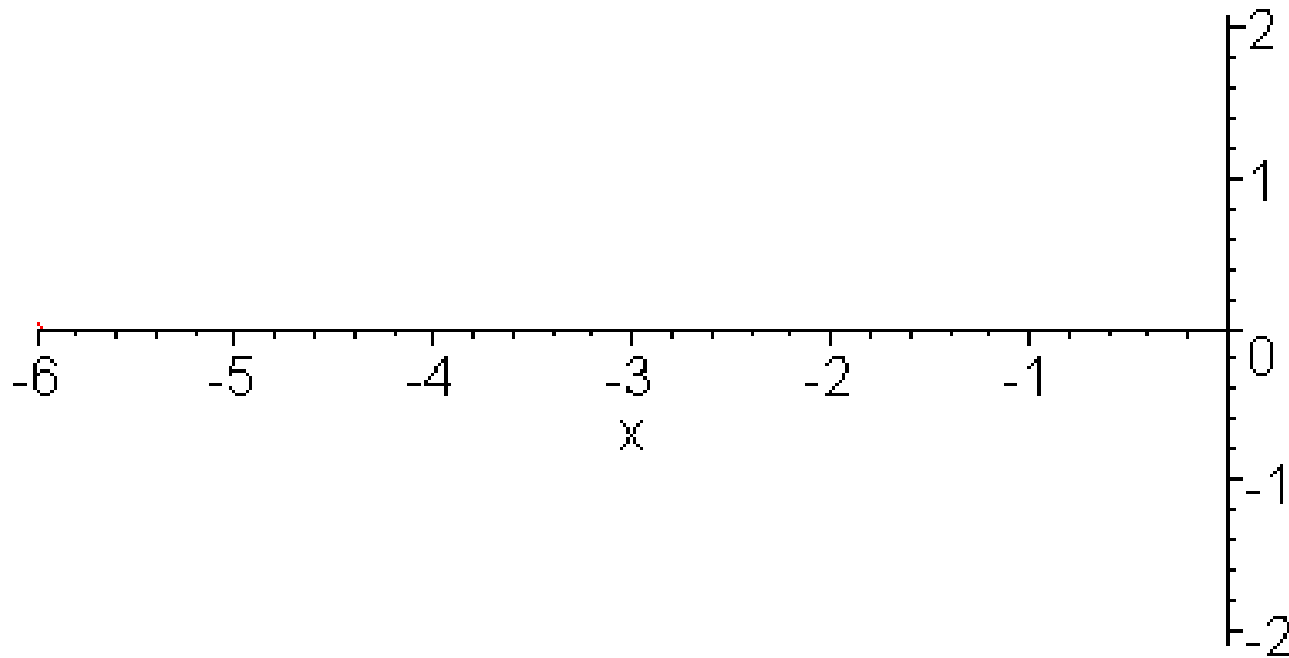
ANTI-NÓS

Pontos de amplitude zero

$$kx = 0, \pi, 2\pi, \dots = n\pi$$

NÓS

Formação de Ondas Estacionárias



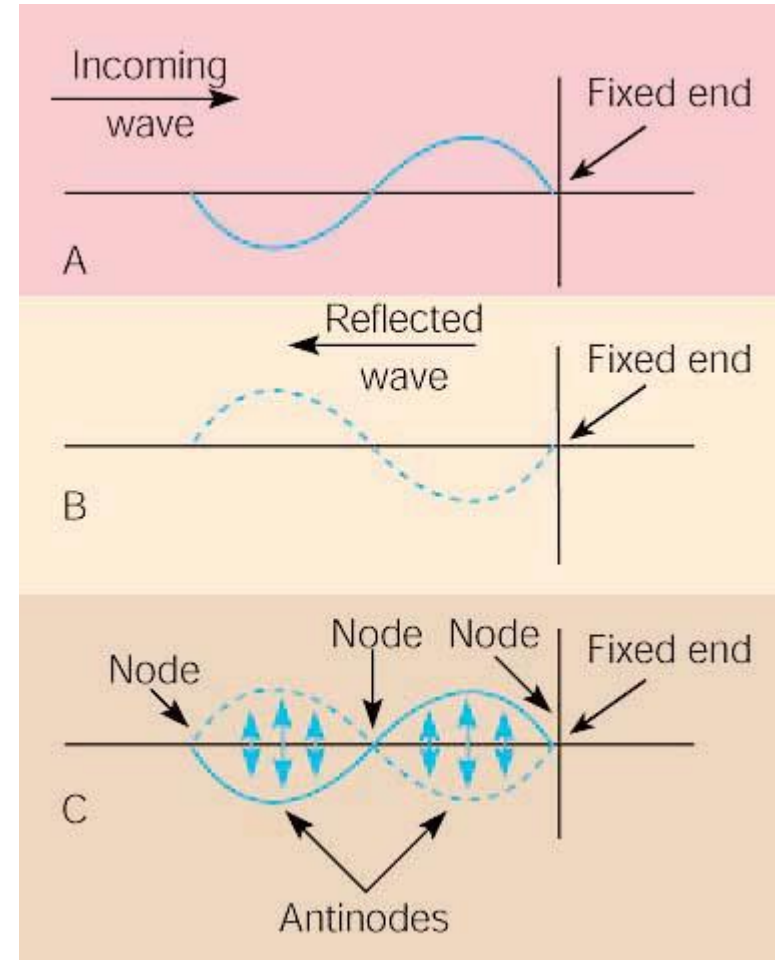
Formação de Ondas Estacionárias

Onda incidente
em extremidade fixa

+

Onda refletida
mesma amplitude e
frequência

= Onda estacionária



Onda estacionária com 1λ de comprimento: 3 nós e 2 anti-nós

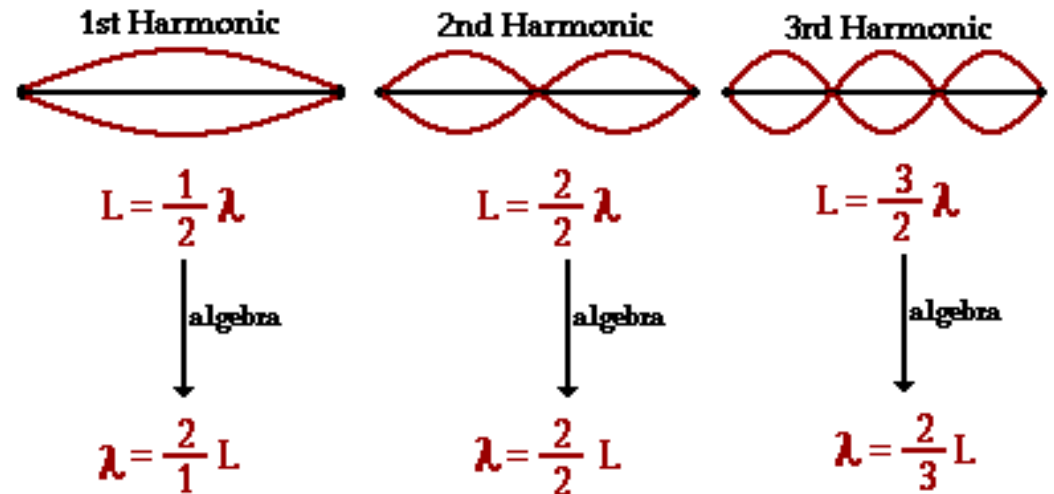
Formação de Ondas Estacionárias

Comprimentos de onda / Frequências ressonantes:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

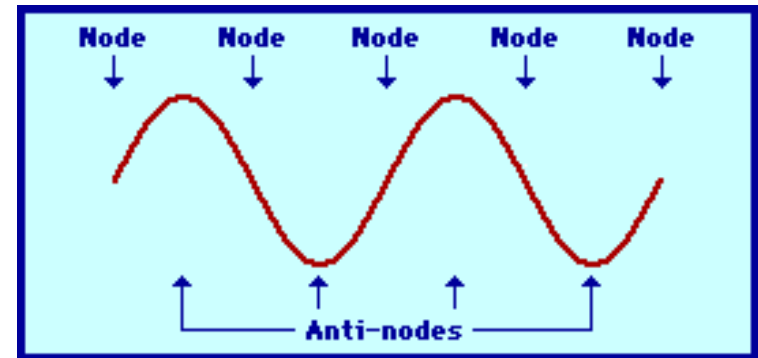
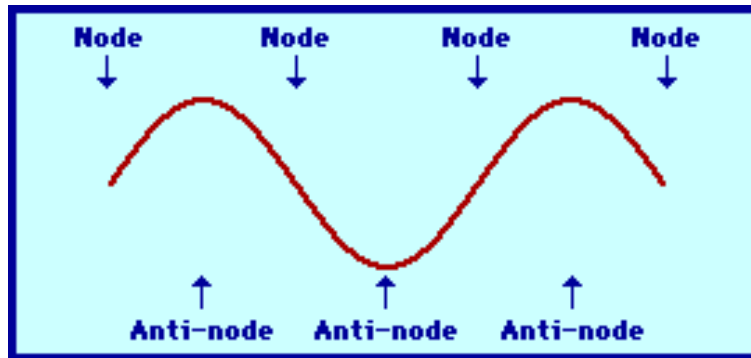
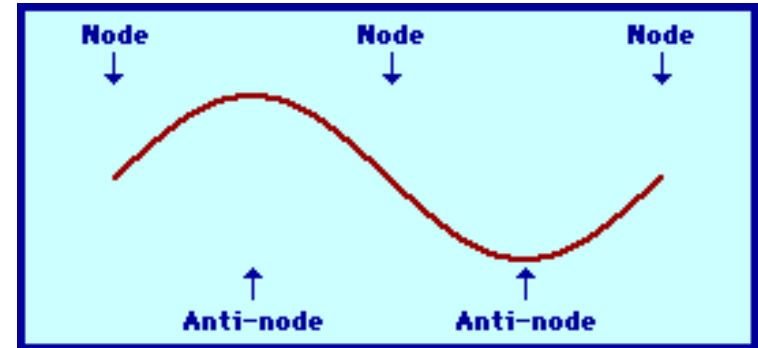
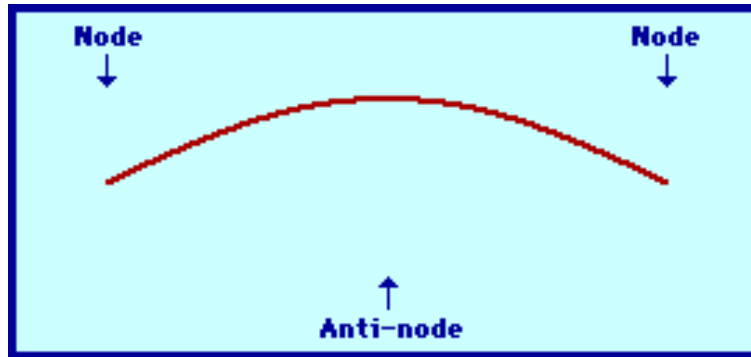
$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}$$

Lowest Three Natural Frequencies of a Guitar String



Menor frequência: **FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL**
Demais frequências: **SOBRETONS / HARMÔNICAS**

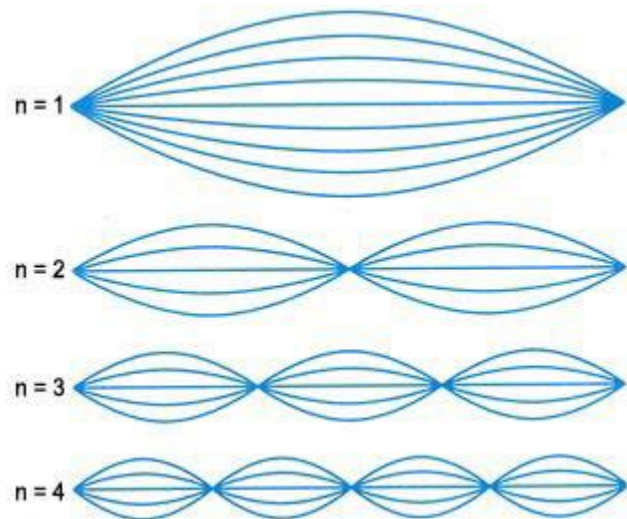
Formação de Ondas Estacionárias



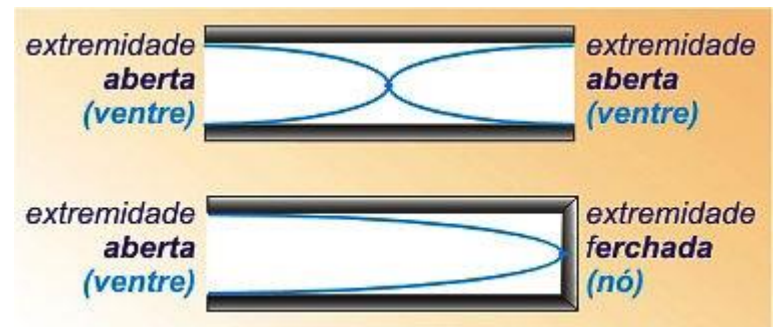
Simulador de cordas <http://www.falstad.com/loadedstring/>

Formação de Ondas Estacionárias

Cordas



Tubos



EXERCÍCIO: Uma corda sob tensão τ_i oscila no terceiro harmônico com uma frequência f_3 , e as ondas na corda tem comprimento de onda λ_3 . Se a tensão for aumentada para $\tau_f = 4 \tau_i$ e a corda novamente levada a oscilar no terceiro harmônico, qual será (a) a frequência de oscilação em termos de f_3 e (b) o comprimento de onda em termos de λ_3 ?

EXERCÍCIO: Uma corda de violão, de náilon, tem uma densidade linear de $7,2 \text{ g/m}$ e está sob uma tensão igual a 150 N . Os suportes fixos estão distanciados 90 cm . A corda está oscilando de acordo com o padrão de onda estacionária mostrado na Fig. 17-27. Calcule (a) a velocidade escalar, (b) o comprimento de onda e (c) a frequência das ondas cuja superposição origina esta onda estacionária.

