

Ressonância e Ondas Estacionárias

▪ **Prof. Theo Z. Pavan**

Física Acústica

Aula 7

Ressonância



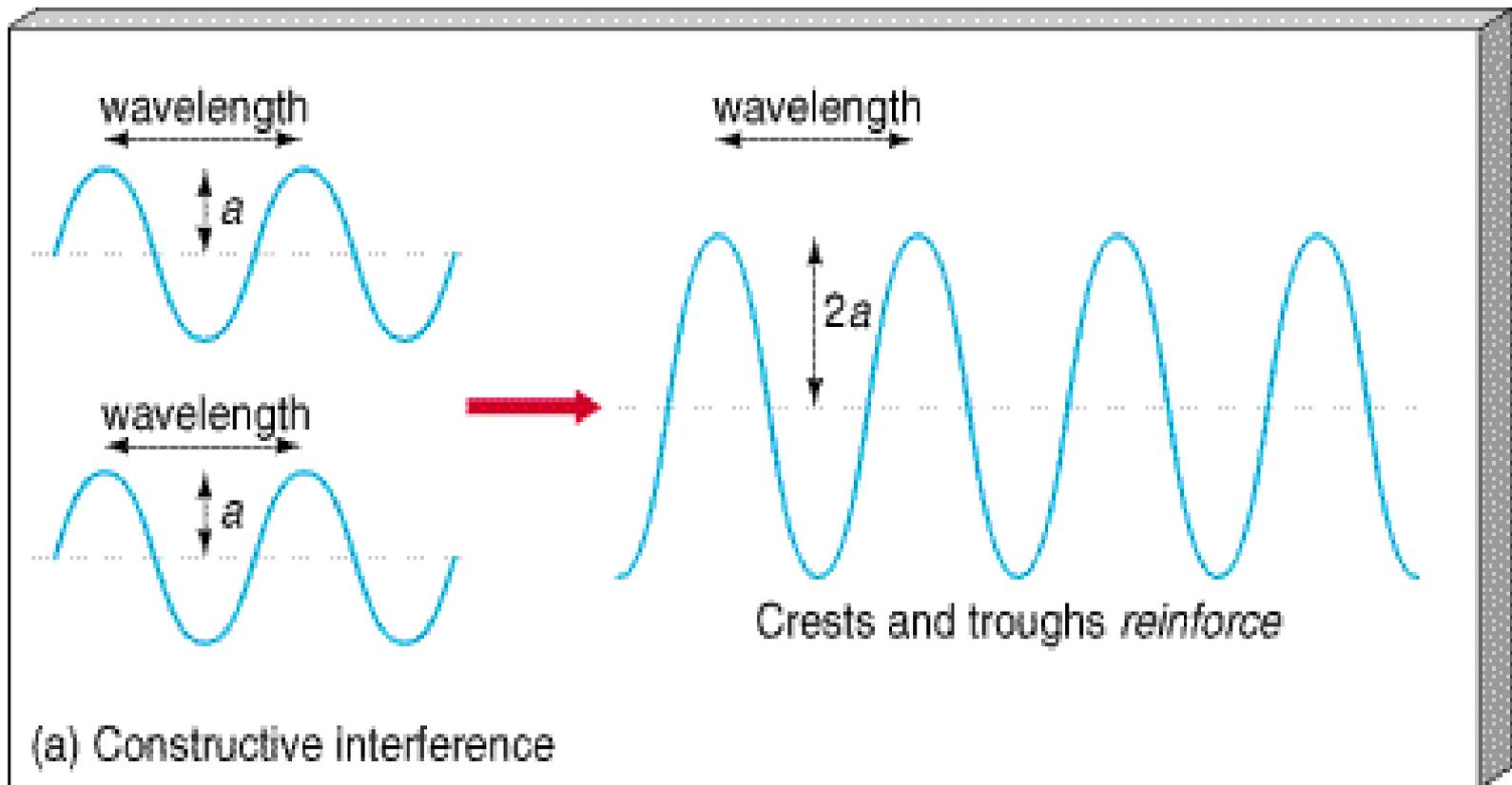
É possível movimentar o balanço com qualquer frequência ?

Exemplos: Pêndulo
Oscilador massa-mola
Corda vibrante
Cavidade
Etc...

Frequência natural de vibração

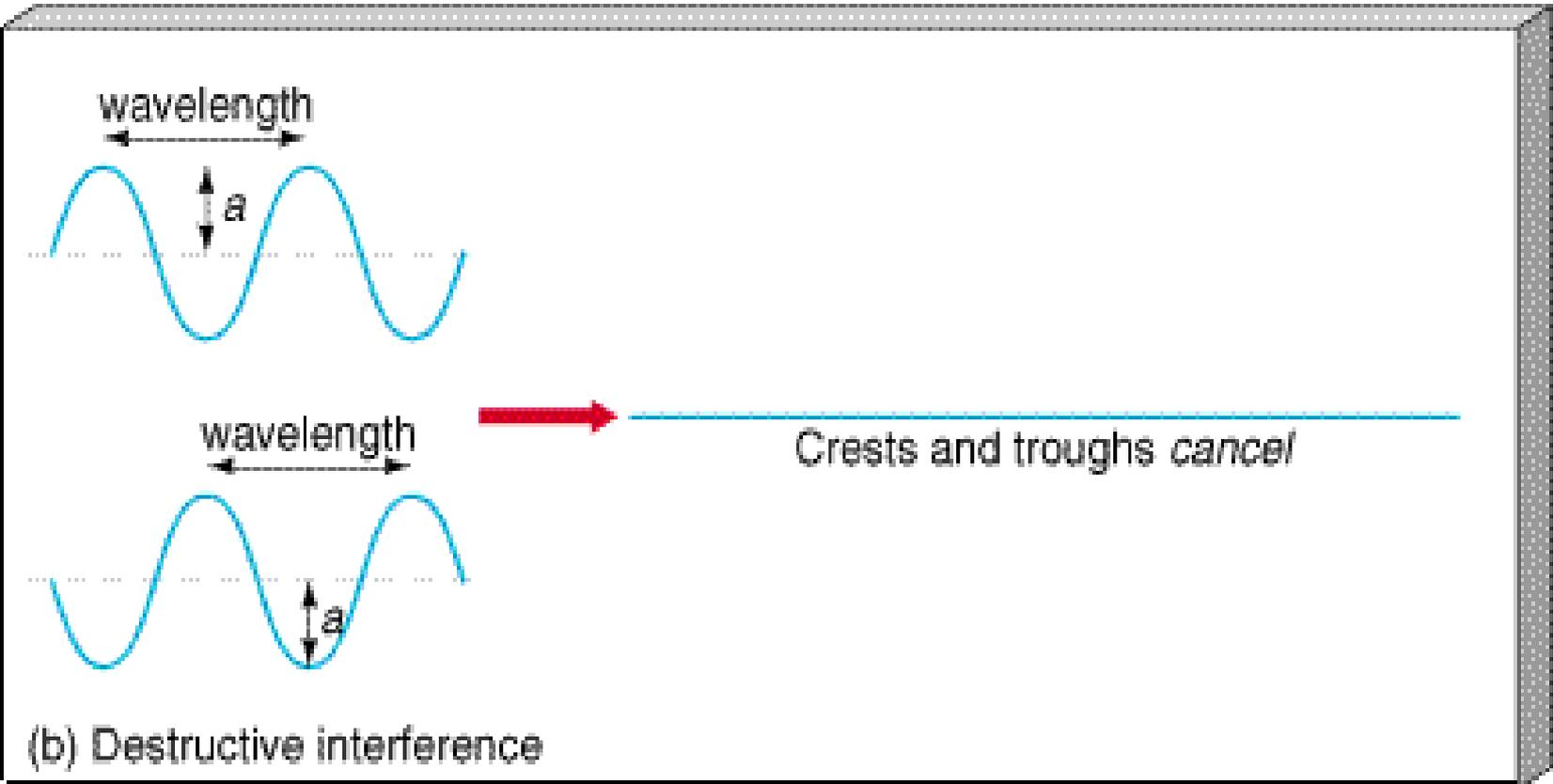
Interferência construtiva

- Ondas que se somam sem diferença de fase.

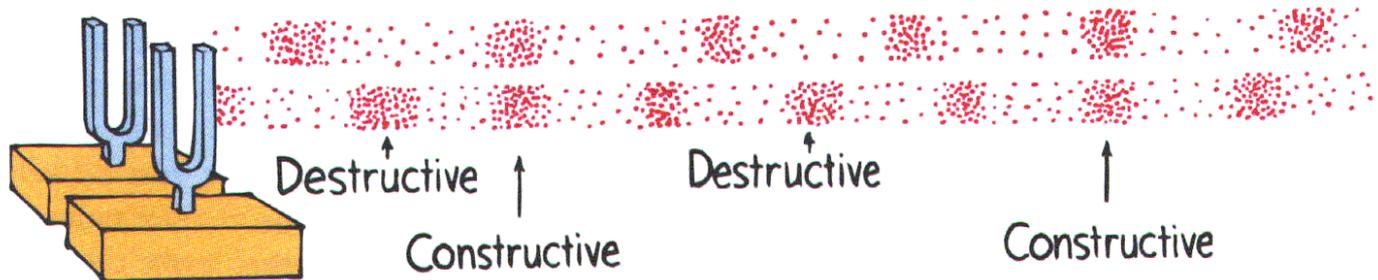


Interferência destrutiva

- Ondas combinantes com uma diferença de $\frac{1}{2}$ comprimento de onda.

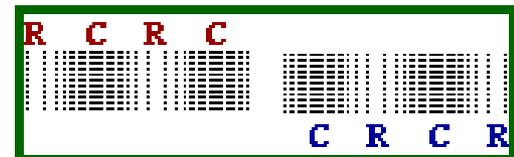


Interferência

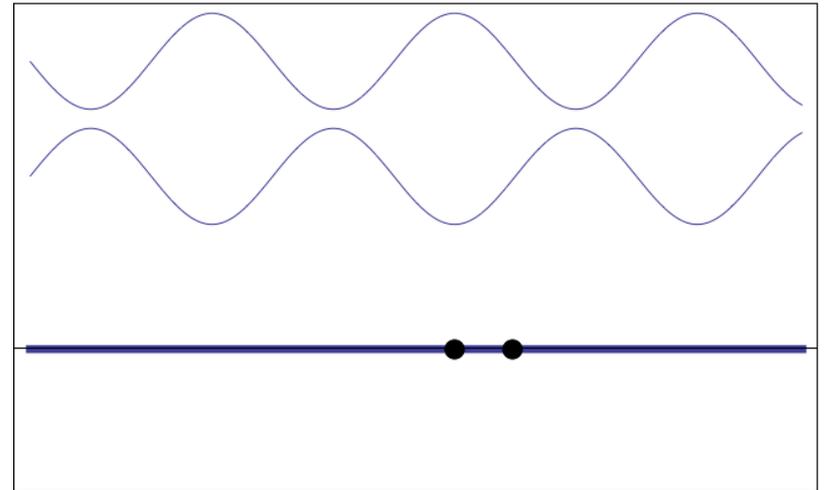
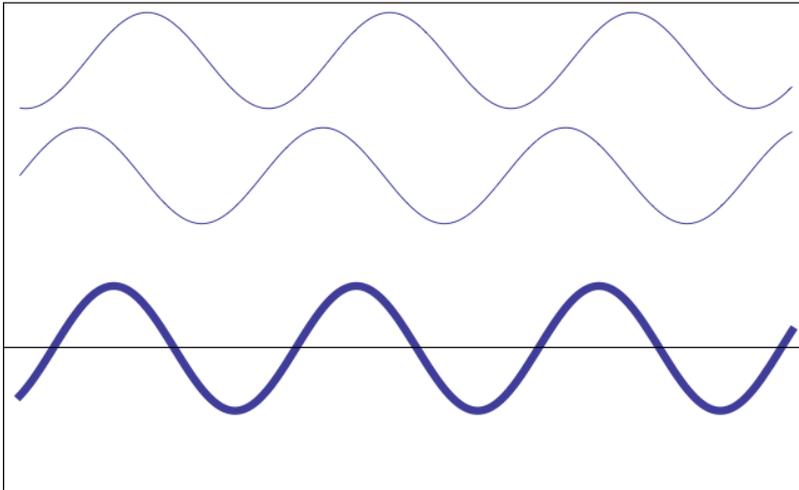


Interferência de compressões de uma onda sonora resultam em...
...interferência construtiva.
...um som mais forte.

Interferência de regiões de compressão e rarefação resultam em...
...interferência destrutiva.
...um som mais fraco.

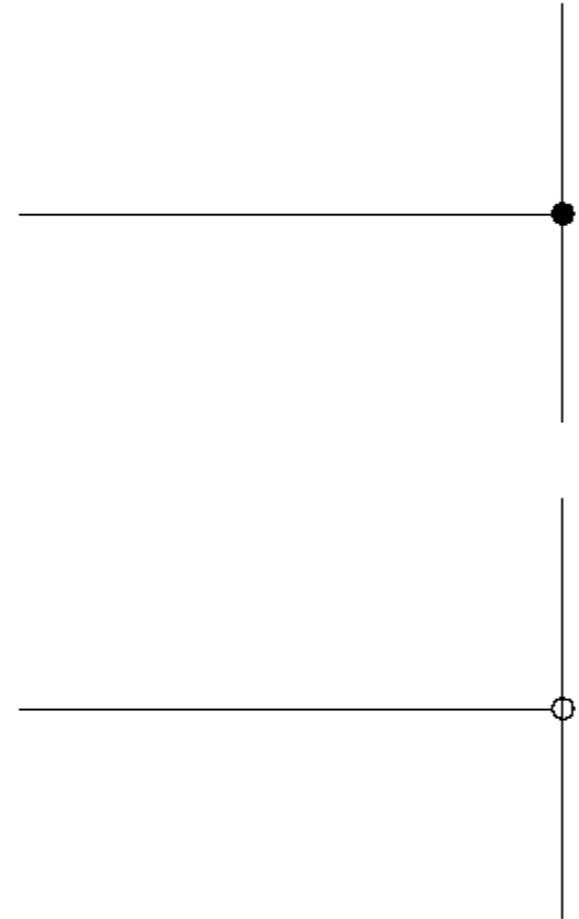


Interferência

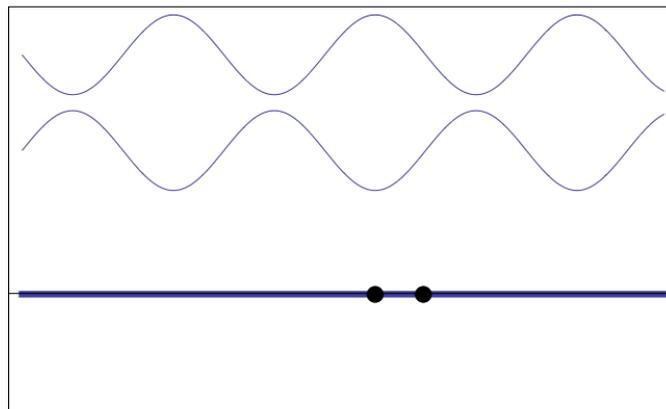
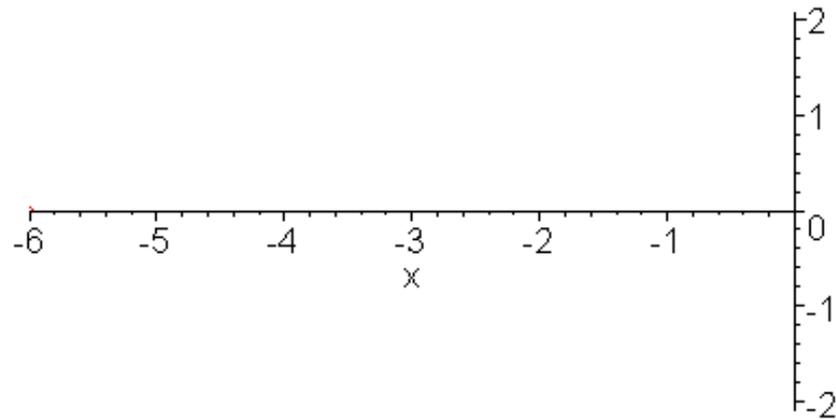
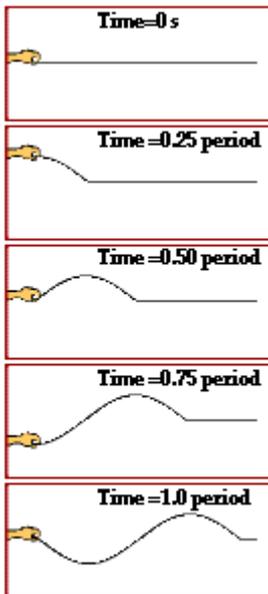


Reflexão de ondas

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

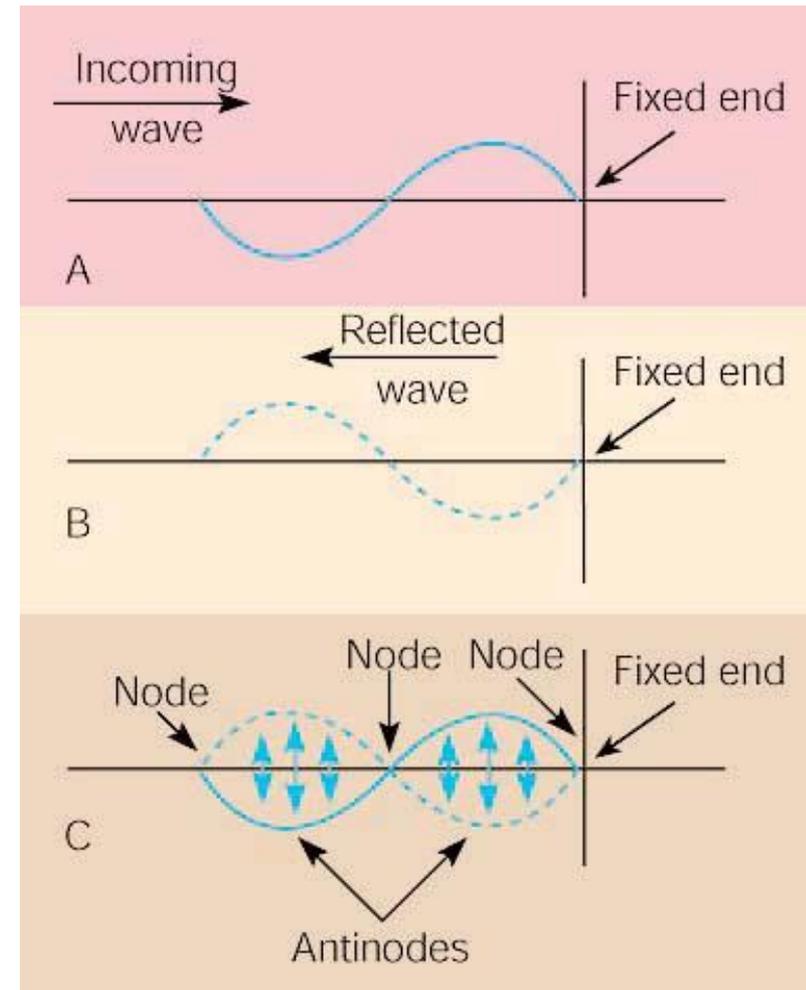


Formação de ondas estacionárias

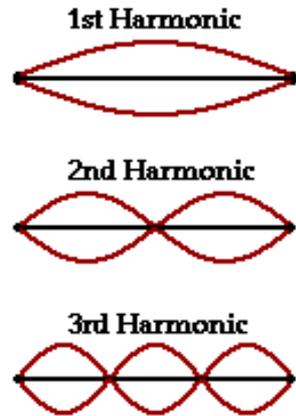


Formação de Ondas Estacionárias

- Uma onda incidente em uma corda com extremidade fixa (A) encontra uma onda refletida (B) com a mesma amplitude e frequência, gerando uma onda estacionária (C). Note que a onda estacionária de um comprimento de onda tem três nós e dois anti-nós.



Cordas Vibrantes



- **Ondas Estacionárias:**

- Quando ondas refletidas se somam com ondas incidentes.
- Criam uma forma de nós e anti-nós.

- **Nós:**

- Lugares de amplitude nula (ondas se cancelam mutuamente).

- **Anti-Nós:**

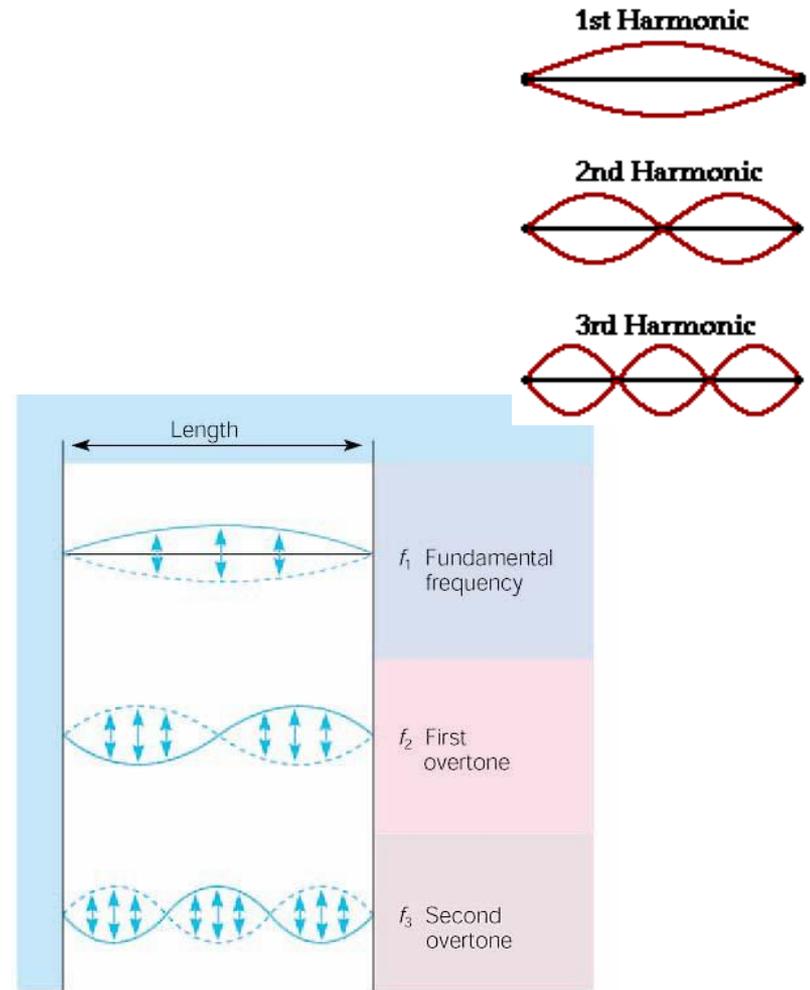
- Lugares onde as cristas e vales produzem distúrbios que rapidamente se alternam, para cima e para baixo.

- **Frequência Fundamental:**

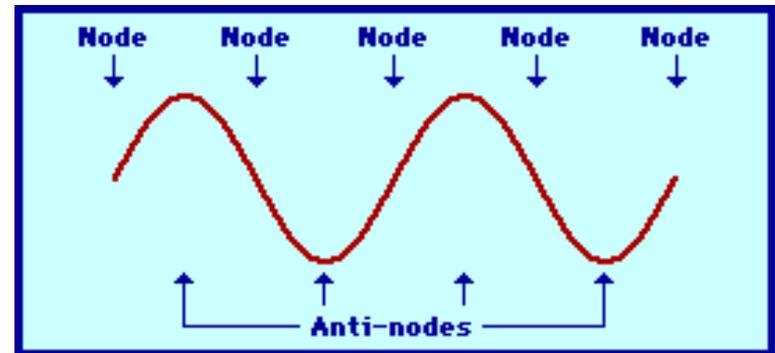
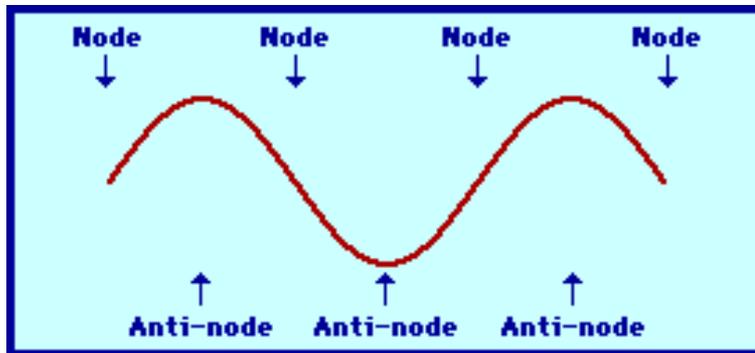
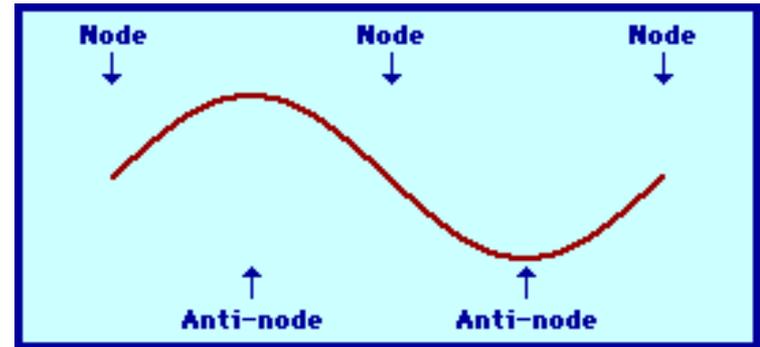
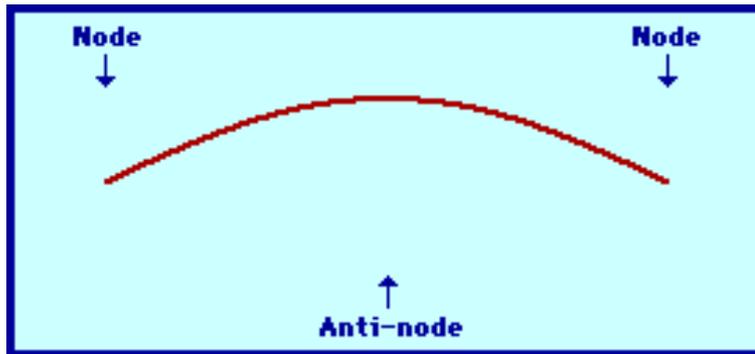
- A onda mais longa que pode formar uma onda estacionária em uma corda tem um comprimento de onda que é duas vezes maior que o comprimento da corda.
- Esse comprimento de onda maior tem a menor frequência, e é chamado de frequência fundamental.
- A frequência fundamental determina a altura (pitch) do som, e é chamado também primeiro harmônico.

Frequência Fundamental

Uma corda esticada de um dado comprimento tem um número possível de frequências ressonantes. A frequência mais baixa é chamada fundamental, f_1 ; As demais frequências, ou sobretons, são conhecidas como frequências superiores (a fig. mostra f_2 e f_3).



Ondas estacionárias

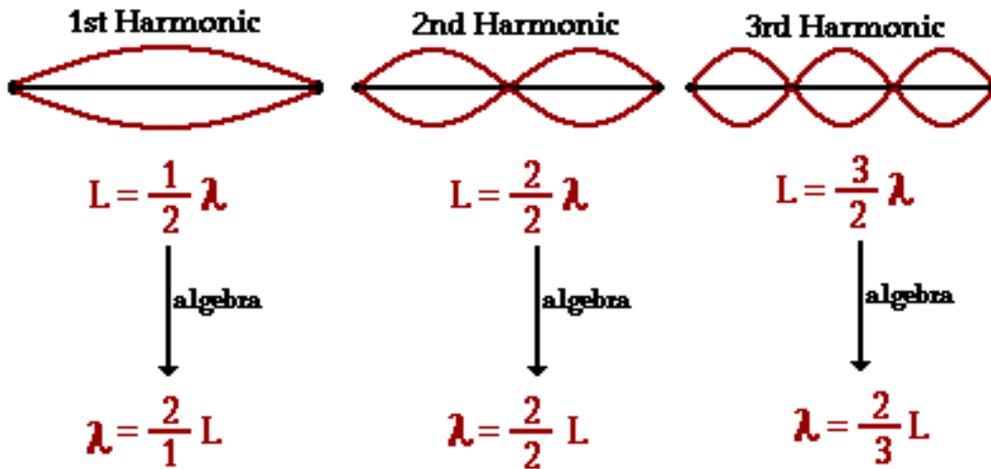


Corda vibrante



Harmônicos em cordas

Lowest Three Natural Frequencies of a Guitar String



Nós nas extremidades!

No caso de instrumentos, o som é amplificado pelas caixas acústicas desses instrumentos (violão, piano, etc...)

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L}$$

Ondas estacionárias: Exemplos

- A tecla mais aguda de um piano corresponde a uma frequência 150 vezes maior que a corda mais grave. Se o comprimento da corda mais aguda é 5,0 cm, quanto teria que ter a corda mais grave, se elas tivessem a mesma densidade linear de massa e a mesma tensão?
- A velocidade seria a mesma para as duas cordas:

$$f = \frac{v}{2L} \quad \frac{L_g}{L_a} = \frac{f_a}{f_g} \quad L_g = L_a \frac{f_a}{f_g} = 5 \times 150 = 750 \text{ cm} = 7,5 \text{ m}$$

Portanto, na realidade as cordas graves são mais pesadas para evitar que sejam muito compridas...

Ondas estacionárias: Exemplos

- Uma corda de violino de 0,32 m está tocando a nota A, acima da nota C na escala bem temperada (correspondente a 440 Hz).
 - (a) Qual é o comprimento de onda do harmônico fundamental?
 - (b) Quais são as frequências e comprimento de onda da onda sonora produzida? (c) Por que há diferença?

(a) comprimento de onda da onda estacionária na corda:

$$\lambda = 2L = 0.64\text{m} = 64 \text{ cm}$$

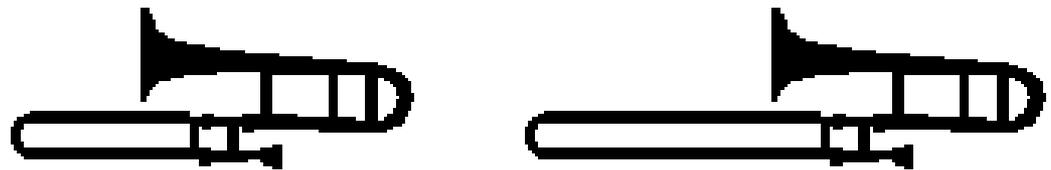
(b) A onda sonora tem a mesma frequência, $f = 440 \text{ Hz}$.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343 \text{ m/s}}{440 \text{ Hz}} = 0,78 \text{ m}$$

Ondas estacionárias: tubos



The open end of a cylindrical tube serves as a "free end reflector" and the closed end of a cylindrical tube serves as a "fixed end reflector."

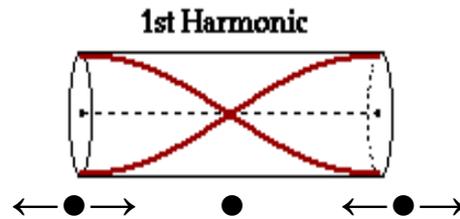


The natural frequency of a trombone can be modified by changing the length of the air column inside the metal tube.

Ondas estacionárias: tubos abertos

1º Harmônico

$$L = \frac{\lambda_1}{2}$$
$$f_1 = \frac{v}{2L}$$



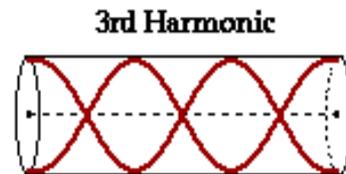
2º Harmônico

$$L = \lambda_2$$
$$f_2 = \frac{v}{L} = 2f_1$$



3º Harmônico

$$L = \frac{3}{2} \lambda_3$$
$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3f_1$$

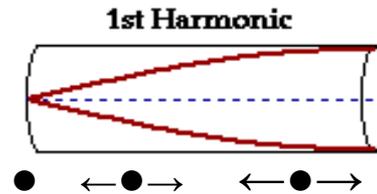


Plastic Straw Instrument

(Esta descrição está sendo feita em termos dos deslocamentos de ar. A pressão tem o comportamento oposto)

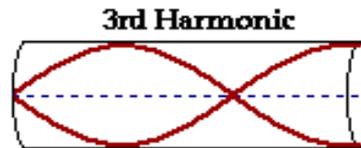
Ondas estacionárias em tubos com uma extremidade fechada

$$L = \frac{\lambda_1}{4}$$
$$f_1 = \frac{v}{4L}$$



1º Harmônico

$$L = \frac{3}{4} \lambda_3$$
$$f_3 = \frac{3v}{4L} = 3f_1$$

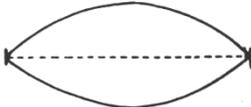
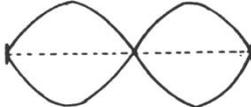
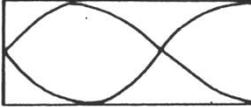
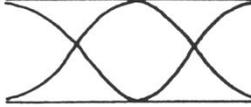
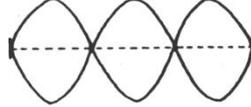
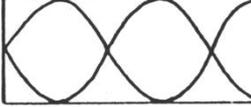


3º Harmônico

$$L = \frac{5}{4} \lambda_5$$
$$f_5 = \frac{5v}{4L} = 5f_1$$



5º Harmônico

VIBRATING STRING	CLOSED PIPE	OPEN PIPE
 <p data-bbox="483 464 637 506">Fundamental 1st Harmonic</p>	 <p data-bbox="908 464 1052 506">Fundamental 1st Harmonic</p>	 <p data-bbox="1333 464 1477 506">Fundamental 1st Harmonic</p>
 <p data-bbox="483 685 637 728">1st Overtone 2nd Harmonic</p>	 <p data-bbox="908 685 1052 728">1st Overtone 3rd Harmonic</p>	 <p data-bbox="1333 685 1477 728">1st Overtone 2nd Harmonic</p>
 <p data-bbox="483 921 637 963">2nd Overtone 3rd Harmonic</p>	 <p data-bbox="908 921 1052 963">2nd Overtone 5th Harmonic</p>	 <p data-bbox="1333 921 1477 963">2nd Overtone 3rd Harmonic</p>
<p data-bbox="396 1006 734 1049">Displacement nodes occur at each end of the string.</p>	<p data-bbox="801 1006 1149 1099">Displacement nodes occur on the closed end and dis- placement antinodes on the open end.</p>	<p data-bbox="1226 1006 1574 1078">Displacement antinodes occur at each end of the open pipe.</p>

Descrição em termos de deslocamento do ar

Ondas estacionárias: som



- Ondas estacionárias nesses tubos abertos têm **anti-nós** de deslocamento na extremidade aberta, onde o ar é livre para vibrar.

Ondas estacionárias: órgãos

- Tubos de órgão abertos e fechados: Qual é a frequência fundamental e os três primeiros parciais de um tubo de órgão de 26 cm de comprimento a 20°C, se ele for (a) aberto ou (b) fechado?

(a) Harmônico fundamental:
$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{343 \text{ m/s}}{2 \times (0,26\text{m})} = 660 \text{ Hz}$$

Os parciais, que incluem todos os harmônicos, são 1320 Hz, 1980 Hz, 2640 Hz, e assim por diante

(b) Harmônico fundamental:
$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{343 \text{ m/s}}{4 \times (0,26\text{m})} = 330 \text{ Hz}$$

Os parciais, que incluem apenas os harmônicos ímpares, são então 990 Hz, 1650 Hz, 2310 Hz, e assim por diante

Ondas estacionárias: Flauta

- Uma flauta é desenhada para tocar no nota dó central (262 Hz) como frequência fundamental quando todos os buracos estão tampados. Qual deve ser a distância entre o bocal e o fim da flauta (obs: essa é apenas uma distância aproximada)? Assuma a temperatura de 20°C.

$$f = \frac{v}{2L}$$

$$L = \frac{v}{2f} = \frac{343 \text{ m/s}}{2 \times 262 \text{ s}^{-1}} = 0,655 \text{ m}$$

Ondas estacionárias: Flauta

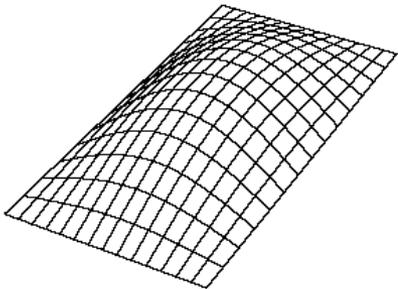
- Se a temperatura fosse apenas 10°C, qual seria a frequência da nota tocada do mesmo modo que no problema anterior?

$$f = \frac{v}{2L} = \frac{337 \text{ m/s}}{2 \times 0,655 \text{ m}} = 257 \text{ Hz}$$

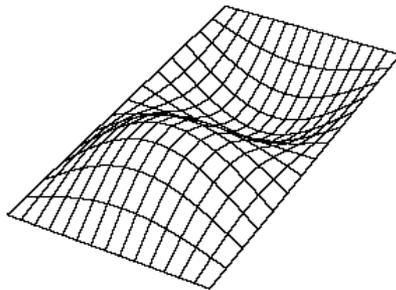
Este exemplo ilustra porque os músicos “aquecem” os instrumentos para afiná-los...

Modos vibracionais: membranas

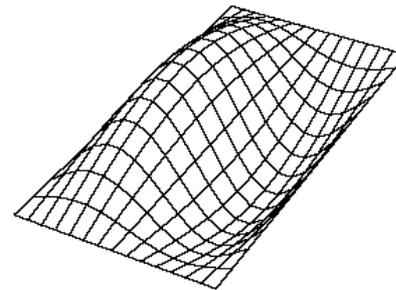
- Membrana retangular



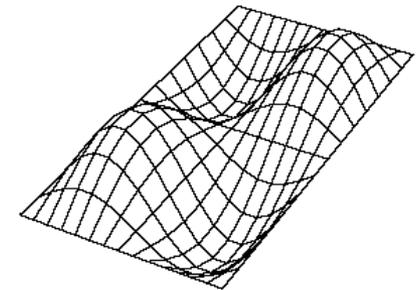
Modo (1,1)



Modo (1,2)



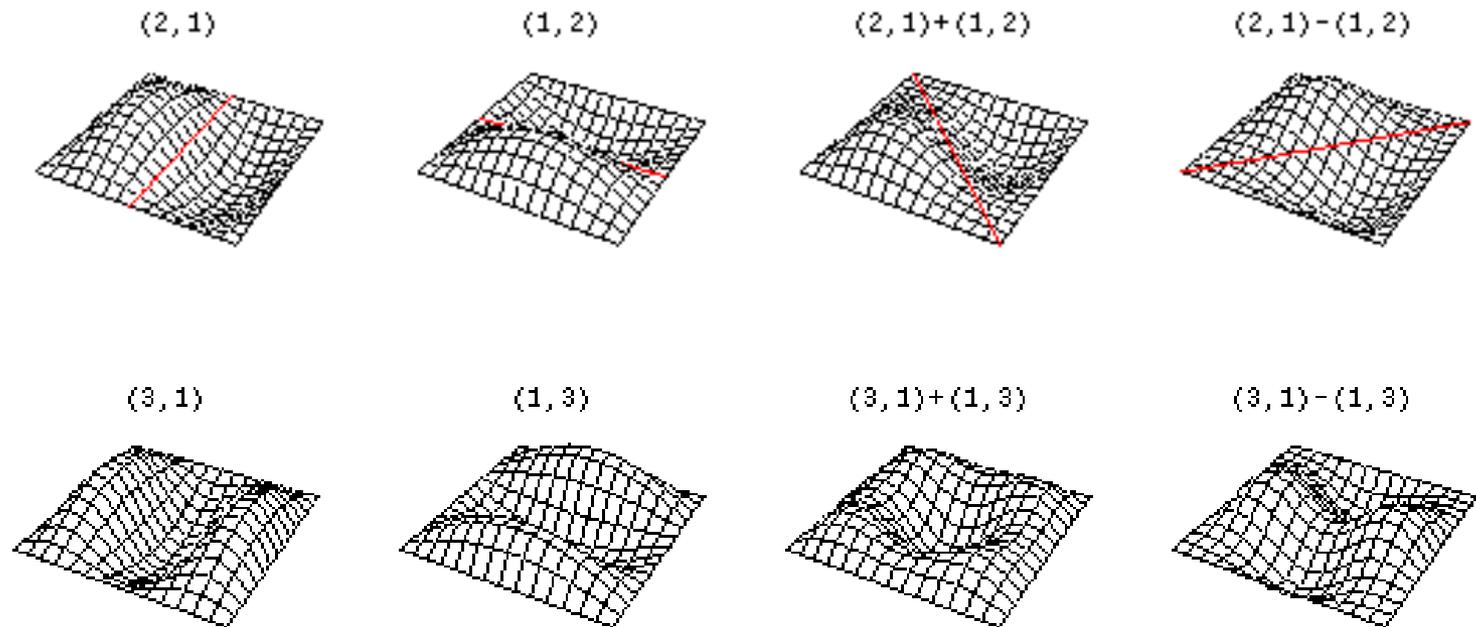
Modo (2,1)



Modo (2,2)

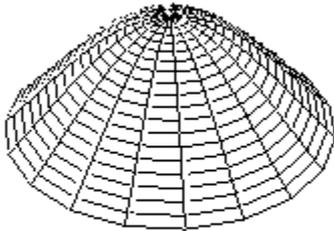
Modos vibracionais: membranas

- Membranas quadradas - [Simulação](#)

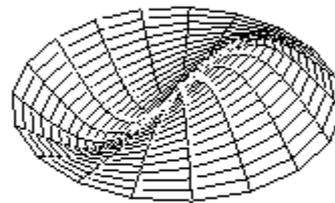


Modos vibracionais: membranas

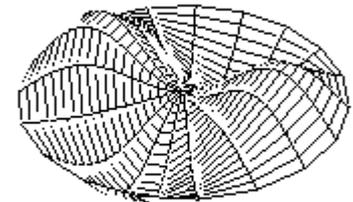
- Membrana circular - tambores



Modo (0,1)



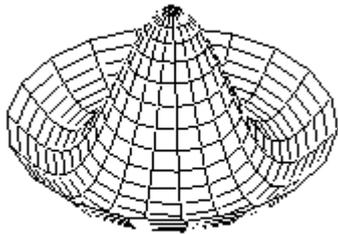
Modo (1,1)



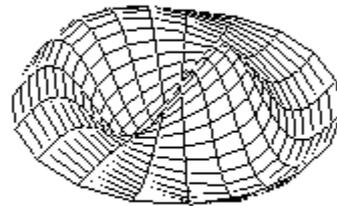
Modo (2,1)

Modos vibracionais: membranas

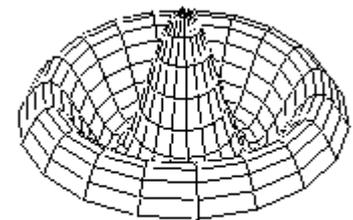
- Membrana circular - tambores



Modo (0,2)



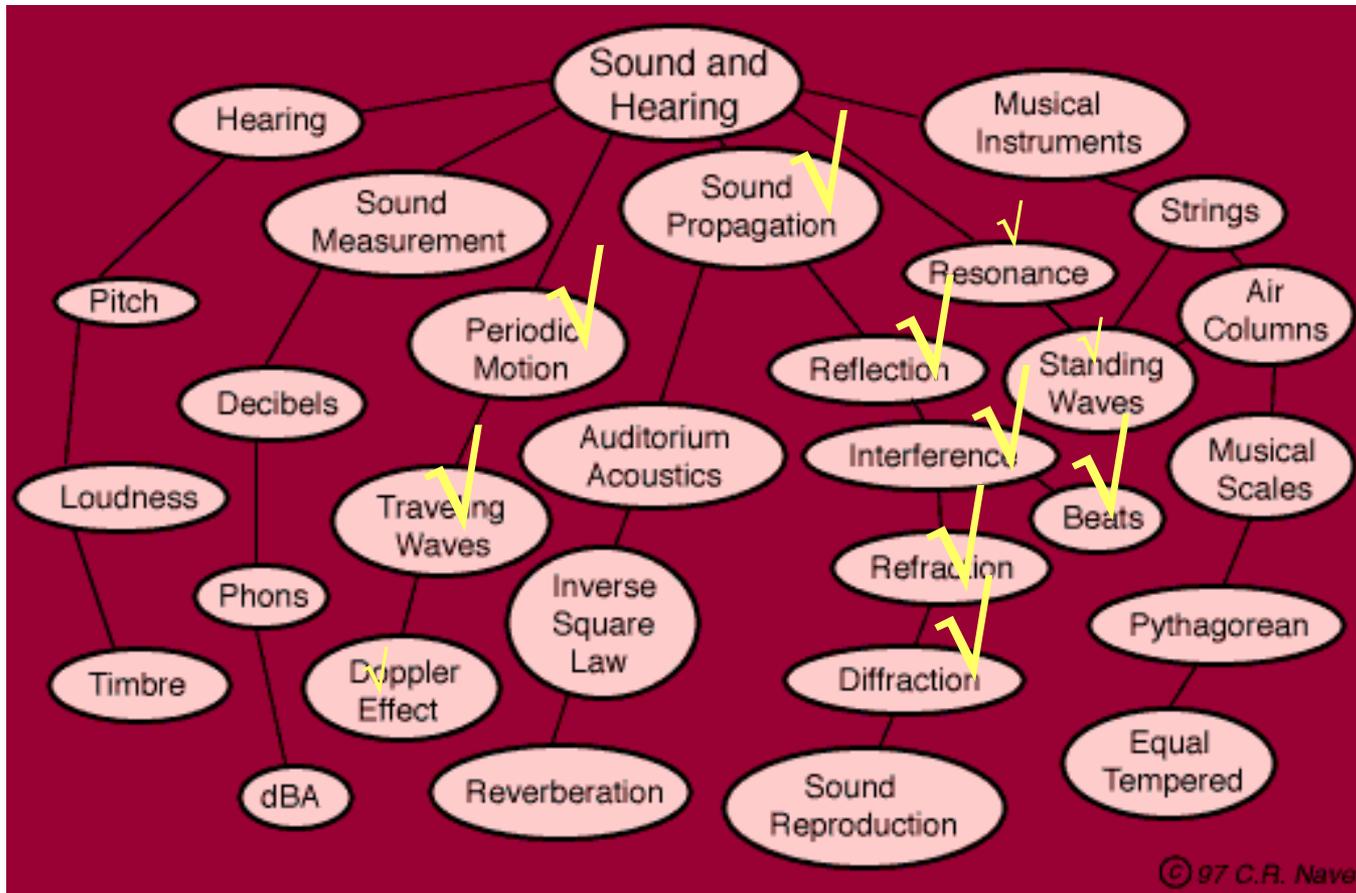
Modo (1,2)



Modo (0,3)



Onde estamos ?



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/soucon.html#soucon>