Colégio Espírito Santo
Rua Tamoio, 3393 – Canoas – Fone: 3472-1502/3472-1722
http://www.ces.g12.br
Contato: colegioesanto@ces.g12.br
Professor: Daniel Schulz – Física 2º ano – Ondas - 2008

Viva Deus Uno e Trino
Em nossos corações

Fontes sonoras: Cordas vibrantes e colunas de ar vibrantes

Texto baseado no livro: Física, conceitos e aplicações, v. 2, escrito por Paulo César M. Penteado

Cordas vibrantes

Se você chacoalhar a extremidade de uma corda esticada e presa a uma parede, uma onda periódica se propagará ao longo dela, será refletida na extremidade lixa e retornará invertida, em relação à onda incidente. Se você continuar a vibrar a corda, existirão duas ondas se propagando ao longo da corda, indo uma de encontra a outra que irão interferir entre si.

De modo geral, a onda resultante poderá ser uma onda qualquer, mas se você vibrar a extremidade da corda com determinadas freqüências, as duas ondas poderão interferir e dar origem a uma onda estacionária de grande amplitude.

As freqüências com que as ondas estacionárias são produzidas são as freqüências naturais ou freqüências ressonantes da corda, e as diferentes ondas estacionárias que poderão se estabelecer nessa corda correspondem aos modos ressonantes de vibração.

Em um instrumento musical de corda, por exemplo, a vibração da corda provoca o surgimento de uma onda sonora que se propaga pelo ar até atingir nossos ouvidos. A freqüência do som ouvido será igual à freqüência de vibração dos pontos da corda.

A vibração da corda, e conseqüentemente a emissão de um som pode ser obtida de várias maneiras, dependendo do instrumento. A corda do instrumento pode ser tangida (como no violão), friccionada (como no violino) ou percutida (como no piano).

O piano A um instrumento musical de cordas. Suas cordas São percutidas por pequenos martelo*, que são acionados pelas teclas.

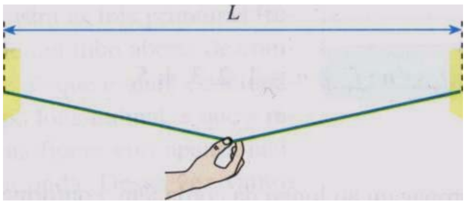
Posto isso, vejamos como uma corda pode vibrar quando perturbada segundo qualquer uma das maneiras citadas acima.

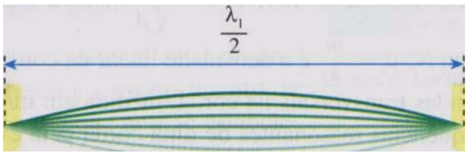
Consideremos, então, uma corda esticada entre dois suportes, como a corda de um violão ou de um violino As ondas que se propagam ao longo dessa corda, e que podem ter uma grande variedade de freqüências, sofrem reflexão nas extremidades — e muitas delas interferem de modo aleatório com cada uma das outras e rapidamente se extinguem. Entretanto, as ondas correspondentes às freqüências ressonantes da corda persistem e ondas estacionárias se estabelecem nessa corda.

A onda estacionária de freqüência mais baixa é chamada freqüência fundamental. Ela corresponde a uma onda estacionaria com um único ventre, o harmônico fundamental ou primeiro harmônico. As demais freqüências naturais são chamadas sobretons ou harmônicos superiores, visto que as freqüências correspondentes são múltiplos inteiros da freqüência fundamental.

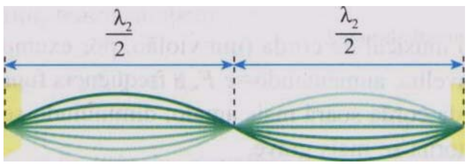
Uma vez que as extremidades da corda são fixas, temos, nesses pontos, nós da onda estacionária e os possíveis modos ressonantes de vibração da corda são mostrados a seguir, em ordem crescente de complexidade.

Lembre-se de que em uma onda estacionária, a distância entre dois nós consecutivos corresponde a $\lambda/2$.

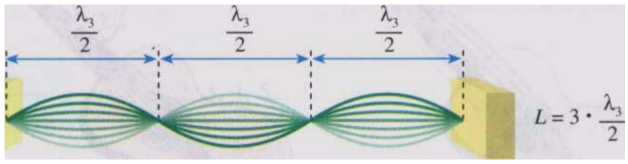




Primeiro harmônico ou harmônico fundamental



Segundo harmônico ou primeiro sobretom



Terceiro harmônico ou segundo sobretom

Observe que existe uma relação simples entre o comprimento *L* da corda e o comprimento de onda λ da onda estacionária que nela se estabelece.

Generalizando, para o enésimo harmônico:

$$L = n \cdot \frac{\lambda_n}{2}, \text{ em que } n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$$

O inteiro *n* corresponde ao número do harmônico: n = l, para o harmônico fundamental; $n = 2$, para o segundo harmônico; $n = 3$, para o terceiro harmônico; e assim por diante. Da expressão anterior, temos também:

$$\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n} \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$$

Para determinarmos as freqüências correspondentes podemos aplicar a relação $v = \lambda \cdot f$ e obter:

$$v = \lambda \cdot f \quad \Rightarrow \quad v = \frac{2 \cdot L}{n} \cdot f_n \quad \Rightarrow \quad f_n = n \cdot \frac{v}{2 \cdot L} \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$$

Para $n = 1$, obtemos o harmônico fundamental: $f_1 = \frac{v}{2 \cdot L}$

Para os demais harmônicos: $f_n = n \cdot f_1$ para $n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$

Observação:

As ondas transversais que se propagam ao longo da corda têm conforme a equação de Taylor: $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$, onde F é a tensão aplicada sobre a corda, μ é a densidade linear da corda, medida em kg/m e *v* é a velocidade de propagação das ondas transversais na corda, medida em m/s.

Podemos então calcular as freqüências ressonantes de uma corda pela expressão:

$$f_n = \frac{n}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$$

Ao afinarmos um instrumento musical de corda (um violão, por exemplo), podemos alterar a força tensora F através de uma cravelha: aumentando-se F, a freqüência fundamental, aumenta — e o som provocado pela vibração da corda soará mais agudo; diminuindo-se a tensão, a freqüência fundamental diminui — e o som torna-se mais grave.

Observe também que para uma determinada corda, sob certa tensão, a diminuição do comprimento *L* provoca um aumento na freqüência fundamental — e o som torna-se mais agudo. Esse fato permite a um músico obter diferentes notas musicais em uma mesma corda à medida que altera a posição dos dedos e aperta a corda em pontos diferentes ao longo do braço do instrumento.

Note também que as cordas que emitem os sons mais graves são as de maior densidade linear μ, ou seja, as mais "grossas".

Colunas de ar vibrantes

Nos instrumentos musicais de sopro, a coluna de ar no interior de um tubo é posta a oscilar pelas turbulências criadas por uma palheta na embocadura do instrumento. As ondas assim produzidas refletem-se nas extremidades do tubo e, do mesmo modo que em uma corda, ondas estacionárias podem se estabelecer na coluna de ar que preenche esse tubo.

Nesse caso, como é a coluna de ar que vibra, temos na extremidade oposta à embocadura:

• um ventre, se a extremidade for aberta e o ar puder vibrar livremente;

• um nó, se a extremidade for fechada, visto que o ar não estará livre para vibrar. Analisemos inicialmente as freqüências ressonantes de um tubo aberto.

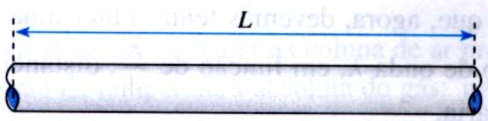
Tubo Aberto

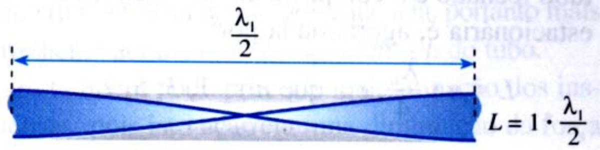
A figura abaixo mostra as três primeiras freqüências ressonantes de um tubo aberto de comprimento *L*. Lembre-se de que a onda estacionária, nesse caso, é do tipo longitudinal, e que a representação mostrada na figura visa apenas facilitar a visualização da onda. Dessa vez vamos considerar, na onda estacionária, a distância entre ventres consecutivos, que é igual a $\lambda/2$.

Observe que a relação existente entre o comprimento *L* do tubo aberto e o comprimento de onda λ, da onda estacionária que nele se estabelece é idêntica à obtida para as cordas vibrantes:

$L = n \cdot \frac{\lambda_n}{2}$ em que: $n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$ de onde temos também:

$$\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n} \qquad n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$$





Primeiro harmônico ou harmônico fundamental

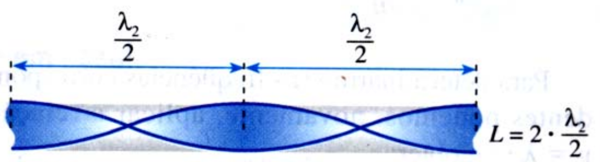
Para determinarmos as freqüências correspondentes podemos, mais uma vez, aplicar a relação $v = \lambda \cdot f$ e obter:

$$v = \lambda \cdot f \quad \Rightarrow \quad v = \frac{2 \cdot L}{n} \cdot f_n \quad \Rightarrow \quad f_n = n \cdot \frac{v}{2 \cdot L}$$

$n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$

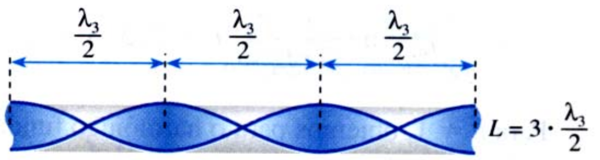
Para $n = 1$, podemos obter o harmônico fundamental: $f_1 = \frac{v}{2 \cdot L}$

Para os demais harmônicos: $f_n = n \cdot f_1$ para $n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$



Segundo harmônico ou primeiro sobretom

Observe que os tubos abertos, assim como as cordas vibrantes, apresentam todos os harmônicos de ordem superior: segundo, terceiro, quarto, quinto, etc.



Terceiro harmônico ou segundo sobretom

Tubos Fechados

Vejamos agora como se comporta um **tubo fechado** de comprimento *L*.

Deve-se ressaltar que a extremidade fechada do tubo será sempre **sede de um nó da onda estacionária**, visto que o ar não pode, nesse ponto, vibrar livremente. Isso se comprova quando sopramos o ar junto ao gargalo de uma garrafa: se soprarmos de qualquer maneira, talvez não consigamos obter som, a não ser que, por tentativas, sopremos de modo tal que o nó da onda estacionária formada fique posicionado no fundo da garrafa — quando, então, obteremos o som característico daquele tubo.

Note que, agora, devemos tentar obter uma relação entre o comprimento *L* do tubo e o comprimento de onda λ, em função de $\lambda/4$, distância entre um ventre e um nó consecutivos da onda estacionária.

A relação existente entre o comprimento *L* do tubo fechado e o comprimento de onda X da onda estacionária é, agora, dada por:

$$L = n \cdot \frac{\lambda_n}{4} \text{ em que: } n = 1, 3, 5, 7, \ldots \quad \text{de onde temos também: } \lambda_n = \frac{4 \cdot L}{n} \quad n = 1, 3, 5, 7, \ldots$$

Para determinarmos as freqüências correspondentes podemos, mais uma vez, aplicar a relação $v = \lambda \cdot f$ e obter:

$$v = \lambda \cdot f \quad => \quad v = \frac{4 \cdot L}{n} \cdot f_n \quad =>$$

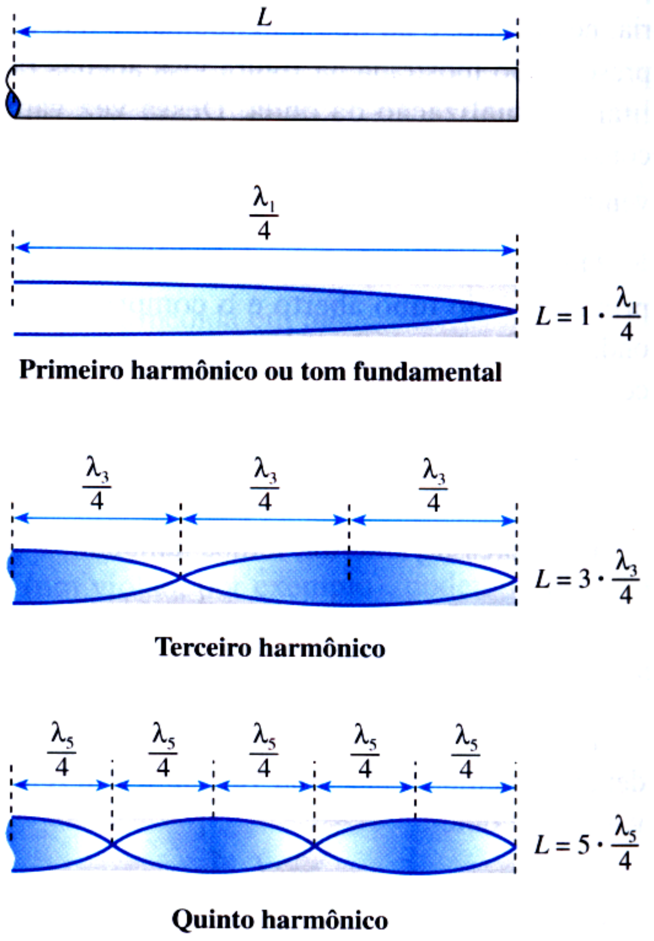
$$f_n = n \cdot \frac{v}{4 \cdot L} \qquad n = 1, 3, 5, 7, \ldots$$

Para $n = 1$, podemos obter o harmônico fundamental:

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

Para os demais harmônicos: $f_n = n \cdot f_1$ para $n = 1, 3, 5, 7, \ldots$

Observe que os tubos fechados podem apresentar apenas os harmônicos superiores de ordem ímpar: terceiro, quinto, sétimo, etc.



Cada um dos vários tubos desse órgão de igreja emite um som fundamental diferente, e cada um deles corresponde a uma nota musical distinta. Os tubos maiores emitem os sons mais graves, e os menores, os mais agudos.

Observação

Como vimos anteriormente, a velocidade de propagação da onda sonora na coluna de ar presente no interior dos tubos — abertos ou fechados — é função da temperatura absoluta do gás: $v = \sqrt{k \cdot T}$.

Por esse motivo, uma variação de temperatura pode alterar a afinação de um instrumento musical de sopro: um aumento de temperatura, por exemplo, provoca um aumento na velocidade de propagação do som e, conseqüentemente, o tubo emitirá um harmônico fundamental de maior freqüência, portanto mais agudo. A afinação, nesse caso, é obtida com um conveniente aumento no comprimento L do tubo.

Deve-se ressaltar que um aumento de temperatura também pode provocar a desafinação dos instrumentos de corda, devido à dilatação das cordas tensas, pois isto acarreta uma diminuição da força tensora na corda.