



## Introdução



**Figura 1**

Quando sopramos na abertura de um tubo fechado na outra extremidade, ouvimos um chiado – ou ruído – que não somos capazes de identificar como nenhuma nota musical. Porém, se soprarmos da forma correta (figura 1), o que pode ser conseguido com um pouco de prática, conseguiremos ouvir um som de altura bem definida, ou seja, um som que pode ser identificado como uma nota musical.

A música é uma das mais antigas e inerentes manifestações do espírito humano. Uma das primeiras constatações que os homens fizeram é que nem todo som é agradável ou pode ser usado na música. Por exemplo, o chiado que ouvimos ao soprar o tubo, dificilmente poderia ser combinado com outros sons para criar uma melodia. No entanto, existem sons, que quando combinados com outros, podem gerar aquilo que chamamos de música. Esses sons podem ser produzidos das mais diversas formas, mas possuem algumas características que nos permite classificá-los e identificá-los. Essa característica é o que chamamos de nota musical. As notas musicais são identificadas por sua altura – que não deve ser confundida com intensidade ou volume. Assim, dadas duas notas diferentes, uma será identificada como mais alta ou aguda e a outra como mais baixa ou grave.

O que determina a altura de uma nota é a frequência do som. Se um som tem frequência mais alta ele é mais agudo, se a frequência for mais baixa ele será mais grave.

**Observação:** Para ouvir os áudios referentes a esse experimento acesse a página do guia do professor.

O chiado produzido pelo ar, ao se chocar com as paredes do tubo, é resultado de um movimento caótico que gera perturbações que se propagam em todas as direções. Essas perturbações são caracterizadas como variações espaciais e temporais na densidade e pressão do ar ou – o que é equivalente – como deslocamentos do ar com relação à sua posição média. Devido à sua natureza caótica não podemos associar nenhuma frequência a essas perturbações.

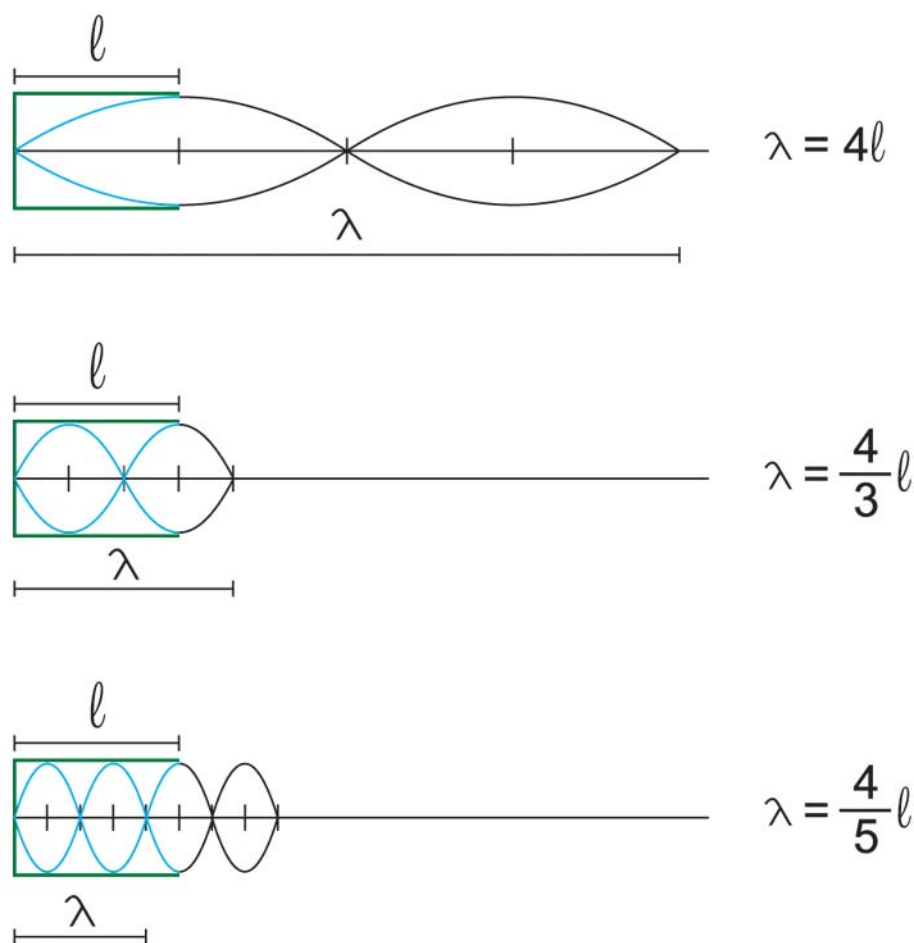
Algumas dessas perturbações se propagam para dentro do tubo, são refletidas pela parede na extremidade fechada e retornam para a extremidade aberta,

onde novamente são refletidas para a o interior do tubo. A maioria das muitas frequências possíveis geradas pelo movimento caótico se cancelará nesse processo, uma vez que as ondas que entram anularão as que estão saindo. Apenas para um pequeno conjunto de frequências haverá superposição construtiva das perturbações que se movimentam para dentro do tubo com as que se movimentam para fora produzindo uma perturbação ainda mais forte. Essas são as frequências de ressonância do tubo.

Vamos descrever essas perturbações como variações na posição média das partículas de ar. Na extremidade fechada do tubo as partículas não podem se mover e dessa forma, a variação na posição é nula para todas as perturbações. No extremo aberto, a variação pode ser muito grande, porque o ambiente externo tende a minimizar as variações de pressão, permitindo o deslocamento do ar. Para que uma perturbação possa caminhar nos dois sentidos, reforçando as que vêm em sentido oposto, ela deve satisfazer simultaneamente a estas duas condições: deslocamento nulo na extremidade fechada (um nó) e deslocamento máximo na extremidade aberta (um ventre). Essas duas condições devem ser mantidas o tempo todo e as perturbações, cujas frequências forem capazes de satisfazê-las, criarão ondas estacionárias dentro do tubo.

A situação é análoga à ressonância que ocorre em um pêndulo sujeito a oscilações forçadas. O movimento turbulento e caótico do ar introduzido na boca do tubo corresponde a uma força que é a combinação de muitas frequências simultâneas. Estarão presentes como ondas estacionárias dentro do tubo, apenas as frequências para as quais há ressonância.

Podemos representar essas ondas em esquemas como o da figura a seguir. Nesta figura, o deslocamento máximo do ar em cada posição é representado pela distância à linha eixo do tubo. No entanto, é importante manter em mente que a onda dentro do tubo é longitudinal e que os deslocamentos ocorrem na direção do eixo do tubo:



**Figura 2** - Ondas estacionárias representadas em um tubo fechado em uma extremidade

A distância entre um nó e um ventre adjacente é de  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda. Portanto, as ondas estacionárias que podem ser produzidas dentro de um tubo de comprimento  $\ell$  serão:

$$4\ell, 4\ell/3, \ell/5, 4\ell/7, \dots$$

Se a velocidade do som no ar for  $v$ , lembrando que  $f=v/\lambda$ , as frequências correspondentes serão:

$$v/4\ell, 3v/4\ell, 5v/4\ell, 7v/4\ell, \dots$$

Vemos que elas podem ser escritas como  $f_0, 3f_0, 5f_0, 7f_0$ , etc., onde  $f_0=v/4\ell$  é a frequência mais baixa ou frequência fundamental. O tubo fechado em uma das extremidades produz um conjunto de ondas cujas frequências são múltiplos ímpares da frequência fundamental. Essas frequências são chamadas de

harmônicos do fundamental. Assim, o primeiro harmônico tem frequência  $f_1=3f_0$ , o segundo,  $f_2=5f_0$  e assim por diante.

O que determina o timbre de um instrumento, ou seja, o que nos permite distinguir entre um “lá” produzido por um violino e o mesmo “lá” produzido por uma flauta é a relação entre a intensidade da frequência fundamental e as intensidades de seus harmônicos.

No caso do tubo fechado em um dos extremos, os harmônicos são bem mais fracos do que o fundamental, mas ainda assim, têm importância na determinação do timbre. Se soprarmos o tubo com mais força, poderemos fazer com que a intensidade do primeiro harmônico ( $3f_0$ ) torne-se mais alta que a da fundamental, permitindo dessa forma, que ele seja claramente ouvido.

**Fique atento às condições de segurança!**