# VELOCIDADE DAS ONDAS SONORAS NO AR

## I – INTRODUÇÃO

Qualquer corpo material que vibra gera ondas mecânicas no meio no qual está imerso, podendo tanto o corpo como o meio ser sólido, líquido ou gasoso. O som percebido por nosso aparelho auditivo corresponde a ondas nestes meios materiais. Ao atingir os nossos ouvidos elas provocam vibrações dos tímpanos que são convertidas em impulsos elétricos e conduzidas até o cérebro que processa a informação recebida.

O aparelho auditivo do ser humano só processa e distingue ondas com frequências no intervalo [20Hz ,20.000Hz], que define o que chamamos de sons ou ondas sonoras. Abaixo de 20 e acima de 20.000Hz, as ondas são denominadas, respectivamente, de infra-som e ultra-som. Alguns animais são capazes de perceber ondas com frequências mais altas, como cães amestrados que atendem a apitos cuja frequência de emissão atinge a 50.000Hz, e os morcegos que conseguem captar frequências de até 120.000Hz, utilizando esta capacidade para evitar colisões com obstáculos. Por outro lado, elefantes e baleias podem captar ondas com frequências abaixo de 20 Hz, na região dos infra sons.

O som (e também os infra- e ultra-som) são ondas longitudinais. Como todas os fenômenos ondulatórios elas são caracterizadas pela velocidade de propagação que depende do meio onde o fenômeno é observado. A título de ilustração apresentamos valores típicos medidos em diversos meios: borracha: 54m/s; ar: (a 20°C): 340 m/s; água: 1.450 m/s; granito: 6.000 m/s. Todas as propriedades estudadas para as ondas em geral (reflexão, refração, difração, interferência) são também válidas para as ondas sonoras.

A velocidade de propagação das ondas em um meio gasoso pode ser obtida teoricamente a partir do modelo do gás ideal. A expressão resultante é:

$$v_s = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}\,, \tag{1}$$

onde $P$ indica a pressão no gás, $\rho$ é a sua densidade volumétrica e $\gamma$ é a razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a volume constante, $\gamma = c_p / c_v$. No caso em que o meio é o ar, $P$ a pressão atmosférica ($1{,}03\times10^5$ Pascal), e a temperatura é 20°C, obtém-se $v_s$=344m/s, que concorda com os valores medidos com precisão.

Neste experimento iremos medir a velocidade de propagação do som no ar através da geração de ondas estacionárias em um tubo. Discutiremos a seguir algumas características do som.

### INTENSIDADE DO SOM

A intensidade do som é uma quantidade relacionada com a energia transportada pela onda e depende da potência de vibração da fonte emissora. Quanto maior for a quantidade de energia transportada por unidade de tempo, maior é a intensidade do som que perceberemos. A quantidade de energia transportada está relacionada com a amplitude de vibração da onda, sendo a intensidade do som tanto maior quanto maior for a amplitude da onda sonora. O efeito sonoro da variação da intensidade é percebido ao se variar o volume (i.e., a potência gasta na emissão da onda sonora) de um amplificador de som.

### ALTURA DO SOM

A altura do som é relacionada com a frequência da onda sonora. Ela permite classificar o som em grave e agudo. Exemplificando, dizemos em geral que os homens têm voz grave (baixas frequências), enquanto as mulheres possuem voz aguda (alta frequência). Em linguagem musical, um som agudo é alto enquanto um som grave é baixo. Convém ressaltar que na linguagem comum, costuma-se usar os termos "alto" e "baixo" com referência a intensidade do som, o que é incorreto e deve ser evitado.

As notas musicais são caracterizadas pelas suas frequências de emissão. Também os cantores de música clássica são classificados segundo a capacidade de emissão de notas musicais. As frequências das notas musicais que os baixos tenores e sopranos são capazes de emitir, variam desde 100Hz até 1.200Hz, aproximadamente.

**TIMBRE DO SOM**

O que caracteriza o timbre do som é a forma da onda sonora emitida. Note que raramente uma onda sonora emitida por um instrumento é caracterizada por uma única frequência. Normalmente ela é formada pela superposição (soma) de diversas ondas harmônicas. A frequência mais baixa, chamada de frequência fundamental $f_0$, é a que caracteriza a altura do som. A ela são superpostos os seus harmônicos, i.e., ondas harmônicas com frequência $f_n = n\, f_0$. O timbre depende dos diferentes pesos relativos com que os harmônicos da frequência fundamental aparecem na onda, sendo que estes pesos são determinados pela forma da cavidade ressonante. Como podemos representar graficamente esta onda, dizemos que a sua forma é que caracteriza o timbre.
Assim, uma nota emitida por um piano resulta não apenas da vibração da corda acionada, mas das vibrações dos componentes da caixa (madeira, colunas de ar, outras cordas, etc.), que também vibram com ela e conjuntamente originam uma onda sonora própria do piano. O mesmo ocorre com outros instrumentos musicais e com vozes humanas, o que permite identificar uma pessoa pela voz. O nosso ouvido é capaz de distinguir dois sons, da mesma frequência e mesma intensidade, desde que a forma das ondas sonoras correspondentes sejam diferentes. Dizemos que neste caso, os dois sons possuem timbres diferentes.

**ONDAS ESTACIONÁRIAS**

Neste experimento iremos medir a velocidade de propagação do som no ar através da geração de *ondas estacionárias* em um tubo aberto em uma ponta. Já estudamos a geração de ondas estacionárias em uma corda vibrante, presa nas duas pontas. Uma diferença entre os dois casos é que, no caso da corda, as ondas são *transversais*, pois o movimento oscilante da corda ocorre numa direção transversal à direção de propagação da onda. No caso do som, as ondas são *longitudinais*, pois as moléculas que compõem o ar vibram na mesma direção em que o som se propaga.

Podemos representar esta onda unidimensional por meio de uma senóide, conforme a Fig. 1. No caso (a), o que estamos representando na ordenada é o *deslocamento* $s(x)$ das moléculas que compõem o ar, em torno de sua posição de equilíbrio médio, em função de sua posição $x$ ao longo do tubo, em um dado instante. Conforme podemos ver em (b), as moléculas localizadas em $x_1$ e $x_3$ estão em suas posições de equilíbrio neste instante ($s$=0), ao passo que a molécula em $x_2$ está deslocada para a direita em relação ao equilíbrio (s>0).

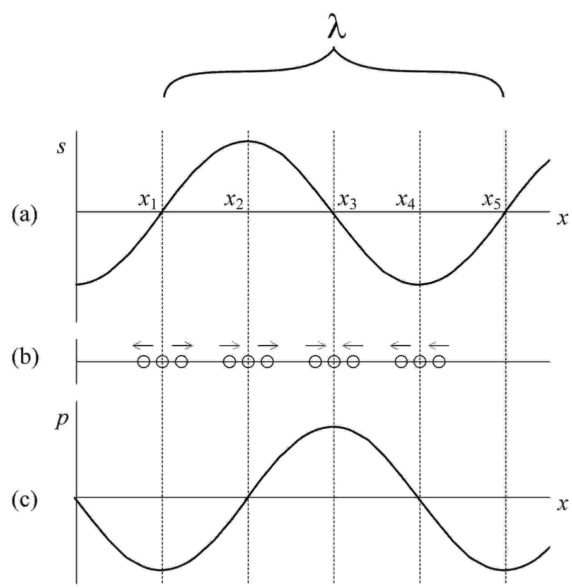


Figura 1

Há, no entanto, uma diferença entre as posições em $x_1$ e $x_3$. As moléculas em torno de $x_3$ estão "apertando" o ponto de equilíbrio, o que corresponde a um aumento de pressão, enquanto que as moléculas em torno de $x_1$ estão todas se afastando do equilíbrio, correspondendo a uma pressão mais baixa. Podemos então representar em (c) a curva da pressão $p(x)$ da onda sonora, no mesmo instante da curva (a).

Vemos pelas figuras que um máximo de deslocamento corresponde a um zero de pressão, e um zero de pressão a um máximo ou mínimo de deslocamento. Por convenção, é costume desenhar ondas sonoras por meio de uma curva senoidal de *deslocamento*. O comprimento de onda $\lambda$ é a distância entre dois máximos da onda de deslocamento (na Fig. 1, a distância entre $x_1$ e $x_5$).

Estudaremos a propagação do som em um tubo vertical cheio de ar, aberto em uma ponta e fechado com água em outra. Simplificadamente, podemos supor que o som se propaga apenas em uma dimensão, paralela ao eixo do tubo. O som é gerado na boca do tubo, se propaga em seu interior, reflete na superfície de água e retorna para a boca do tubo, onde parte sai para fora e parte retorna mais uma vez para dentro.

Em nosso experimento, encontraremos situações em que se formam ondas sonoras *estacionárias* dentro do tubo. Na parede interna do tubo (onde há água), as moléculas de ar são restringidas a ficar paradas, formando assim um *nó de deslocamento* nulo. Já na superfície aberta do tubo, a condição de contorno apropriada é que a pressão do ar se mantenha aproximadamente constante, resultando em um nó de *pressão* (igual à pressão atmosférica). Pelo que vimos acima, pressão nula corresponde a um extremo de deslocamento, equivalendo a um *ventre de deslocamento* na boca do tubo.

De forma análoga ao que ocorre com a corda vibrante, essas duas condições de contorno selecionam uma série de harmônicos em que ocorre uma ressonância entre a vibração sonora da fonte e os modos naturais de vibração do tubo. Tais ressonâncias serão ouvidas em classe como um aumento na intensidade do som.

Antes de começar a análise do experimento, lembremos que a velocidade $V$ de uma onda é o produto da freqüência $f$ e de seu comprimento de onda $\lambda$: $V = f{\cdot}\lambda$. Conhecendo $f$ e determinando $\lambda$, saberemos a velocidade.

Na Fig. 2, representamos três diferentes harmônicos que podem ocorrer quando fixamos a freqüência do som. Para inferirmos as condições de ressonância, é mais fácil trabalhar com o comprimento de onda $\lambda$ do som, ao variarmos o comprimento $L$ do tubo. Examinando as diferentes relações entre $\lambda$ e $L$ (ver figura), inferimos por indução que:

$$\lambda = \frac{4}{2n-1} L_n \quad . \tag{2}$$

Para a ressonância em $n$=1, poderíamos inferir o comprimento de onda através da relação $\lambda$=4$L_1$. No entanto, na prática esta relação não se verifica, porque o ventre de deslocamento da onda estacionária não ocorre exatamente

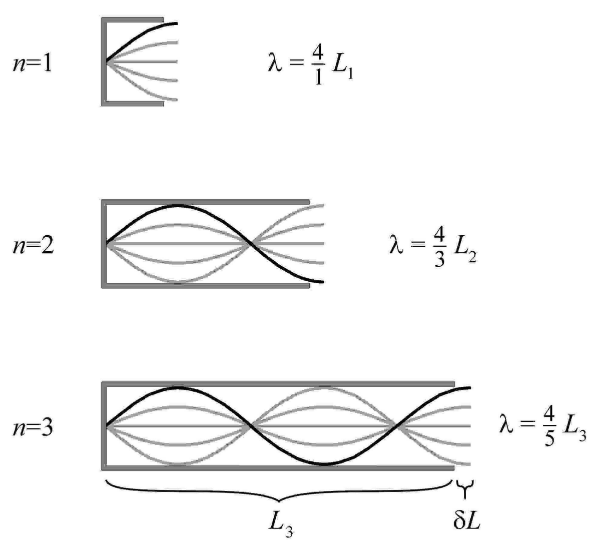



Figura 2

na boca do tubo, mas a uma distância $\delta L$ para fora. Esta correção terminal $\delta L$ é aproximadamente a mesma para todos os valores de $n$, e é da ordem de grandeza do raio do tubo. Assim, a condição encontrada acima deve ser substituída por:

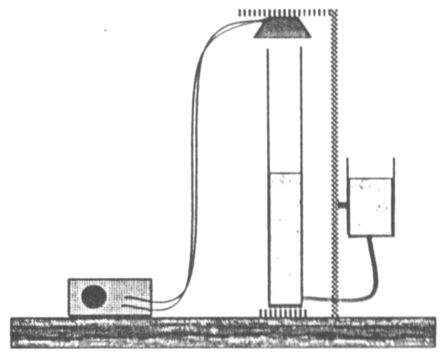
$$\lambda = (4/(2n-1))\,(L_n + \delta L). \tag{3}$$

Como $\delta L$ independe do tamanho do tubo, é possível eliminá-lo tomando a diferença entre duas medições de L. Desta forma, para qualquer $n$:

$$L_{n+1} - L_n = \lambda/2 \ . \tag{4}$$

## II - MATERIAL NECESSÁRIO

1. Tubo de vidro contendo coluna de água
2. Dispositivo para fazer variar a coluna d'água.
3. Gerador de áudio
4. Alto falante utilizado como fonte de áudio



### III – PROCEDIMENTO

Disponha o reservatório de água numa altura tal que o nível da água se mantenha o mais alto possível no tubo de vidro. Selecione no gerador uma frequência $f$ de aproximadamente 700Hz e a mantenha fixa. Registre seu valor na tabela. Varie lentamente a altura do reservatório d'água fazendo diminuir a altura da coluna de água e aumentando o comprimento $L$ do tubo. Observe atentamente o que acontece com a intensidade do som, à medida que a coluna de água vai baixando. Continue com este procedimento até atingir a menor altura possível da coluna de água. Volte agora a aumentar a altura da coluna de água, registrando na tabela os valores da escala onde o som atinge intensidade máxima. Complete a tabela, calculando o valor do comprimento de onda com o auxílio da equação (4). Repita o mesmo procedimento para mais cinco valores de frequência no gerador.

### IV - TRATAMENTO DOS DADOS

Em um papel milimetrado faça um gráfico da frequência $f$ em função do inverso do comprimento de onda $1/\lambda$ . Calcule a velocidade do som $v_s$ através de três procedimentos: pela média dos valores de $v_s$ obtidos usando-se $f$ e $\lambda$; pela inclinação da reta obtida no gráfico $f$ x $1/\lambda$; pelo método dos mínimos quadrados aplicado às grandezas $f$ e $1/\lambda$.