Experiência 8 - Ondas Sonoras Estacionárias: O Tubo de Kundt

1 - OBJETIVO

O objetivo desta experiência é estudar ondas sonoras estacionárias em um tubo cilíndrico com as extremidades abertas e um tubo cilíndrico com uma das extremidades aberta e a outra fechada. Verificaremos que só temos harmônicos ímpares para um tubo fechado. Usando a relação entre freqüência e comprimento do tubo para os dois casos, determinaremos a velocidade do som no ar.

2 - INTRODUÇÃO

A geração de ondas sonoras estacionárias é fundamental no desenho de instrumentos musicais. A maioria dos instrumentos usam a vibração de uma corda ou lingüeta e também ondas dentro de um corpo oco como princípio de funcionamento. Além disso, muitos instrumentos musicais têm a forma de um tubo que é o objeto que usaremos nesta aula para estudarmos a propagação de ondas sonoras no ar.

Uma onda sonora se propaga num determinado fluido (ar, água ...), sempre que se produz uma variação de pressão no mesmo. Essa variação de pressão pode ser obtida de várias formas, como por exemplo quando fazemos vibrar um objeto metálico.

Para termos uma idéia intuitiva do que acontece quando uma onda sonora é produzida vamos analisar o que acontece quando fazemos soar um gongo [1]. O gongo vibra, sua parte central descreve um movimento muito parecido com o movimento da massa presa em uma mola que estudamos na **Aula 3**. O gongo empurra e puxa o ar a sua volta. Quando ele empurra o ar ele cria, na região próxima a ele, uma pressão um pouco superior à pressão atmosférica. Essa região por sua vez empurra outra região do ar a sua frente. Assim, a compressão é transmitida para as camadas seguintes de forma muito similar a um pulso que se propaga numa corda. Quando o gongo retorna, ele cria uma região de rarefação (pressão um pouco menor que a pressão atmosférica) que também puxa a região vizinha e assim a rarefação é transmitida também às camadas seguintes da massa de ar atmosférico. A onda sonora então pode ser descrita como uma onda de variação de pressão constituída por seqüências de compressão e rarefação do ar, propagando no espaço. A onda de pressão provoca uma onda de deslocamentos do fluido. Quando a variação de pressão é máxima o deslocamento é mínimo e vice versa.

Vamos ver agora as condições que devemos ter para as quais ondas estacionárias possam ser formadas num tubo. Essa situação é semelhante ao que vimos no caso da corda vibrante. Aqui, no lugar da corda de comprimento L, presa nas extremidades, trataremos de duas situações: um tubo de comprimento L e raio R, com as duas extremidades abertas e um tubo de comprimento l e raio R, com uma extremidade aberta e outra fechada. Vimos no caso da corda, **Aula 7**, que ondas estacionárias são observadas na mesma, quando a onda incidente satisfaz certas condições de contorno. No caso da corda, com as duas extremidades fixas, as condições de contorno impõem que a onda deve ter nodos nas extremidades, ou seja, nas extremidades o deslocamento da corda deve ser nulo. A pergunta que fazemos agora é com relação às ondas sonoras. Quais devem ser as condições de contorno para que possamos observar ondas estacionárias num tubo? Para o tubo, teremos ondas estacionárias sempre que as extremidades do mesmo corresponderem a um nodo de pressão OU um nodo de deslocamento. Uma extremidade aberta corresponde a um nodo de pressão e por conseguinte um antinodo de deslocamento e uma extremidade fechada corresponde a um nodo de deslocamento ou um antinodo de pressão. Na verdade, a variação de pressão só se anula um pouco adiante da extremidade aberta: a coluna de ar vibrante se estende um pouco além da extremidade aberta. Para um tubo de secção circular com paredes não muito espessas, que é o nosso caso, devemos corrigir o comprimento do mesmo. Devemos acrescentar $0,6R$ ao comprimento do tubo para cada extremidade aberta que ele possuir. Assim teremos os comprimentos efetivos $L_{ef} = L + 1,2R$, para o tubo com as duas extremidades abertas e $l_{ef} = l + 0,6R$ para o tubo com uma extremidade aberta e a outra fechada.

Tubo com duas extremidades abertas

Para um tubo com as duas extremidades abertas a condição para observação de ondas estacionárias no tubo é a mesma condição para observação de ondas estacionárias na corda. O tubo com as extremidades abertas possui antinodos de deslocamento nas mesmas. Na FIG.1 ilustramos a onda de deslocamentos para o primeiro modo normal do tubo aberto, também chamado de modo fundamental.

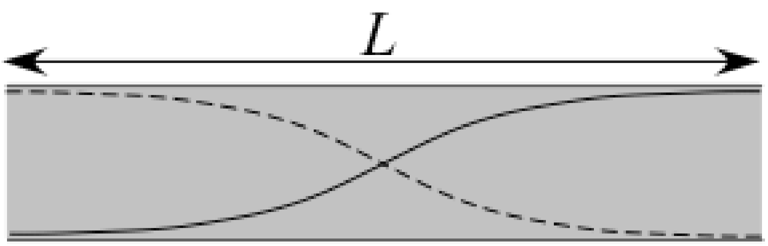

FIG.1 – Tubo com as duas extremidades abertas: modo fundamental.

Podemos ver que o comprimento de onda do modo fundamental é dado por $\lambda = 2L$. Como visto no caso da corda, para um tubo de comprimento *L* com as duas extremidades abertas, as freqüências de ressonância correspondem aos comprimentos de onda dados por

$$\lambda_n = \frac{2L}{n};\ com\ n = 1,2,3,... \tag{1}$$

onde n é chamado de número do harmônico.

Usando a relação entre freqüência e comprimento de onda $f = \lambda v$, onde v é a velocidade do som no ar, temos

$$f_n = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L}. \tag{2}$$

Tubo com uma extremidade fechada

O modo fundamental que corresponde ao primeiro harmônico de um tubo com uma extremidade aberta e a outra fechada, pode ser visto na FIG.2:

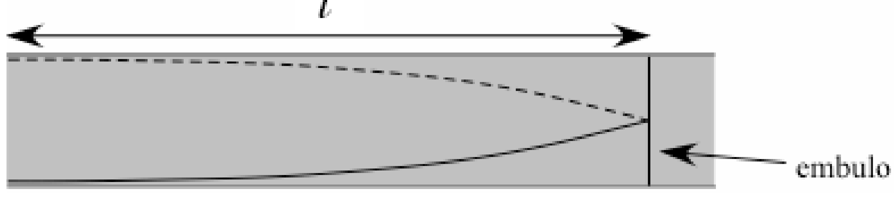

FIG.2 – Tubo com uma extremidade aberta e outra fechada: modo fundamental.

Para termos uma onda estacionária no tubo nesta situação, devemos ter um nodo de deslocamento na extremidade fechada e um antinodo de deslocamento na extremidade aberta.

Podemos ver que o comprimento de onda do modo fundamental é dado por $\lambda = 4l$, onde l é o comprimento que vai da extremidade aberta até a extremidade fechada do tubo. Devido às condições de contorno, para um tubo de comprimento l com uma extremidade aberta e uma fechada, as freqüências de ressonância, ou freqüências das ondas estacionárias observadas, correspondem aos comprimentos de onda dados por:

$$\lambda_m = \frac{4l}{m}; com \quad m = 1,3,5,... \tag{3}$$

Neste caso os números dos harmônicos m são sempre ímpares e as freqüências de ressonância são dadas por:

$$f_m = \frac{v}{\lambda} = \frac{mv}{4l}; com \quad m = 1,3,5,... \tag{4}$$

3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Constantes: velocidade de som no ar (20 °C): v = 343 m/s

1- Meça o comprimento L e o raio R do tubo que será usado na experiência.

2 - Verifique que o gerador de freqüências e que o medidor de freqüências está ligado e conectado na entrada “Counter 1” na unidade “Cobra3 Base Unit” e que o “Cobra3 Base Unit” está ligado e conectado ao computador.

3 - Ligue o computador e abra o programa Measure (**Programs→Phywe→Measure**) e inicie o contador de freqüência (**Gauge→Cobra3 Timer/Counter→Frequency Counter**).

4 - Verifique que o contador de freqüência está lendo a freqüência certa marcada pelo gerador. **Deixe o gerador de funções ajustado para uma amplitude baixa quando não estiver em uso.** Se o contador não estiver lendo nada, (a) verifique que o contador está lendo “Counter 1”, (b) ajuste o “Offset” até obter um sinal, (c) aumente a amplitude do gerador e mexa no “Offset” de novo.

5 - Calcule o valor da freqüência fundamental dos primeiros 3 harmônicos para o tubo com as extremidades abertas usando a Eq.(1).

6 - Com o tubo aberto, varie continuamente a freqüência, começando com um valor próximo do modo fundamental $(n = 1)$ e ajuste a freqüência para a ressonância do modo fundamental. Quando o som ficar mais intenso, é sinal de que você está na ressonância. (SUGESTÃO: O PROFESSOR FAZER O EXPERIMENTO DO TUBO ABERTO JUNTO COM OS ESTUDANTES NUMA ÚNICA BANCADA.)

7 - Encontre as ressonâncias para os primeiros 5 harmônicos do tubo aberto e meça os valores das freqüências correspondentes através do medidor de freqüência. Use as bolinhas de isopor para facilitar a identificação das ressonâncias.

8 - Escolha freqüências entre 200 e 800 Hz. Utilizando o êmbolo, ajuste o comprimento do tubo fechado (note que é o êmbolo que fecha o tubo) e ache o menor comprimento que corresponda a uma

onda estacionária. Certifique-se de que este é o comprimento mínimo possível para esta freqüência e meça o comprimento *l* que corresponde ao modo fundamental para 5 valores de freqüência diferentes.

9 - Repita o procedimento acima, agora utilizando o segundo harmônico do tubo fechado.

5. REFERÊNCIAS

[1] H. Moysés Nussenzveig, Curso de Física Básica, volume 2.