



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Uma proposta para o ensino dos modos normais nos tubos sonoros

Anderson R. Souza

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Anderson R. Souza, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
2011

UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DOS MODOS NORMAIS NOS TUBOS SONOROS

Material instrucional baseado na dissertação de mestrado “Experimentos em ondas mecânicas”, de Anderson Ribeiro de Souza, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro em 24/02/2011.

Resumo

Na primeira parte deste trabalho descrevemos um experimento para o estudo dos modos normais das ondas sonoras no interior de tubos cilíndricos abertos e fechados. Na segunda parte, apresentamos uma sequência de ensino-aprendizagem sobre tubos sonoros que emprega o experimento anteriormente descrito.

Parte I. Mapeamento do som nos tubos sonoros.

I.1 Materiais

- Computador.
- Microfone de PC. É preciso que seja pequeno e tenha um fio flexível.
- Caixa de som portátil.
- Tubo de papelão, plástico etc. Seu diâmetro deve ser largo o suficiente para permitir a passagem do microfone com folga. Seu tamanho deve ser menor que o comprimento do fio do microfone que irá atravessá-lo de uma extremidade a outra.
- Programas para geração e análise de áudio. Há muitos disponíveis na Internet. Indicamos o *SweepGen* (<http://www.satsignal.eu/software/audio.html>) e o *Audacity* (<http://audacity.sourceforge.net/?lang=pt>) porque são inteiramente gratuitos e têm todas as funções necessárias ao experimento.

I.2 Objetivo

Mapear a intensidade do som audível no interior de tubos sonoros cilíndricos abertos e fechados.

I.3 Procedimentos experimentais

A. Tubo sonoro aberto

A figura I.1 ilustra o procedimento experimental. Um tubo sonoro é fixado na direção vertical e uma caixa de som é posicionada próxima à sua boca. A caixa de som não deve encostar nessa extremidade. Uma distância que se revelou apropriada é cerca de 20 cm do tubo.

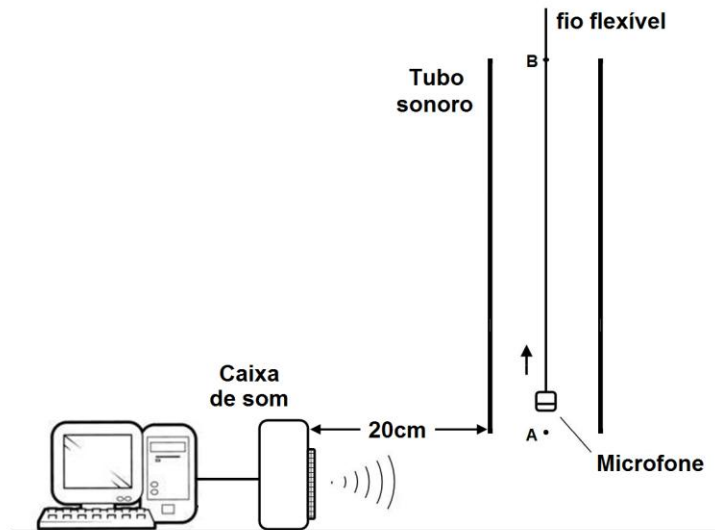


Figura I.1 Montagem do experimento.

Após medir o comprimento L do tubo, calcule suas frequências de ressonância de acordo com a equação

$$f_n = n \frac{v_{\text{som}}}{2L}, \text{ onde } n = 1, 2, 3... \quad (I.1)$$

As variações da velocidade do som com a temperatura devem ser irrelevantes neste experimento, e o valor $v_{\text{som}} = 340\text{m/s}$ pode ser adotado.

Com o programa *SweepGen* produza uma onda senoidal da frequência de seu 1º modo normal de vibração. Simultaneamente, acione a gravação do som

através do programa *Audacity* e desloque o microfone de uma extremidade a outra do tubo. A gravação é encerrada com a saída do microfone na extremidade oposta do tubo.

É importante que o microfone não seja longo a ponto de prejudicar a passagem do som pelo tubo, modificando acentuadamente sua geometria (figura I.1). Se o seu fio for bem flexível, será mais fácil movimentá-lo colocando-o inicialmente próximo da extremidade inferior e, com o transcorrer da gravação, ir erguendo-o até a extremidade superior.

O microfone do computador, assim como o ouvido humano, é um sensor de pressão e, portanto, será capaz de transformar variações da pressão do ar em variações de intensidade sonora.

Comece o procedimento acima com a frequência do modo fundamental, depois repita-o para os modos superiores de vibração.

B. Tubo sonoro fechado

O procedimento experimental desta etapa é muito semelhante ao da anterior, exceto pelo fato das frequências de ressonâncias do tubo serem calculadas pela equação (I.2).

$$f_n = n \frac{v_{\text{som}}}{4L}, \text{ onde } n = 1, 3, 5... \quad (\text{I.2})$$

O tubo aberto pode ser transformado num tubo fechado simplesmente vedando sua extremidade inferior com uma tampa. Esta, por sua vez, pode ser improvisada com um pedaço de papel e fita adesiva, por exemplo.

Não é necessário mexer na posição da caixa de som. A mesma distância de aproximadamente 20 cm funciona bem para os tubos fechados (figura I.2).

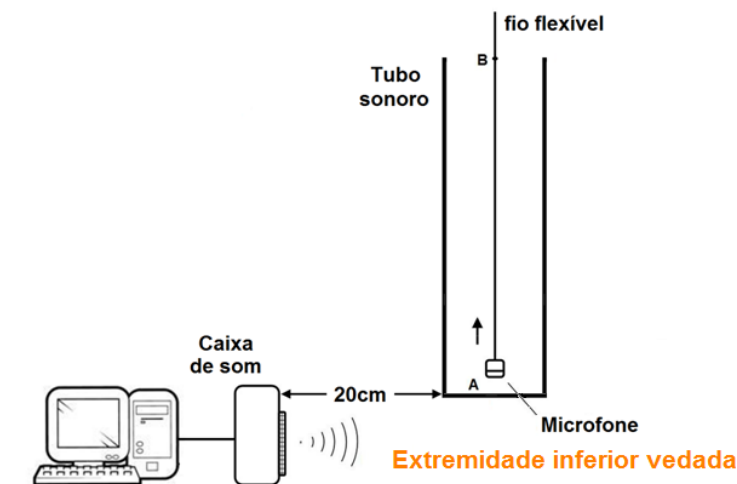


Figura I.2 Arranjo experimental para o tubo fechado.

A gravação também pode ser feita do mesmo modo que na primeira etapa. Posicione inicialmente o microfone na extremidade inferior, agora fechada pela tampa. Acione o tom harmônico calculado e inicie a gravação com o *Audacity*. Erga o microfone até a extremidade superior, quando a gravação poderá ser interrompida.

Comece o procedimento acima com a frequência do modo fundamental, depois repita-o para os modos superiores de vibração.

I.4 Resultados experimentais e comentários

Com duas ou três tentativas, é possível aprender a deslocar o microfone de modo aproximadamente uniforme. Desse modo, figuras simétricas devem aparecer na tela do computador como indicam os resultados experimentais da figura I.3.

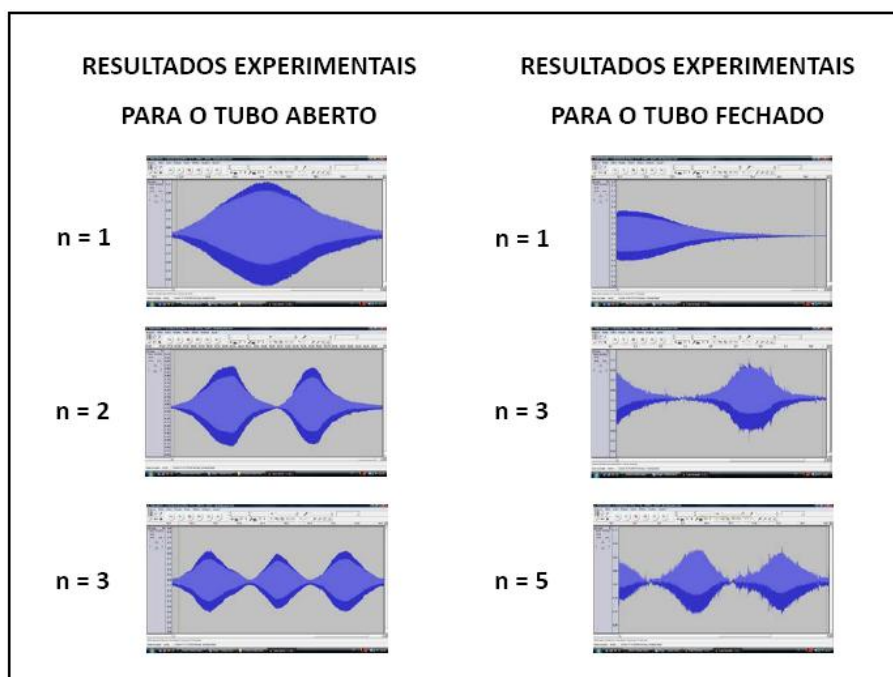


Figura 1.3 Resultados experimentais da medida da intensidade sonora para os três primeiros modos normais de tubo sonoro aberto e outro fechado.

As equações (1.1) e (1.2) não preveem com exatidão as frequências de ressonância dos tubos sonoros. Como o diâmetro do tubo não é muito menor que seu comprimento, uma correção pode ser feita nestas expressões. As equações (1.3), para o tubo aberto, e (1.4), para o tubo fechado, introduzem o efeito do diâmetro D nas frequências de ressonância:

$$f_n = n \frac{v_{\text{som}}}{2(L + 0,6D)} \quad , \quad (1.3)$$

$$f_n = n \frac{v_{\text{som}}}{4(L + 0,3D)} \quad . \quad (1.4)$$

As correções acima geram modificações quase imperceptíveis nos formatos das ondas gravadas com o Audacity. Como este detalhe é irrelevante para a obtenção dos resultados acima, sugerimos que ele não seja mencionado para alunos do ensino médio. Isto só introduziria uma dificuldade adicional sem qualquer ganho em termos conceituais.

Parte II. Uma sequência de ensino-aprendizagem sobre ondas sonoras.

II.1 Objetivos

Através dessa proposta de ensino-aprendizagem pretendemos que os estudantes compreendam que:

- o som pode ser interpretado como a oscilação de diferentes grandezas físicas: a pressão do ar e deslocamento médio de suas moléculas, por exemplo;
- embora a pressão do ar e o deslocamento das moléculas representem o mesmo fenômeno, tais grandezas têm uma diferença de fase 90° de entre si;
- a intensidade do som audível está associada à variação da pressão do ar, e não ao deslocamento de suas moléculas.

Na sequência de ensino-aprendizagem abaixo indicamos as discussões que o professor pode fazer com os alunos sobre o som nos tubos sonoros. As ilustrações apresentadas formam um conjunto de slides que o professor pode utilizar em sala de aula. Este material também está disponível na página do Mestrado Profissional em Ensino de Física do IF-UFRJ (http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico.html).

II.2 Abordagem

A abordagem do professor tem início com a apresentação dos tubos sonoros abertos e fechados (figura II.1).

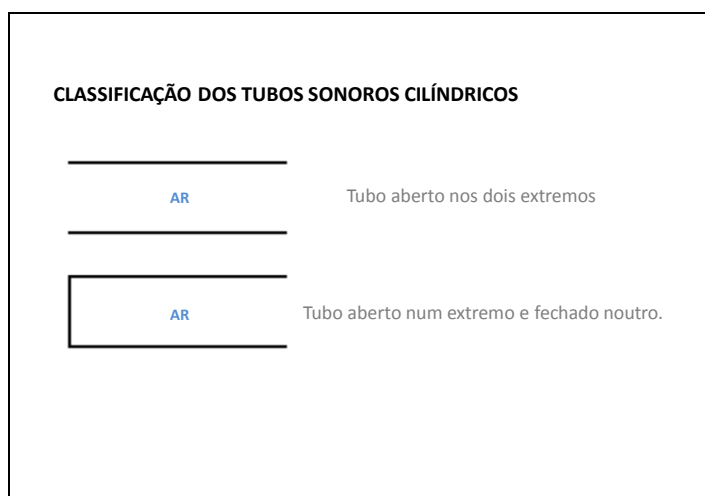


Figura II.1 Apresentação do tubo cilíndrico aberto e fechado.

A figura II.2 permite que o professor inicie as discussões a respeito das condições de contorno do tubo sonoro aberto. O ar no interior do tubo está sujeito às variações de pressão impostas pela passagem da onda sonora. No entanto, próximo à boca do tubo, o ar externo apresenta a pressão constante de aproximadamente 1atm.

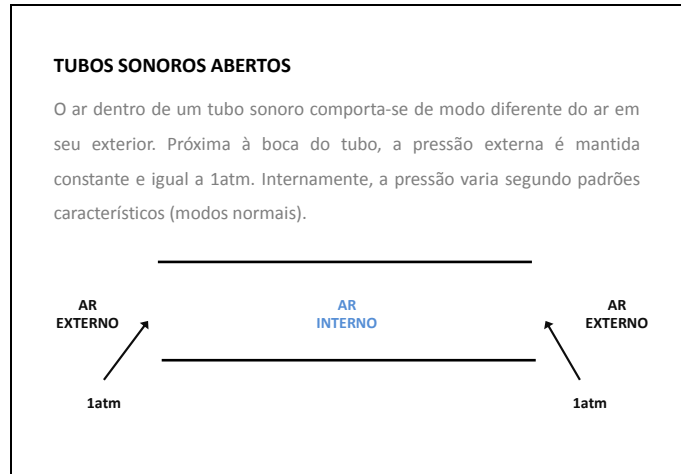


Figura II.2 Condição de contorno associada à pressão do ar ao longo de um tubo sonoro aberto.

É conveniente iniciar a discussão a partir do primeiro modo normal de vibração. Começaremos a abordagem com o tubo sonoro aberto. O professor deve associar as condições de contorno da figura II.2 com a figura II.3. O aumento da intensidade da cor nesta figura representa o aumento da pressão e da densidade do ar no tubo.

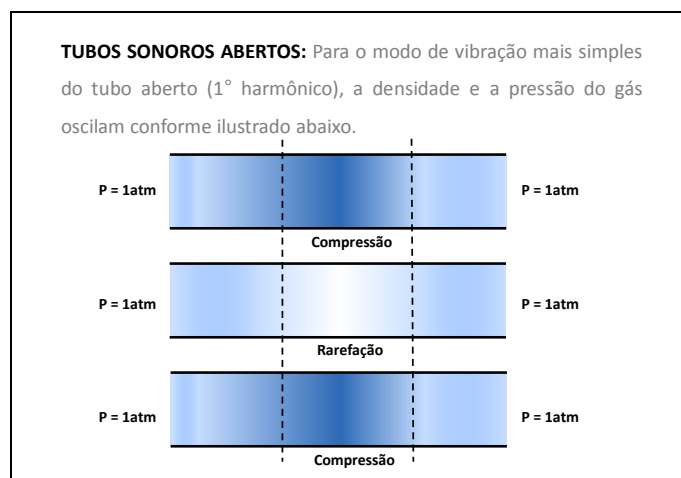


Figura II.3 1° harmônico no tubo aberto: a intensidade da cor está associada com a pressão e a densidade do ar no tubo.

O professor deve discutir especialmente a variação de pressão do gás no centro do tubo. O comportamento das camadas de ar adjacentes a ela é destacado nas figuras II.4 e II.5. Elas apresentam, respectivamente, a compressão e a rarefação do ar nesta região.

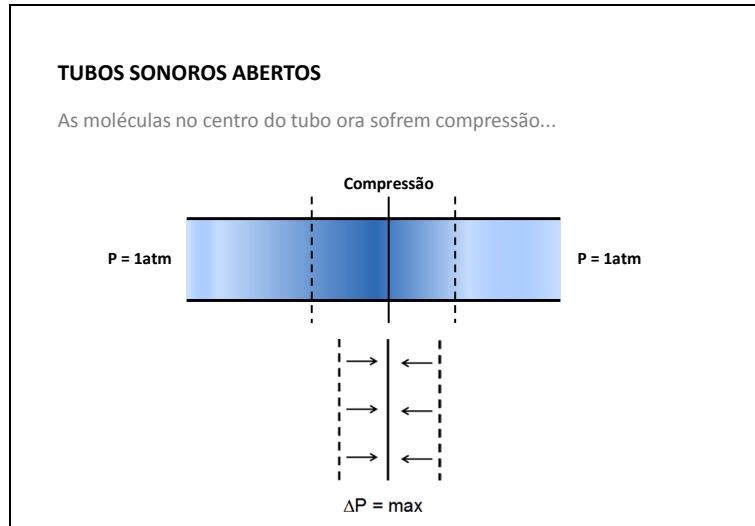


Figura II.4 1° harmônico do tubo aberto: compressão do ar no centro do tubo.

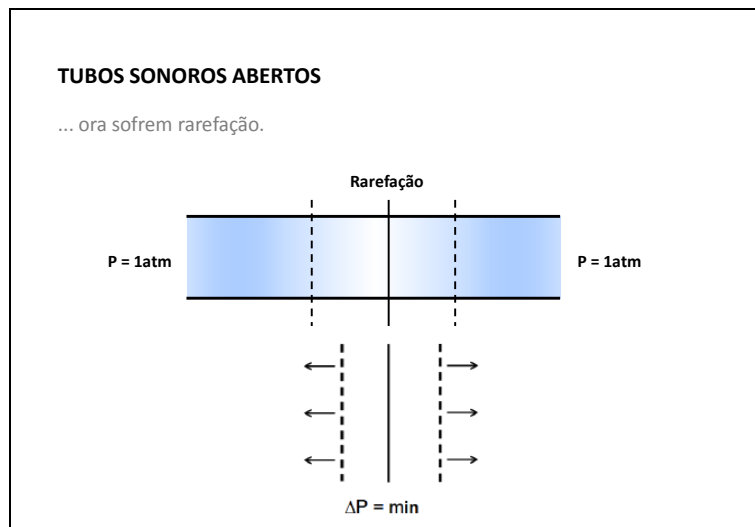


Figura II.5 1° harmônico do tubo aberto: rarefação do ar no centro do tubo.

A seguir, o professor deve associar a intensidade da cor no diagrama da figura II.3 com o gráfico da pressão em função da posição da figura II.6. Isto é particularmente importante porque a visualização das oscilações longitudinais está sendo representada como uma amplitude de vibração na direção

transversal. Como aponta a literatura, os estudantes têm dificuldade para compreender esta transposição. De fato, uma leitura frequentemente equivocada deste gráfico leva-os a interpretar o som como uma onda transversal.

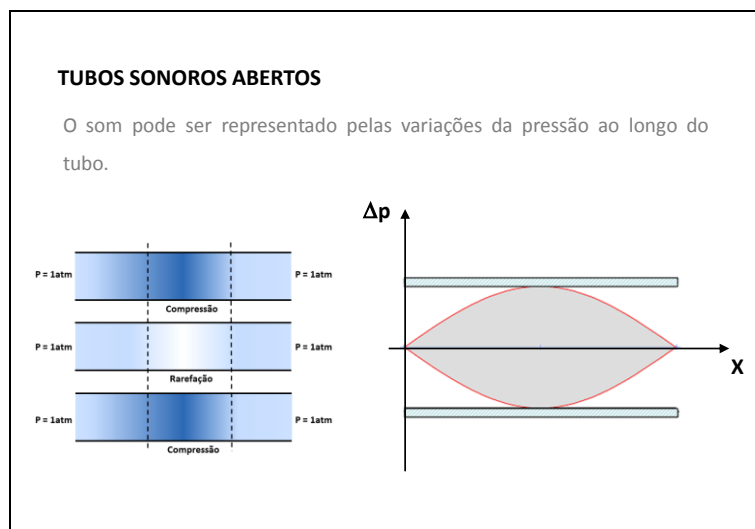


Figura II.6 1º harmônico do tubo aberto: relação entre as variações de pressão e o gráfico da pressão em função da posição ao longo do tubo.

A onda de pressão deve ser destacada como uma possível representação do som, como na figura II.7.

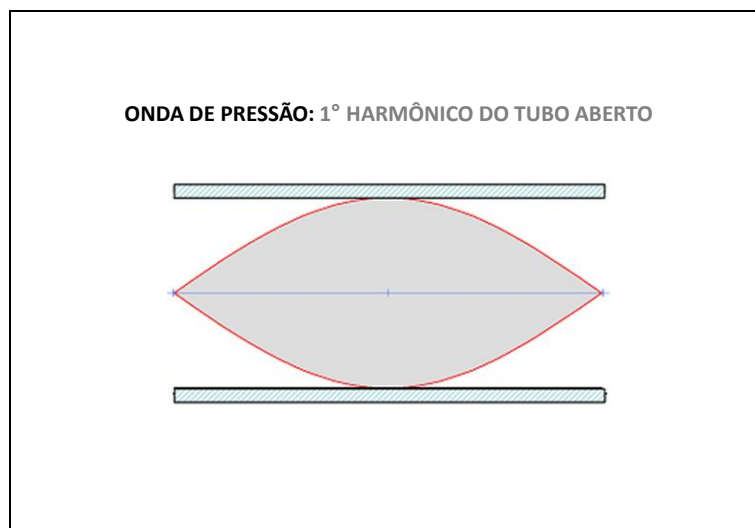


Figura II.7 1º harmônico do tubo aberto: onda de pressão.

Após abordar o som como uma onda de pressão, o professor deve destacar que há outro modo de representá-lo. Ele deve então discutir o deslocamento

das moléculas ao longo do tubo. A figura II.8 caracteriza a velocidade das moléculas em seu interior. As moléculas do centro ficam, em média, paradas. Na boca do tubo, as moléculas oscilam com amplitude máxima.

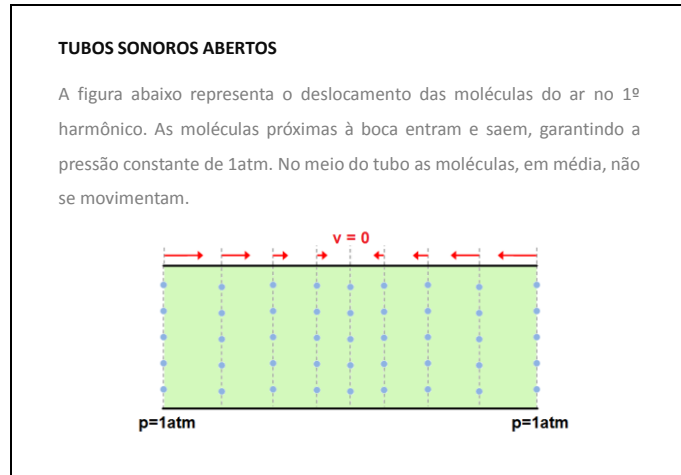


Figura II.8 Representação do deslocamento das moléculas no interior do tubo sonoro aberto.

A figura II.9 possibilita a comparação entre a figura II.8 e o gráfico do deslocamento das moléculas em função da posição no tubo. Novamente as oscilações longitudinais do som são representadas como amplitudes de oscilação transversais.

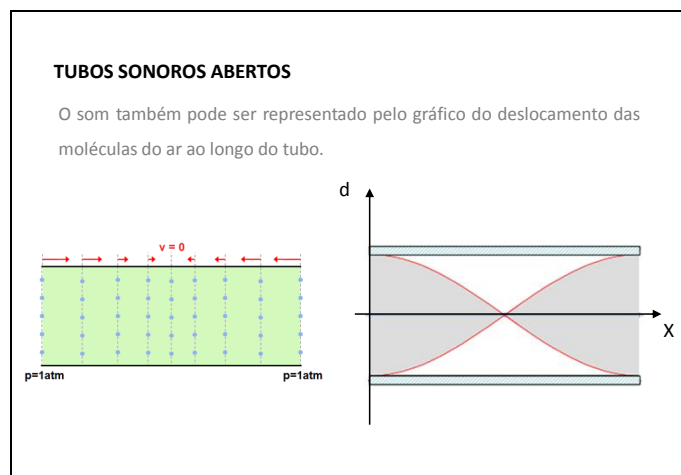


Figura II.9 1º harmônico do tubo aberto: relação entre o deslocamento longitudinal das moléculas e o gráfico do deslocamento em função da posição ao longo do tubo.

A figura II.10 destaca o gráfico do deslocamento em função da posição.

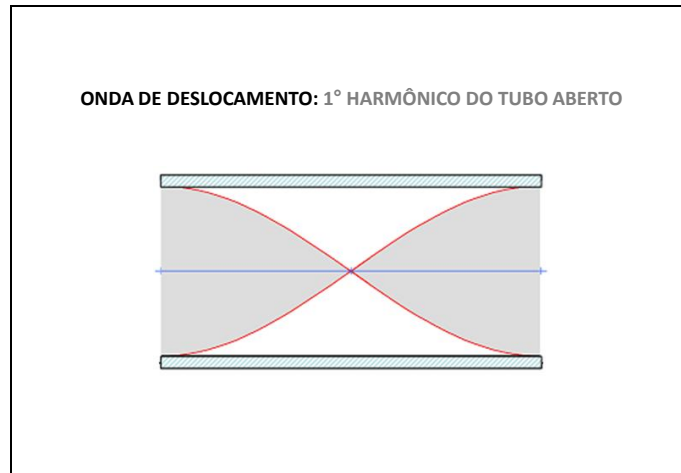


Figura II.10 1° harmônico do tubo aberto: onda de deslocamento.

As duas representações do som devem ser comparadas explicitamente, como na figura II.11. Também está disponível no site do Mestrado Profissional em Ensino de Física (http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico.html), do IF-UFRJ, e no portal de compartilhamento de vídeos YouTube (<http://www.youtube.com/watch?v=xz3sIGyRAj8>), um pequeno vídeo que ilustra as vibrações das moléculas no 1° harmônico. Ele pretende facilitar a sequência de discussões apresentadas acima com um material de maior apelo visual.

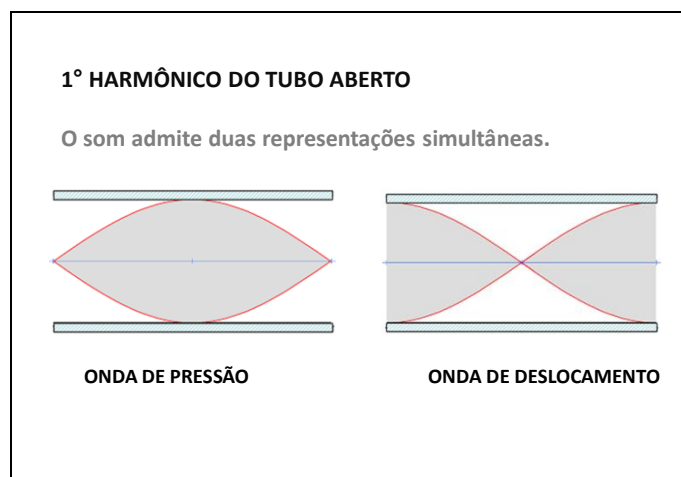


Figura II.11 1° harmônico do tubo aberto: comparação entre a representação do som como onda de pressão e de deslocamento.

Neste momento o professor pode realizar a análise matemática dos modos normais nos tubos sonoros. A figura II.12 mostra os três primeiros modos de

vibração do tubo aberto. A figura II.13 mostra a relação entre o comprimento de onda λ de cada modo normal e o comprimento L do tubo. Nestas duas figuras, as ondas de pressão e de deslocamento são evidenciadas.

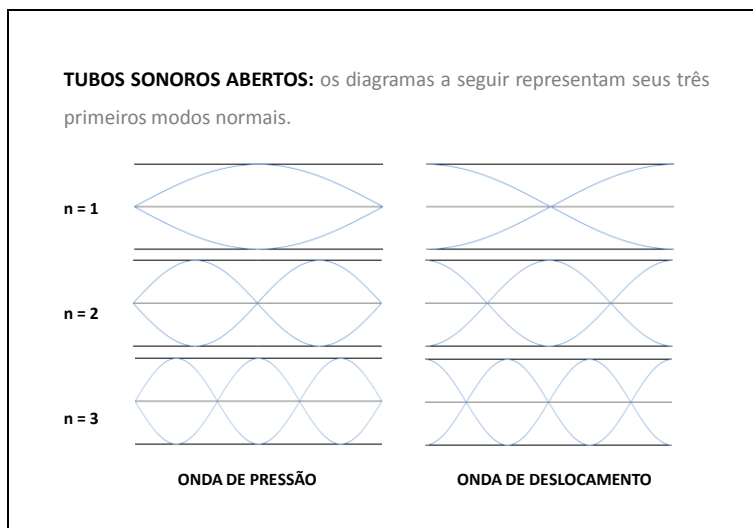


Figura II.12 Acima, ondas de pressão e deslocamento correspondentes aos três primeiros modos normais do tubo aberto.

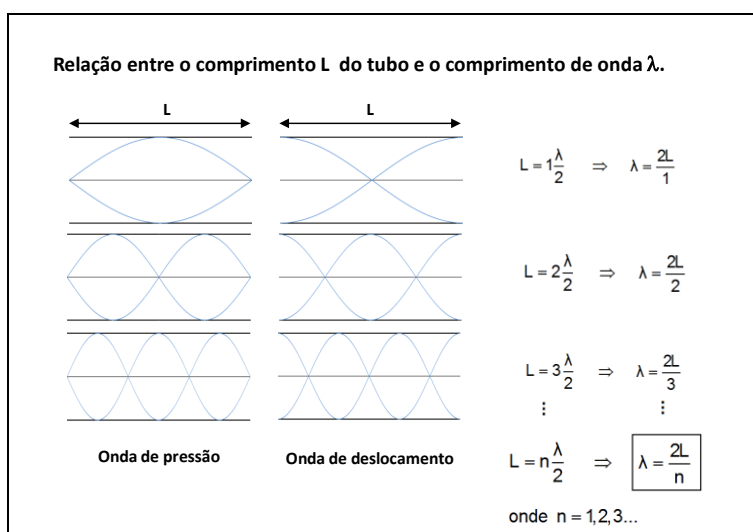


Figura II.13 Acima, relação entre o comprimento de onda λ e o comprimento L do tubo aberto.

A equação das frequências de ressonância do tubo aberto deve então ser demonstrada, como na figura II.14.

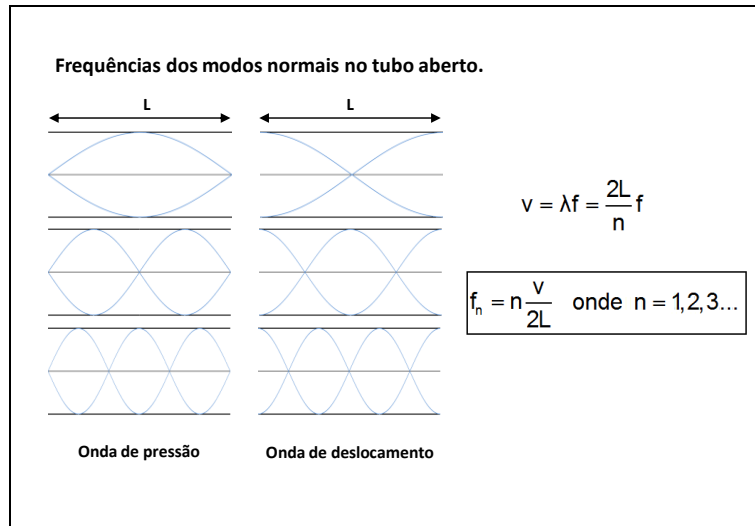


Figura II.14 Equação para o cálculo das frequências dos modos normais do tubo aberto.

Todas as discussões anteriores devem culminar na pergunta chave: **onde é possível ouvir som no interior de um tubo sonoro?** Em outras, palavras, qual é a relação entre a representação do som como onda de pressão, como onda de deslocamento e o sentido da audição (figura II.15)?

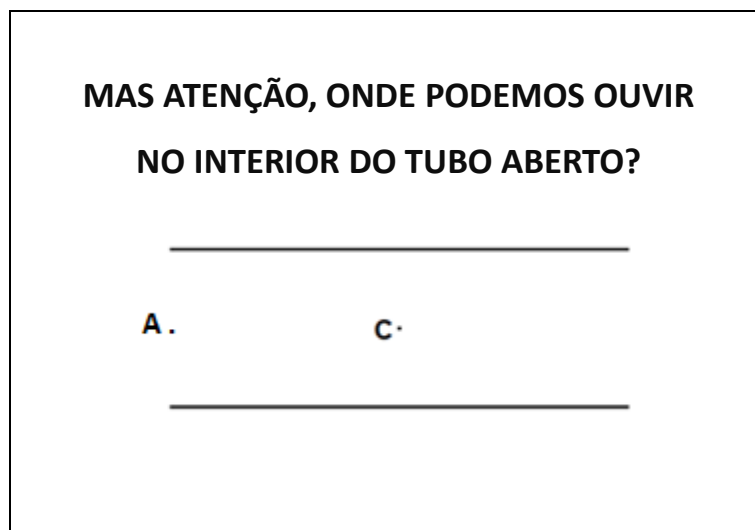


Figura II.15 O professor deve explorar em que pontos há som audível.

O professor deve chamar a atenção para o fato de que as duas representações da figura II.16 são aparentemente conflitantes: onde uma onda é máxima/mínima a outra é nula. Nesta etapa, o professor deve explorar todas as hipóteses que os alunos puderem levantar, talvez relacionando-as no quadro ou pedindo que descrevam suas ideias em folha separada.



Figura II.16 Após a discussão sobre a dualidade na representação das ondas sonoras, o professor deve explorar as hipóteses dos alunos sobre os locais onde existe som audível. Há um aparente paradoxo aparente: os diagramas sugerem respostas contraditórias.

Após ter explorado as concepções dos alunos, o professor pode provocá-los a imaginar um modo de resolver a dúvida sobre o local onde há som audível. Em termos mais gerais, a questão é: ouvimos a variação da pressão ou o deslocamento do ar? Talvez alguns deles sugiram a realização de um experimento, caso contrário o próprio professor deve fazê-lo. Neste momento, o aparato experimental pode ser introduzido e o papel do microfone como um aparelho análogo ao ouvido humano deve ser destacado. O apêndice B (Mapeando ondas sonoras num tubo) faz uma descrição sucinta dos materiais e procedimentos experimentais da atividade (figura II.17).

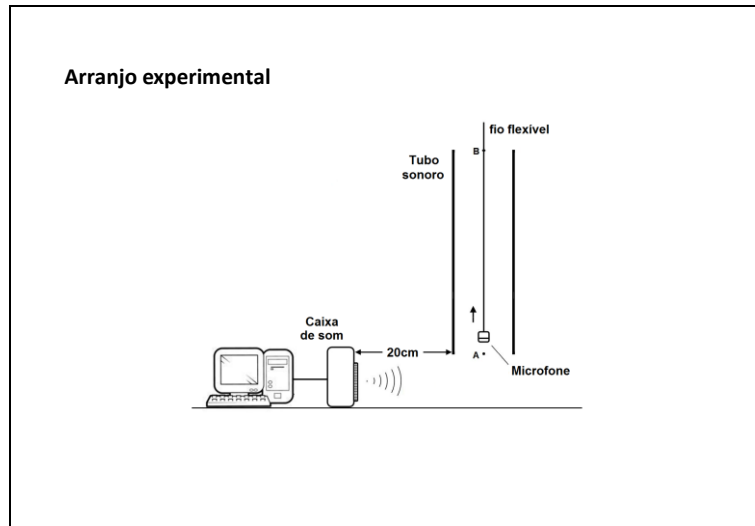


Figura II.17 Montagem experimental.

É importante que o experimento seja discutido como o critério mais adequado para a elucidação da questão apresentada. Deste modo, os estudantes poderão resolver um problema real a partir de suas próprias atividades práticas. Os resultados experimentais típicos para os três primeiros harmônicos de um tubo aberto são mostrados na figura II.18.

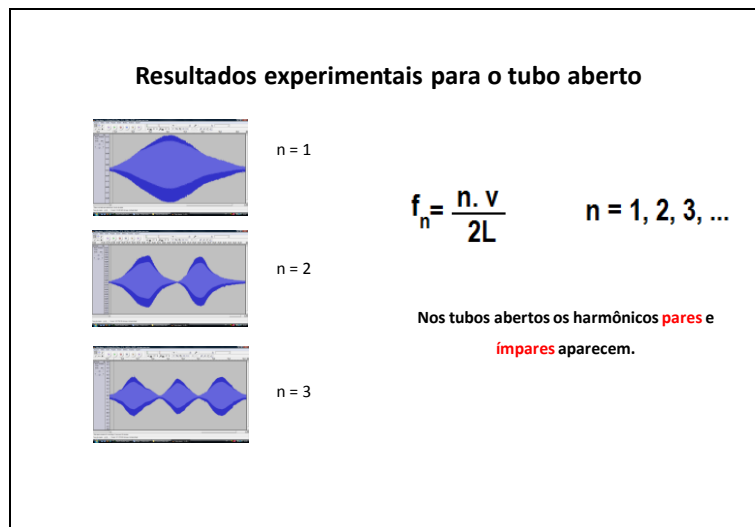


Figura II.18 Tubo sonoro aberto: resultados da medida da intensidade sonora para os três primeiros modos normais.

Por último, após a realização do experimento, mais uma vez o professor deve provocar os alunos para que relacionem os diagramas de pressão e de deslocamento estudados com os resultados empíricos obtidos (figura II.19).

Além de haver uma semelhança notável entre as ondas de pressão e estes resultados, é muito importante que o professor e os alunos ouçam o som registrado pelo microfone. A variação da intensidade sonora é muito pronunciada e provavelmente chamará a atenção de todos.

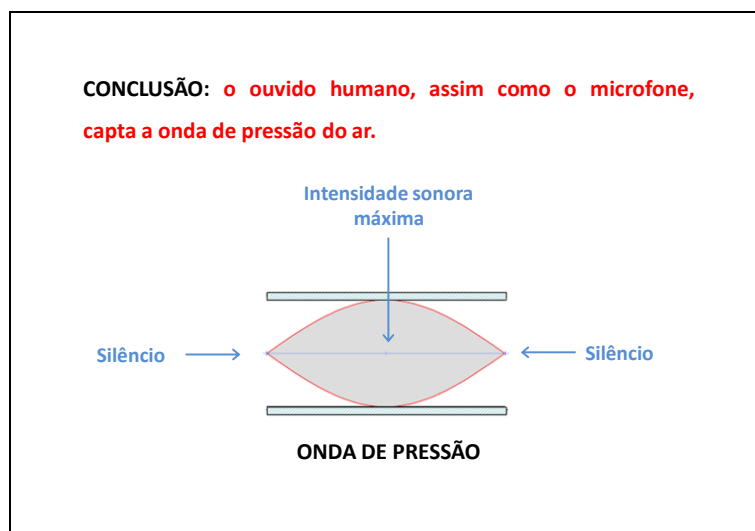


Figura II.19 Relação entre o diagrama de pressão e a intensidade do som audível.

A comparação entre as previsões dos estudantes e os dados experimentais é fundamental para o entendimento das múltiplas representações do som e para que consigam estabelecer a relação correta entre a teoria ondulatória e a intensidade do som audível.

Nos slides disponibilizados para os professores também se encontra a discussão sobre os tubos sonoros fechados. Sua abordagem pode ser feita de modo análogo a que foi apresentada neste roteiro para o tubo aberto: exposição conceitual das ondas de pressão e deslocamento; comparação entre estas duas representações; análise matemática dos modos normais; questionamento da relação entre as ondas de pressão, deslocamento e o sentido da audição; atividade experimental; análise dos resultados e comparação com os argumentos prévios dos estudantes.