



**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.

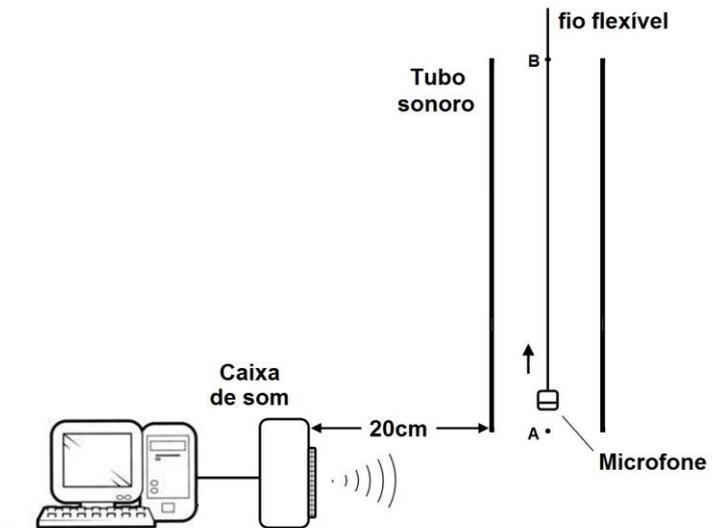


Figura I.1 Montagem do experimento.

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.

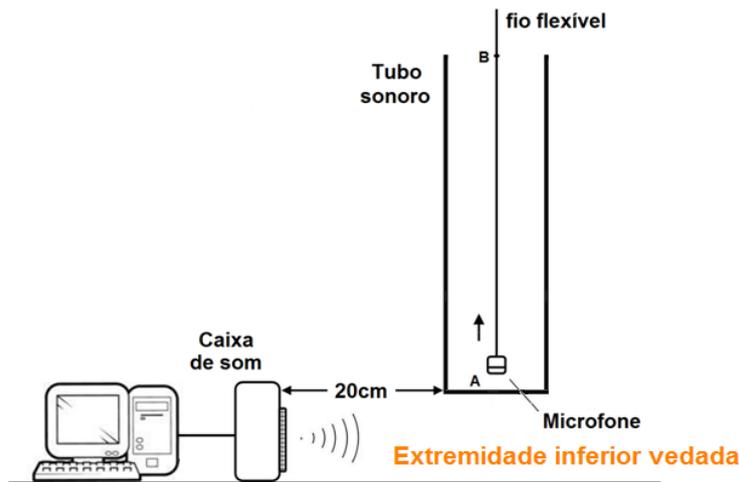
#### B. Tubo sonoro fechado

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).



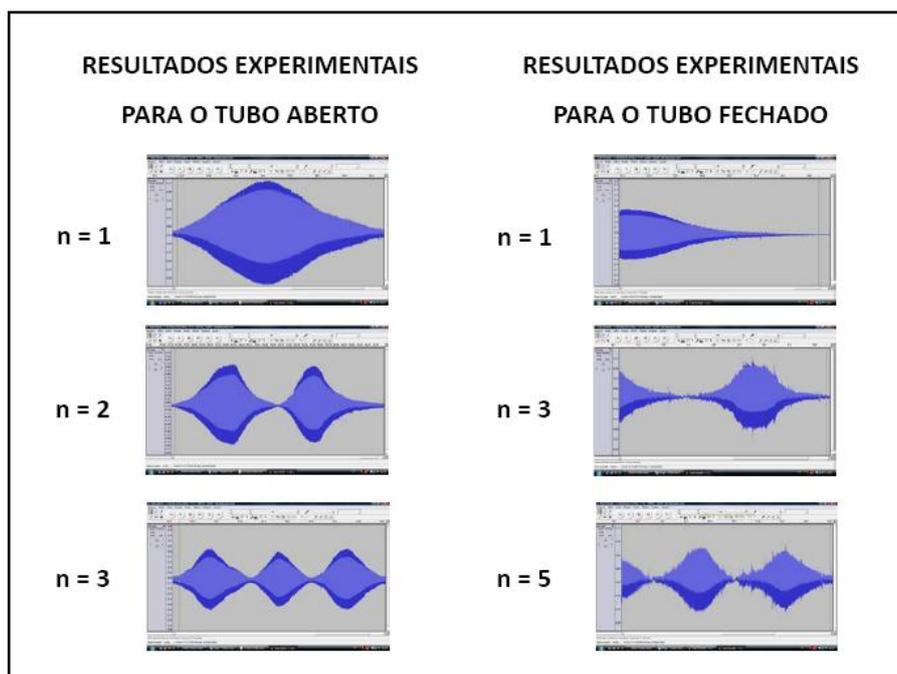
**Figura I.2** Arranjo experimental para o tubo fechado.

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

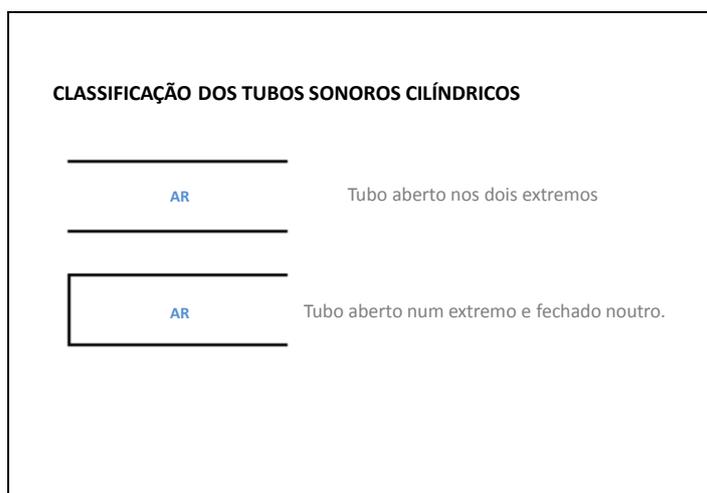
Através dessa proposta de ensino-aprendizagem pretendemos que os estudantes compreendam que:

- 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  $90^\circ$  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](http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico.html)).

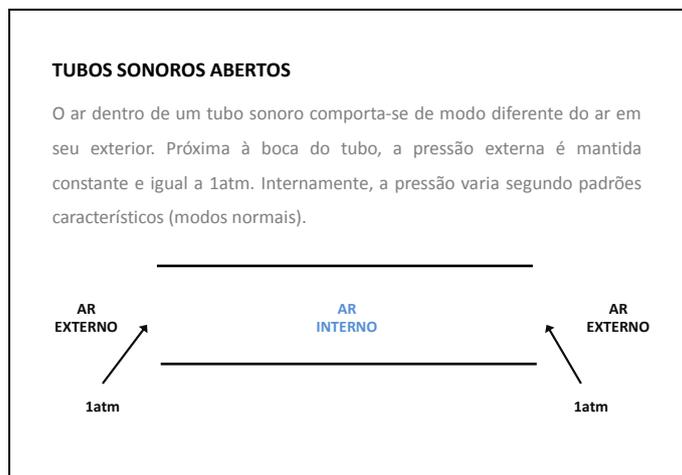
### II.2 Abordagem

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



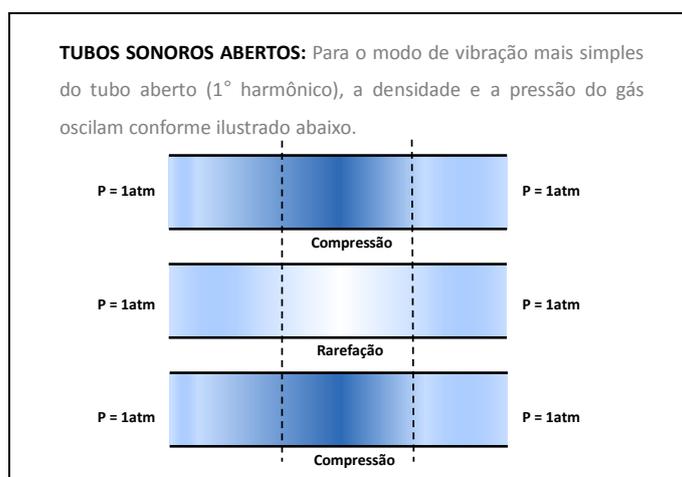
**Figura II.1** Apresentação do tubo cilíndrico aberto e fechado.

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.



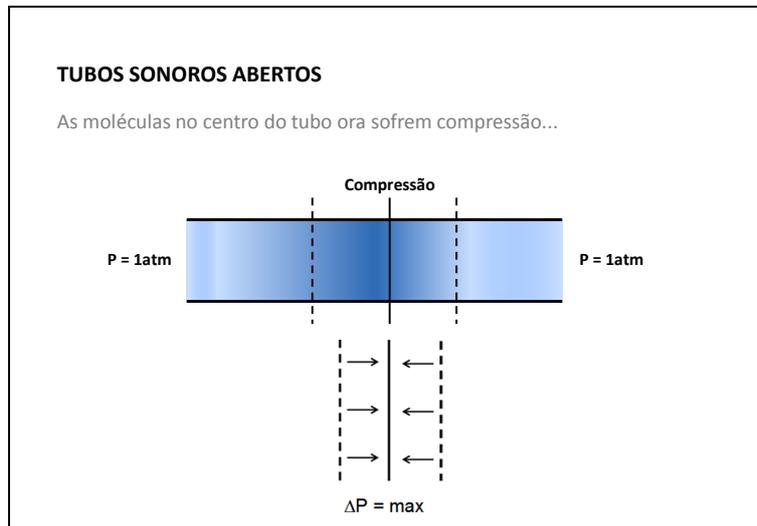
**Figura II.2** Condição de contorno associada à pressão do ar ao longo de um tubo sonoro aberto.

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.

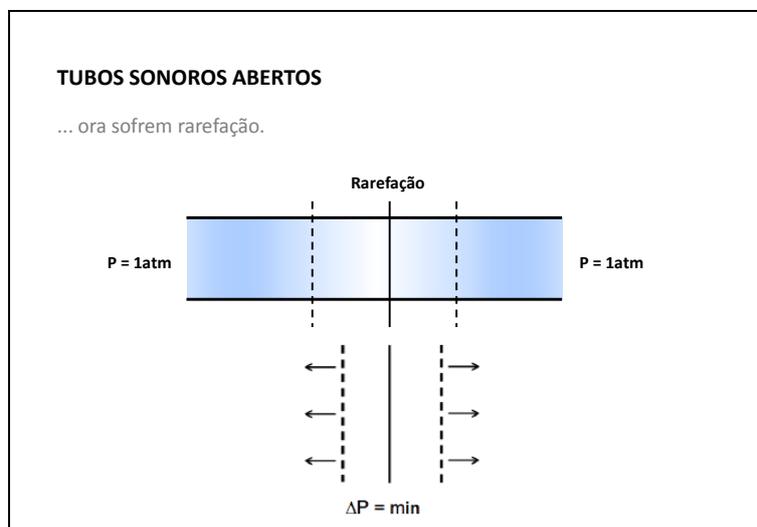


**Figura II.3** 1° harmônico no tubo aberto: a intensidade da cor está associada com a pressão e a densidade do ar no tubo.

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.



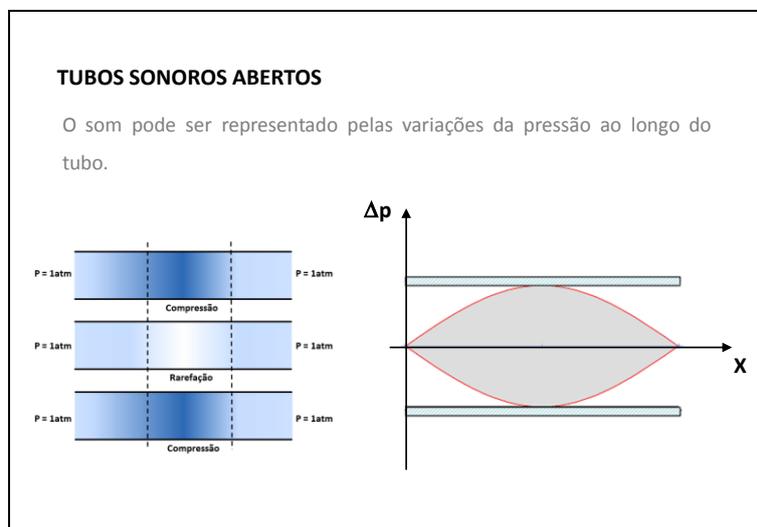
**Figura II.4** 1° harmônico do tubo aberto: compressão do ar no centro do tubo.



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

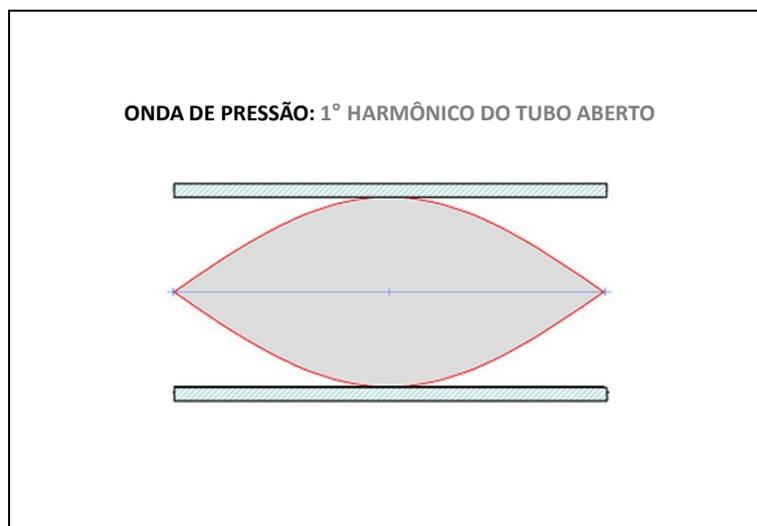
A seguir, o professor deve associar a intensidade da cor no diagrama da figura II.3 com o gráfico da pressão em função da posição da figura II.6. Isto é particularmente importante porque a visualização das oscilações longitudinais está sendo representada como uma amplitude de vibração na direção

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.

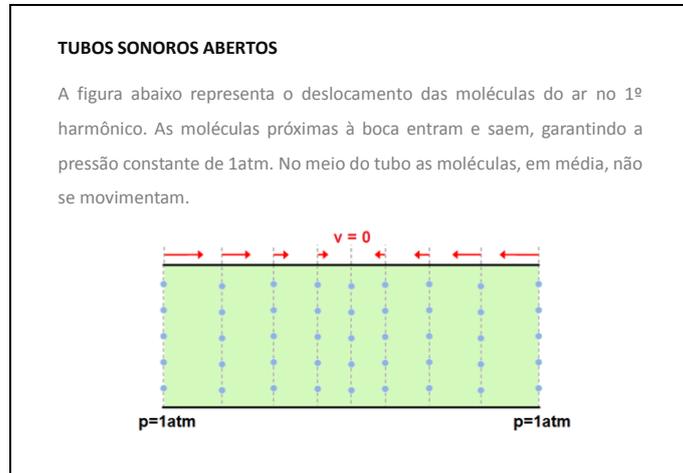
A onda de pressão deve ser destacada como uma possível representação do som, como na figura II.7.



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

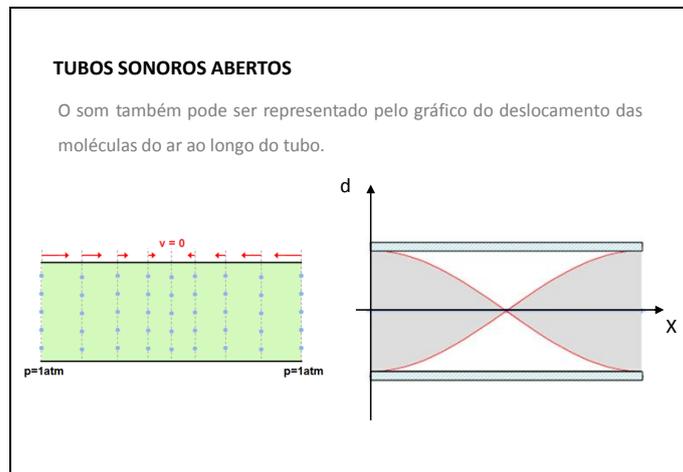
Após abordar o som como uma onda de pressão, o professor deve destacar que há outro modo de representá-lo. Ele deve então discutir o deslocamento

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.



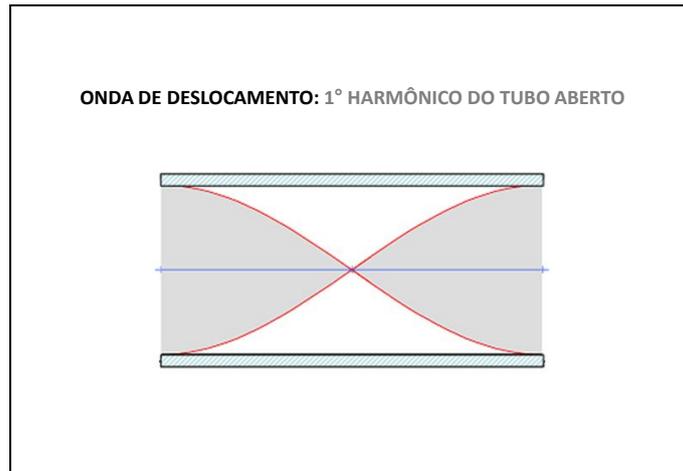
**Figura II.8** Representação do deslocamento das moléculas no interior do tubo sonoro aberto.

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.



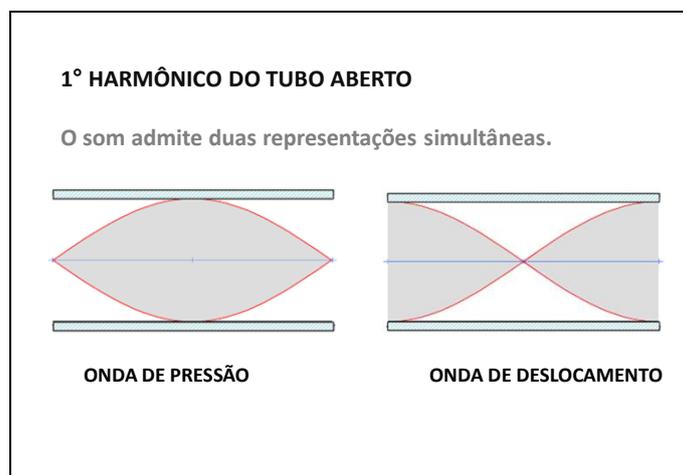
**Figura II.9** 1º harmônico do tubo aberto: relação entre o deslocamento longitudinal das moléculas e o gráfico do deslocamento em função da posição ao longo do tubo.

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



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

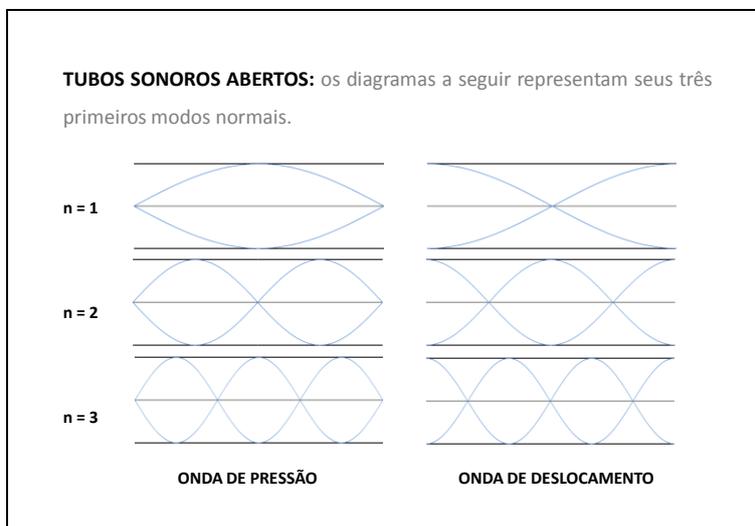
As duas representações do som devem ser comparadas explicitamente, como na figura II.11. Também está disponível no site do Mestrado Profissional em Ensino de Física ([http://www.if.ufrj.br/~pef/producao\\_academica/material\\_didatico.html](http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico.html)), 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.



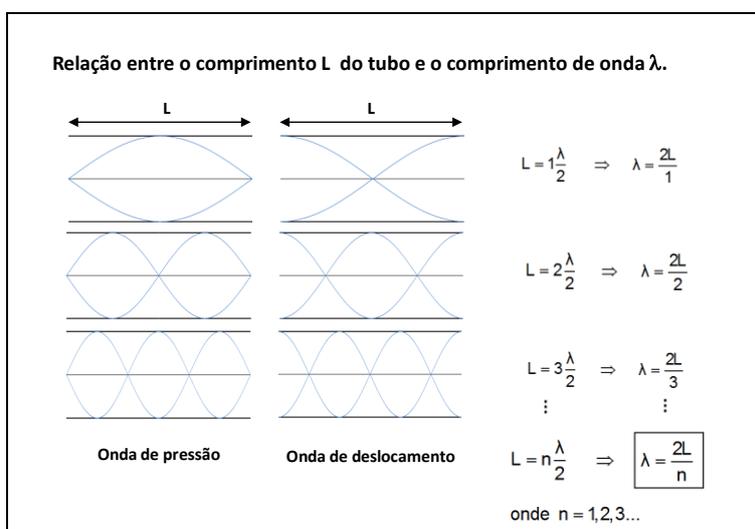
**Figura II.11** 1° harmônico do tubo aberto: comparação entre a representação do som como onda de pressão e de deslocamento.

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  $\lambda$  de cada modo normal e o comprimento L do tubo. Nestas duas figuras, as ondas de pressão e de deslocamento são evidenciadas.

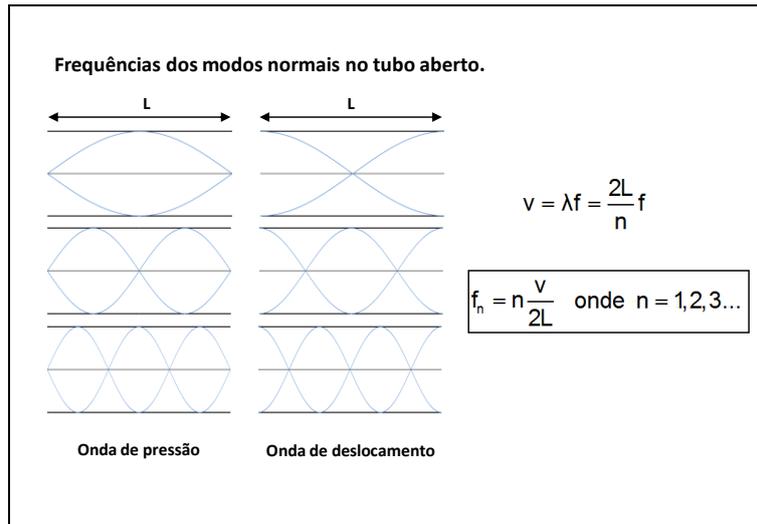


**Figura II.12** Acima, ondas de pressão e deslocamento correspondentes aos três primeiros modos normais do tubo aberto.



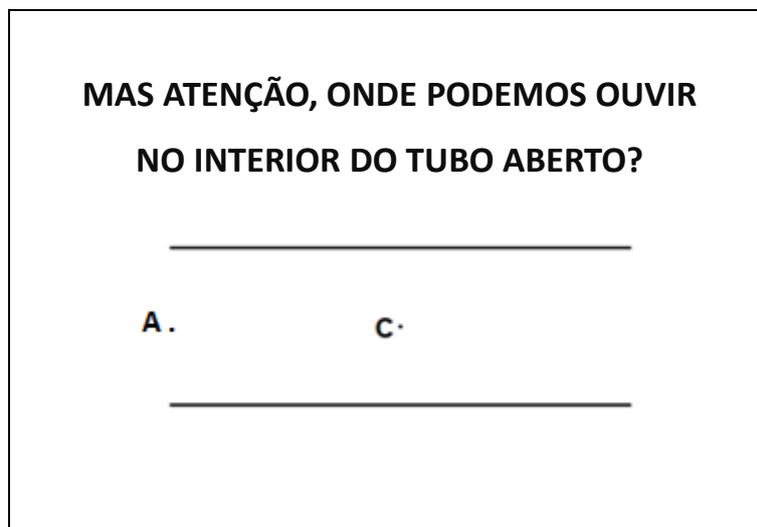
**Figura II.13** Acima, relação entre o comprimento de onda  $\lambda$  e o comprimento L do tubo aberto.

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



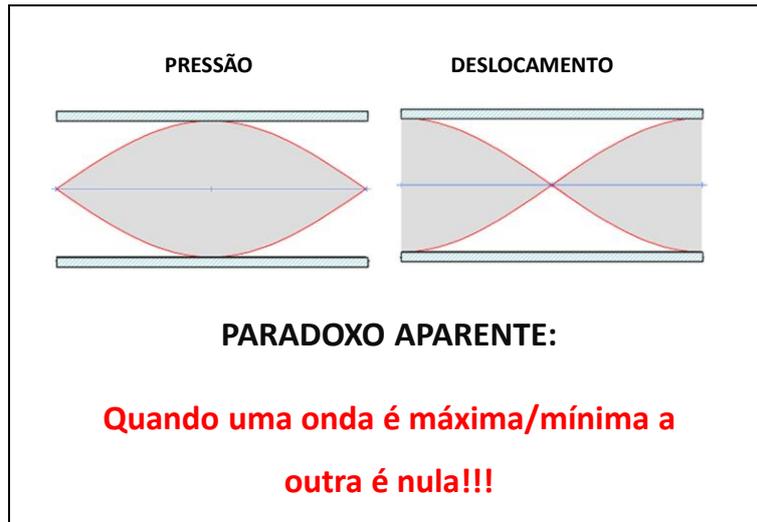
**Figura II.14** Equação para o cálculo das frequências dos modos normais do tubo aberto.

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)?



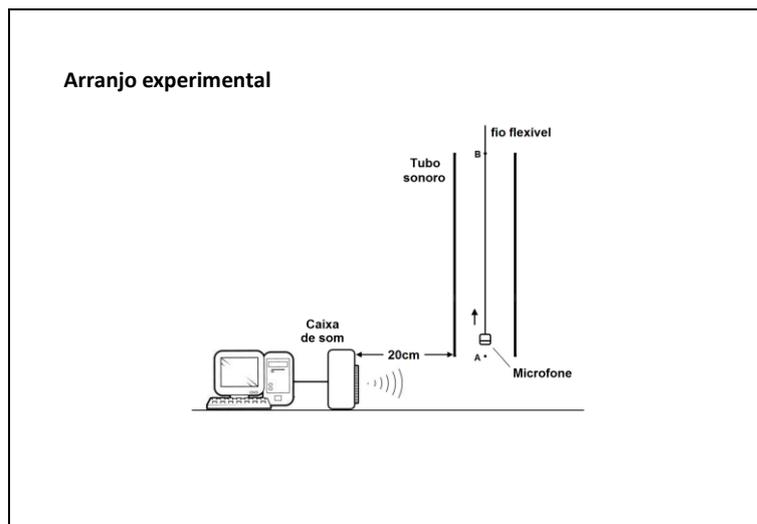
**Figura II.15** O professor deve explorar em que pontos há som audível.

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.



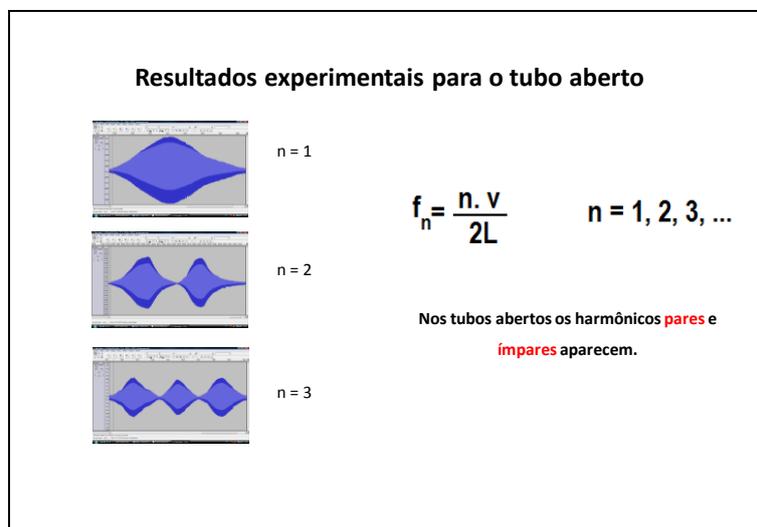
**Figura II.16** Após a discussão sobre a dualidade na representação das ondas sonoras, o professor deve explorar as hipóteses dos alunos sobre os locais onde existe som audível. Há um aparente paradoxo aparente: os diagramas sugerem respostas contraditórias.

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.

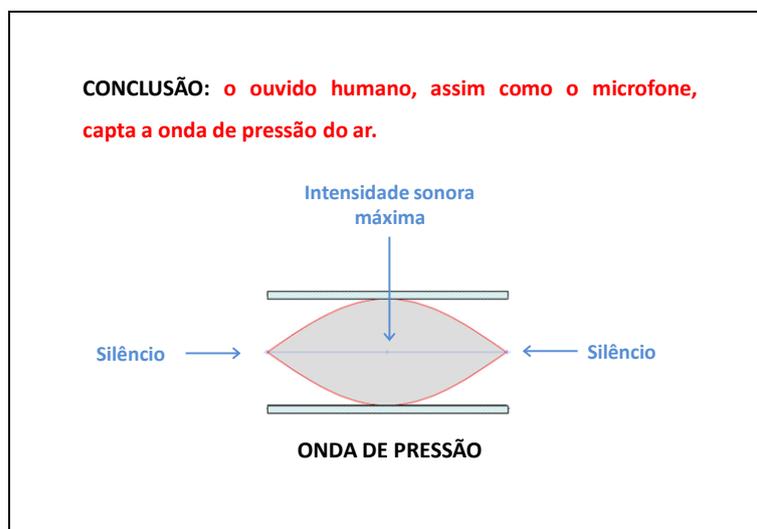
É importante que o experimento seja discutido como o critério mais adequado para a elucidação da questão apresentada. Deste modo, os estudantes poderão resolver um problema real a partir de suas próprias atividades práticas. Os resultados experimentais típicos para os três primeiros harmônicos de um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