USP

FÍSICA EXPERIMENTAL 2 – ONDAS, FLUIDOS E TERMODINÂMICA

EXPERIÊNCIA 6 – TUBO DE RESSONÂNCIA (PÓ) – VELOCIDADE DO SOM NO AR

Objetivos

Estudar o fenômeno de ressonância e a produção de ondas estacionárias determinando-se a velocidade do som no ar.

Um experimento complementar será realizado concomitantemente a este, com o objetivo de se avaliar experimentalmente a equação dos gases ideais.

Introdução

Como já visto, quando uma onda sonora se propaga em um meio homogêneo, há uma relação entre o comprimento de onda **λ**, a freqüência **f** e a velocidade **v**, tal que:

$$v = \lambda\ f \qquad (1)$$

Logo, medindo-se o comprimento de onda de um som no ar, com freqüência conhecida, pode-se calcular a velocidade de propagação do mesmo.

Quando essas ondas estão confinadas em um tubo de vidro, por exemplo, as reflexões dessas nas extremidades fazem com que existam ondas deslocando-se em direções opostas que se superpõem. Em tubos sonoros existem certas freqüências para as quais a superposição provoca ondas estacionárias. No caso de um tubo com uma extremidade fechada, a primeira corresponde a um anti-nodo e a segunda a um nodo. Dessa forma, a relação entre o comprimento de um tubo e o comprimento da onda ressonante é dada por:

$$L = \frac{n\lambda}{4}\text{, para n = 1,3,5,7,....} \qquad (2)$$

sendo **L** o comprimento do tubo e **n** um número inteiro. Caso esse tubo esteja preenchido por pó de serragem, por exemplo, teremos pequenos montes formados devido à variação de pressão, sendo que um monte de pó sempre coincide com a extremidade aberta do tubo como na Fig. 1(a). Neste local, a pressão deve permanecer aproximadamente constante e igual à atmosférica, fazendo com que se acumule, ali, o pó usado na experiência. Para a extremidade fechada, a onda é sempre refletida, acontecendo exatamente como em uma corda vibrante presa a um anteparo, ficando como a Fig. 1(b).

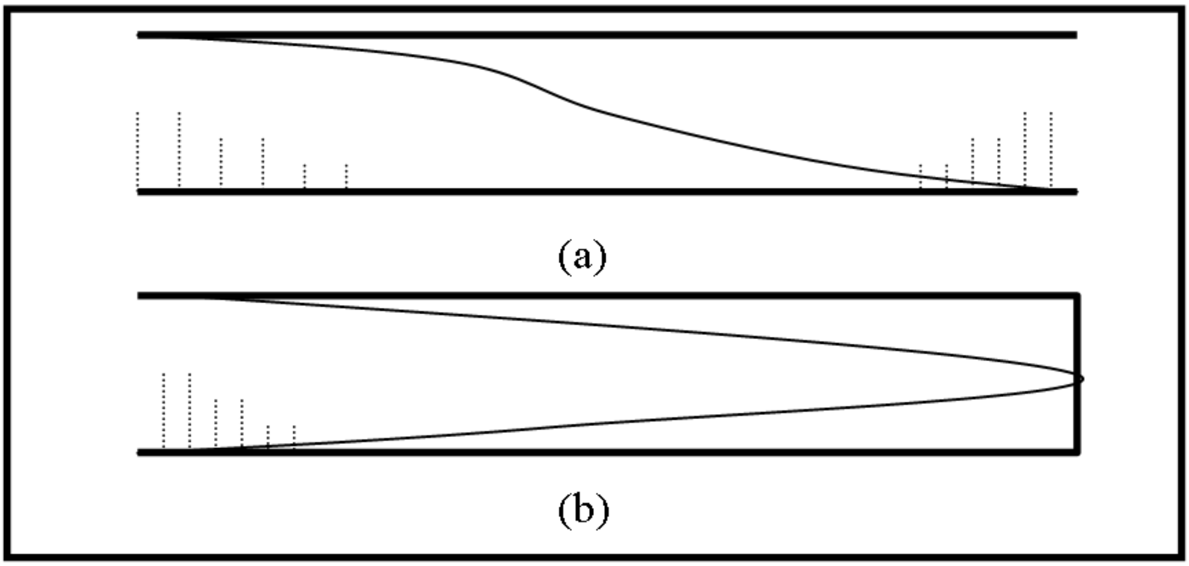

Figura 1. Formação em um tubo ressonante preenchido com pó.

A partir dessa observação, podemos chegar a equações que descrevem esses comportamentos. Para um tubo com um lado aberto e o outro fechado, nota-se que a equação 2 é respeitada e os comprimentos de onda são múltiplos inteiros de λ / 4 (Fig. 1(b)). Nesse caso, os números **n** são sempre ímpares (explique no relatório porque isso é verdade).

Para o tubo aberto em ambos os lados, o fator multiplicativo do comprimento de onda vem de λ/2 (Fig. 1(a)), o que leva à seguinte equação:

$$L = n\,\lambda\,/\,2 \qquad (3)$$

em que **L** é também o comprimento do tubo e **n** um número inteiro.

Outra relação que se deve conhecer para se obter a velocidade do som no ar, a qualquer temperatura é:

$$v_T = v_0\,(1 + \beta t)^{1/2} \qquad (4)$$

em que $\mathbf{v_T}$ e $\mathbf{v_0}$ ($\mathbf{v_0}$ = 332 m/s) são respectivamente a velocidade do som no ar em **t** ºC e 0ºC e $\boldsymbol{\beta}$ = 1 / 273 [$ºC^{-1}$].

<u>Lista de Material</u>

Tubo de vidro, suportes de fixação, pó de serragem, pá para ajuste do pó dentro do tubo, gerador de frequências, frequencímetro, alto-falante de 30W, êmbolo, trena, termômetro.

Procedimento Experimental

a) Monte o equipamento como na Figura 2, colocando o tubo transparente (lâmpada) no suporte e posicionando o alto-falante em uma das extremidades do tubo sem o tocar. O alto-falante é ligado a um frequencímetro de frequência ajustável ligado a uma fonte sonora de intensidade sonora ajustável.

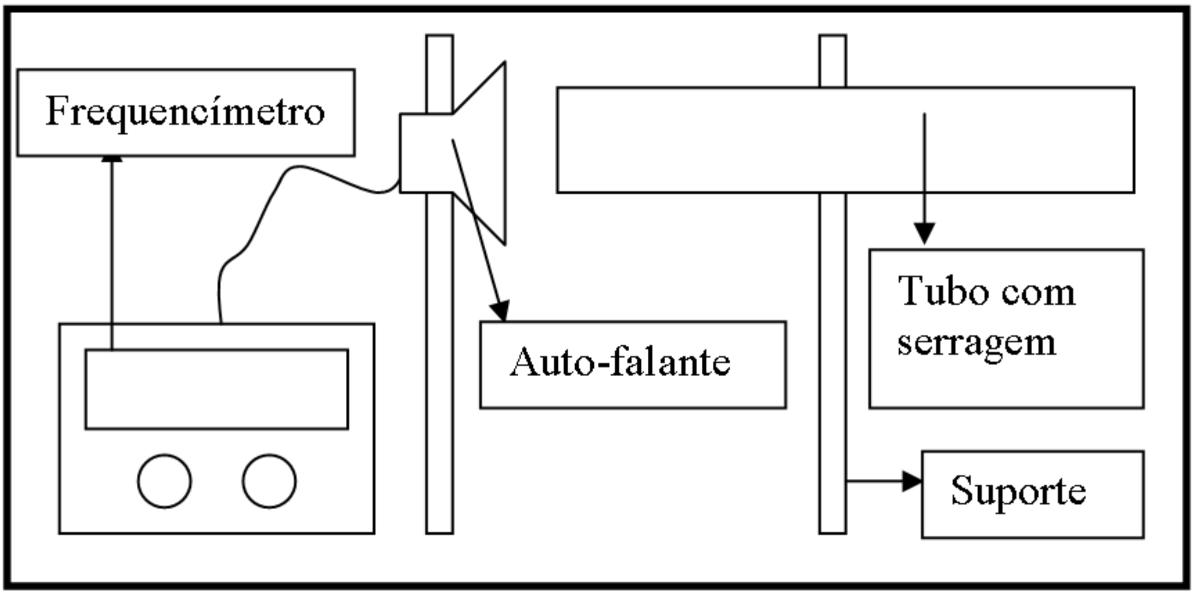

Figura 2. Montagem experimental.

b) Coloque com a ajuda da pá de cabo longo um filete de pó de serragem dentro do tubo, de maneira que ele se deposite no fundo com uma largura de aproximadamente 0,5 cm e altura de 0,1 cm.

c) Faça uma rotação no tubo em torno de seu eixo maior a fim de espalhar o pó pelas paredes do tubo (isso é importante para deixar o pó sensível às variações de pressão internas no tubo, evidenciando os efeitos do experimento).

d) Anote a temperatura ambiente com a ajuda de um termômetro e meça o tubo com a ajuda de uma trena.

e) Com as duas extremidades do tudo abertas, procure pela freqüência em que o pó forme ondas estacionárias em sua amplitude máxima (o fato das ondas serem estáticas é para se evitar o risco de batimentos, que ocorrem em freqüências fora da ressonância). Anote a freqüência e o comprimento de onda (a distância entre dois picos da onda de pó corresponde a meio comprimento de onda). Utilize 4 freqüências e duas potências diferentes (amplificações). A cada nova ressonância o tubo deve ser girado novamente para que não se confunda as marcas deixadas com as novas produzidas. Localize o máximo de nodos que for possível.

f) Repita o mesmo procedimento anterior, mas agora com uma das extremidades do tubo fechadas. Para este item utilize apenas uma potência (amplificação).

g) Fixe a freqüência de ressonância do item anterior a mais próxima de 500 Hz possível. Usando o êmbolo comece a diminuir o tamanho do tubo procurando também as ressonâncias, anote então o comprimento $\mathbf{L}_i$ do tubo, a quantidade **n** e os comprimentos de onda.

h) Dados aproximados:

Do Kit original: Comprimento do tubo grande = 0,857 m; Raio da extremidade dos tubos = 0,015 m; Freqüências limites dos aparelhos: mínima = 150 Hz, máxima = 2638 Hz.

Do protótipo desenvolvido: Comprimento do tubo (lâmpada) =1,15 m; Raio da extremidade dos tubos = 0,016 m; Freqüências limites dos aparelhos: mínima = 0 Hz, máxima 1 GHz.

Análise dos dados

a) a partir dos dados originais para o tubo aberto e fechado com comprimento fixo, faça gráficos de $\boldsymbol{\lambda}$ em função de $1/\mathbf{f}$ e determine a velocidade do som no ar. Discuta os possíveis efeitos de bordas e determine essa velocidade da melhor forma possível.

b) a partir dos dados originais do experimento com a variação do comprimento do tubo, faça um gráfico de **L** em função de **n** e determine a velocidade do som no ar.

c) a partir dos três experimentos determine, da melhor forma possível, a velocidade do som no ar.

d) utilizando a expressão (4), determine a velocidade do som a 0°C e compare essas velocidades com aquelas obtidas no experimento anterior.

e) Qual é origem física da dependência da velocidade com a raiz quadrada da temperatura (equação 4)?

Experimento Complementar:

Comprovação experimental da lei dos gases ideais

Objetivo

Avaliar experimentalmente a validade da equação dos gases ideais (PV=nRT), determinar a constante dos gases (**R**) e a pressão atmosférica (**P_0**) a partir da mesma equação.

Introdução

Um gás ideal é aquele cujo comportamento pode ser descrito com precisão pela equação:

$$PV = nRT \tag{1}$$

Sendo a pressão (**P**), volume (**V**), número de moles (**n**) e a temperatura (**T**) do sistema definidos. **R** é a constante dos gases ideais.

Este modelo é uma idealização que funciona de maneira mais adequada quando as distâncias entre as moléculas são muito grandes, i. e., em pressões muito pequenas e temperaturas elevadas. Para valores de temperatura entre 0 ºC e 30ºC e pressões próximas a 1 atm (pressão ambiente), esta equação funciona razoavelmente bem e, por este motivo, a estudaremos experimentalmente nestas condições.

Supondo que o ar ambiente, composto aproximadamente de 78% de N_2, 20% de O_2 e 2% de outros gases como argônio e dióxido de carbono, em temperatura de 25ºC (273,15+25=299,15 K) e pressão de 1 atm ($1{,}013 \times 10^5$Pa) se comporte como um gás ideal.

Para um sistema como o apresentado na Figura 3 onde temos um tubo de vidro com uma extremidade aberta e outra fechada, preenchido parcialmente por água, podemos determinar o volume de ar contido na extremidade fechada do volume do cilindro por:

$$V = A \cdot H = (\pi r^2) \cdot H \tag{2}$$

Sendo (**A**) a área da base e (**H**) a altura da coluna de ar levemente comprimida pela coluna de água e continuamente comprimida com o aumento desta coluna de água. Para calcular a área da base deste cilindro podemos utilizar o diâmetro interno do tubo de vidro, que já foi determinado experimentalmente como 11 mm.

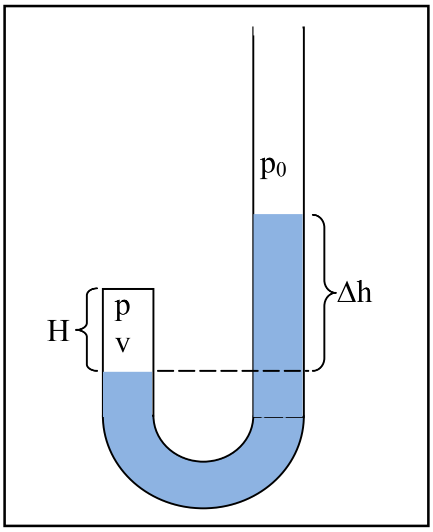

Figura 3 – Desenho correspondente ao tubo de vidro com uma extremidade aberta e outra fechada.

A pressão (**P**) no interior deste volume de ar está relacionada com a pressão na extremidade aberta (**P_0**), pressão atmosférica, e a coluna de água da seguinte forma:

$$P = P_0 + \rho g \Delta h \qquad (3)$$

onde **ρ** é a densidade da água (1000 kg/m^3), **g** a gravidade (9,8 m/s^2) e **Δh** a diferença de altura entre os dois pontos onde se associam as duas pressões, i. e., a diferença de altura entre os dois níveis da água.

Sabe-se da literatura que a pressão atmosférica é próxima de 1 atm. Contudo, neste experimento deixaremos esta variável como uma incógnita, pois poderemos determiná-la experimentalmente considerando que nosso ar seja um gás ideal.

Relacionando as três equações anteriores teremos:

$$PV = nRT \quad \Longrightarrow \quad (P_0 + \rho g \Delta h)\cdot(A \cdot H) = nRT$$

$$P_0 AH + \rho g \Delta h AH = nRT \quad \Longrightarrow$$

$$\rho g \Delta h AH = nRT - P_0 AH$$

$$\Delta h = \frac{nRT}{\rho g A}\frac{1}{H} - \frac{P_0}{\rho g} \qquad (4)$$

Com esta equação podemos relacionar o aumento da coluna de água (Δh) com a diminuição da altura da coluna de ar (**H**). Como será apresentado na metodologia, sugere-se reproduzir um gráfico **Δh** versus 1/**H**, pois assim os resultados experimentais terão uma dependência linear e será possível conduzir um ajuste linear. Após este ajuste linear é possível determinar o coeficiente angular e linear da reta ajustada e associar os coeficientes conforme segue:

$$Coeficiente\ angular = \frac{nRT}{\rho g A} \qquad Coeficiente\ \text{linear} = \frac{P_0}{\rho g}$$

Sabendo as demais constantes pode-se determinar experimentalmente o valor da constante dos gases ideais pela primeira equação e a pressão atmosférica pela segunda equação. Após esta breve introdução seguiremos com nosso experimento.

<u>Lista de Materiais</u>

Água, proveta, tubo de vidro em formato de "U" com uma extremidade fechada e outra aberta, trena, régua, caneta para marcação em vidro e termômetro.

<u>Procedimento Experimental</u>

Fixe o tubo de vidro numa base metálica utilizando garras metálicas apropriadas (Fig. 4).

Despeje um pouco de água para preencher apenas a região inferior do tubo onde se encontra a dobra do vidro e que forme 2 níveis de água aproximadamente horizontais.

Determine a altura **H** que corresponde ao volume armazenado na alça fechada do tubo e determine a diferença de altura **Δh** que corresponde a diferença nos níveis de água entre a extremidade fechada e a extremidade aberta. Acompanhe pela Figura 3 a localização da altura (**H**) do ar preso na extremidade fechada e da diferença de altura **(Δh)** correspondente a diferença dos níveis de água. Anote estes valores na Tabela 1.

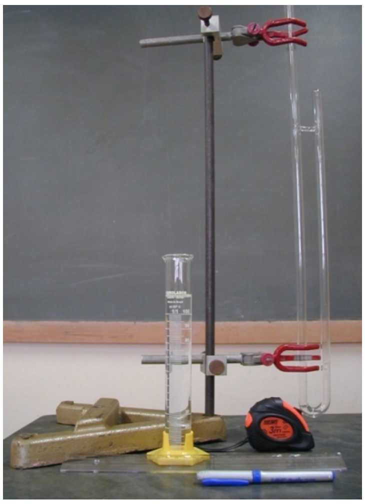

Figura 4 – Materiais utilizados para a comprovação experimental da lei dos gases ideais, com a determinação da constante dos gases e a pressão atmosférica do nosso ambiente.

Despeje mais um pouco de água e determine novamente **H** e **Δh**.

Repita este procedimento para obter no mínimo 6 medidas experimentais de **H** e **Δh**. Estime aproximadamente o acréscimo de água necessário para obter estas 6 medidas experimentais.

Anote a temperatura do ambiente, que será considerada como a temperatura do gás ideal confinado no tubo.

Tabela 1 – Valores experimentais da altura da coluna de ar e da coluna de água.

Medidas experimentais	1	2	3	4	5	6
H (cm) de ar						
Δh(cm) de água						
Temperatura (ºC) do gás						

<u>Análise dos dados</u>:

a) Calcule o número de moles de ar existente na extremidade fechada do tubo de vidro. Considere que houve condições normais de temperatura e pressão (CNTP; 0ºC e 1atm) e, portanto, 1 mol de moléculas de gás ideal ocupa 22,4 litros.

b) Faça um gráfico de **Δh** em função do inverso de **H**. Determine a equação da reta deste gráfico.

c) Utilizando o coeficiente angular da reta, determine a constante dos gases (**R**).

d) Utilizando o coeficiente linear da equação determine a pressão do ambiente ($\mathbf{P_0}$).

e) Sabe-se que a constante dos gases é **R** = 8,314 J/mol.K e que a pressão ambiente é $\mathbf{P_0}=1{,}01\times10^5$ Pa. Determine a incerteza experimental (%Erro) do nosso cálculo de **R** e $\mathbf{P_0}$.

f) Aponte os principais erros experimentais e aproximações que ocorreram neste experimento e que foram responsáveis pela divergência observada entre os valores experimentais e os valores encontrados na literatura.