



Francicleison Jando Sousa Pontes^{1,#} 

¹Escola de Ensino Médio em Tempo Integral Maria Conceição de Araújo, Acaraú, CE, Brasil.

Palavras-chave

velocidade do som
interferência em ondas sonoras
experimento

Resumo

O presente artigo descreve, de modo minucioso, a construção e a utilização de um interferômetro conhecido como trombone de Quincke, um aparato experimental idealizado para demonstrar a interferência entre ondas sonoras e determinar a velocidade do som no ar. O equipamento foi construído com materiais alternativos, como tubos e conexões de PVC e garrafa PET; e teve, como sensores, aparelhos celulares com aplicativos para emissão de frequência e captação de intensidade sonora. Os resultados obtidos para a velocidade do som no ar a partir do experimento proposto foram bastante satisfatórios, apresentando grande proximidade dos valores previstos em equações e apresentados na literatura.

1. Introdução

O som é uma onda mecânica que se propaga no ar com velocidade de aproximadamente 340 m/s! [1]. Essa é uma das informações que os professores de física sempre levam prontas às aulas sobre ondulatória/acústica. Para atender às demandas do século 21, como preconizam os mais recentes documentos norteadores da educação [2], é preciso repensar as abordagens promovidas em sala de aula e incorporar cada vez mais ao processo de ensino-aprendizagem atividades que valorizam a participação dos alunos, impulsionando-

os a ser protagonistas no processo de construção dos próprios conhecimentos.

Para Gleiser [3], não existe nada mais estimulante no aprendizado da ciência do que vê-la em ação. De fato, é perceptível uma grande participação dos alunos nas aulas experimentais, por mais simples que elas sejam.

Sobre a ausência de aulas práticas, especificamente no ensino

de acústica, Santos e Júnior [4] afirmam que:

O ensino de acústica na escola transita na quase anulação da audição, aliás é uma contradição que conceitos como timbre, volume, amplitude etc.

É preciso repensar as abordagens promovidas em sala de aula e incorporar cada vez mais ao processo de ensino-aprendizagem atividades que valorizam a participação dos alunos

Autor de correspondência. E-mail: francicleisonpontes@gmail.com.

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Copyright © 2023, Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

muitas vezes sejam explicados exclusivamente por meio de desenhos “mudos” no quadro.

Há várias atividades propostas na literatura para determinar experimentalmente o valor da velocidade do som de um modo simples, prático e com a participação dos alunos nesse processo de descoberta. Uma delas é a utilização de um dispositivo conhecido como trombone de Quincke, um aparato experimental idealizado pelo físico alemão Georg Hermann Quincke em 1866 para demonstrar a interferência entre ondas sonoras e determinar a velocidade do som no ar [5].

Por sua praticidade, o trombone de Quincke é muito utilizado em laboratórios didáticos. Contudo, para seu funcionamento, são necessários um aparelho para emitir frequências sonoras e outro dotado de um sensor para captação de intensidade sonora. Esses equipamentos nem sempre são obtidos com facilidade. Logo, neste artigo, propõe-se a utilização de dois celulares como uma alternativa viável e prática a esses dois aparelhos. A partir de aplicativos, um dos celulares atua como fonte de onda sonora, emitindo frequências bem definidas, e o outro afere a intensidade do som, tendo o microfone de um fone de ouvido como captador.

Em uma possível replicação do experimento em sala de aula, o leitor/professor poderá confeccionar vários interferômetros, já que o equipamento é de baixo custo e de fácil construção, e solicitar aos alunos que utilizem os próprios celulares durante a experimentação.

2. Materiais e construção do trombone de Quincke

Para construção e utilização do trombone de Quincke proposto, foram utilizados os seguintes materiais:

- 6 tubos de 25 mm com 20 cm de comprimento;
- 2 tubos de 20 mm com 20 cm de comprimento;
- 4 joelhos de 25 mm;
- 2 adaptadores de tomada T de 25 mm;
- 2 buchas de redução 25 mm para 20 mm;
- 2 pedaços de EVA de 1,5 cm x 6,0 cm;
- 1 garrafa PET de 1 L;
- 1 régua milimetrada;
- 1 termômetro;
- 2 celulares (smartphone);
- 1 fone de ouvido;
- fita adesiva.

A base do interferômetro é composta de tubos e conexões de PVC e divide-se em duas partes: uma parte móvel e outra fixa. A parte fixa é constituída de cinco tubos de 25 mm, dois adaptadores de tomada T e dois joelhos de 25 mm, que foram encaixados conforme ilustra a Fig. 1.

A parte móvel é formada por um tubo de 25 mm, dois joelhos de 25 mm, duas buchas de redução e dois

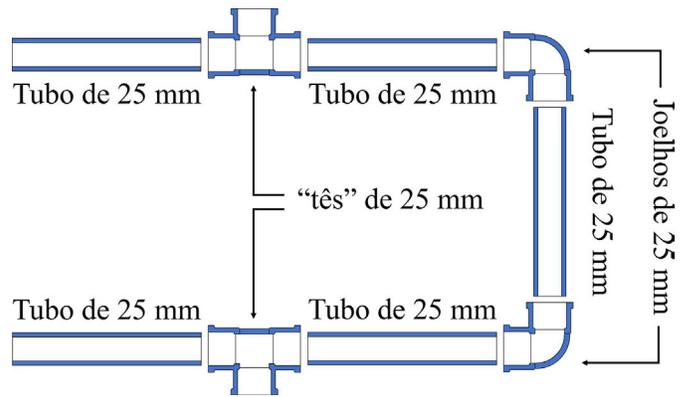


Figura 1 - Parte fixa do trombone de Quincke.

tubos de 20 mm. Os tubos e as conexões foram encaixados conforme ilustra a Fig. 2.

Após a montagem das tubulações, a parte móvel foi encaixada na parte fixa do interferômetro. Para minimizar a folga entre a parte externa dos tubos de 20 mm da parte móvel e a parte interna dos tubos de 25 mm da parte fixa, foram colados pequenos pedaços de EVA nas extremidades dos tubos de 20 mm da parte móvel antes de seu encaixe na parte fixa, conforme ilustra a Fig. 3.

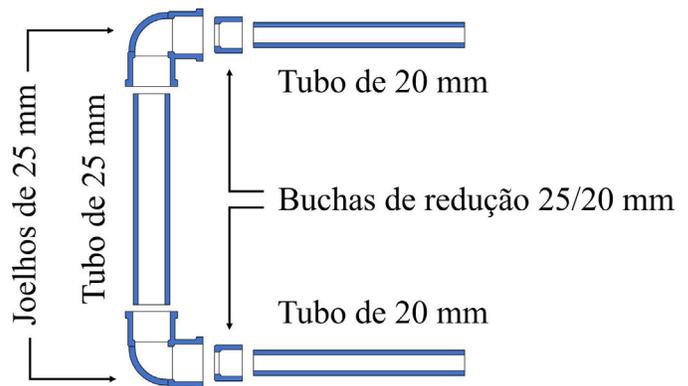


Figura 2 - Parte móvel do trombone de Quincke.



Figura 3 - Detalhe do encaixe da parte móvel na parte fixa do interferômetro.

Logo em seguida, foi fixado, com fita adesiva, o microfone do fone de ouvido em um dos Ts; no outro, foi fixada a garrafa, previamente cortada para o encaixe de um dos celulares, conforme apresentado na Fig. 4. A garrafa funciona como uma barreira acústica, direcionando o som para o interior da tubulação e minimizando sua dispersão para o ambiente.

Nessa etapa, é importante verificar se o microfone está totalmente voltado para o interior da tubulação, para que não haja perdas na captação do som durante a execução do experimento. A Fig. 5 mostra o interferômetro finalizado, sendo utilizado em um dos testes.

2.1. Funcionamento do interferômetro

O funcionamento do trombone de Quincke se baseia em um fenômeno denominado interferência. Esse fenômeno consiste em uma combinação de duas ondas ou mais [6]. Considerando-se apenas duas, a onda resultante dessa combinação será mais intensa que as ondas constituintes, caso a crista de uma encontre a



Figura 4 - Fone de ouvido e garrafa PET fixados na estrutura do trombone de Quincke.



Figura 5 - Trombone de Quincke finalizado, em uso.

crista da outra ou o vale de uma encontre o vale da outra (interferência construtiva), ou terá uma intensidade mínima caso a crista de uma encontre o vale da outra (interferência destrutiva).

A Fig. 6 ilustra a interferência entre ondas sonoras. Na imagem, há duas fontes de som, denominadas F_1 e F_2 , emitindo ondas com a mesma frequência, em fase, em três situações distintas. As combinações das ondas serão captadas por um microfone, que detectará uma interferência construtiva ou destrutiva.

Na situação 1, o caminho percorrido pelas ondas é igual, e, como elas estão em fase, chegarão ao microfone o vale de uma onda e o vale da outra. Logo, será captada uma interferência construtiva. Na situação 2, a fonte F_2 foi deslocada para a direita a uma distância igual a meio comprimento de onda – $\lambda/2$. Dessa forma, chegarão ao microfone o vale de uma onda e a crista da outra. Portanto, será captada uma interferência destrutiva. Na situação 3, a fonte F_2 foi deslocada novamente para a direita, a uma distância igual a um comprimento de onda – λ em relação à sua posição na situação 2, e a interferência captada foi novamente destrutiva.

Nessa situação, percebe-se que, se uma interferência destrutiva estiver sendo captada e ocorrer uma variação igual a um comprimento de onda – λ na distância percorrida por uma das ondas, o microfone captará novamente uma interferência destrutiva. Esse raciocínio será de suma importância na determinação do comprimento de onda e da velocidade do som nos testes realizados com o trombone de Quincke.

É preciso destacar que o som é uma onda longitudinal, formada por uma série de expansões e compressões periódicas do ar que se deslocam ao longo do espaço em torno da fonte emissora [6]. Contudo, para uma abordagem mais didática, as ondas sonoras foram, neste trabalho, representadas na Fig. 6 como uma onda transversal.

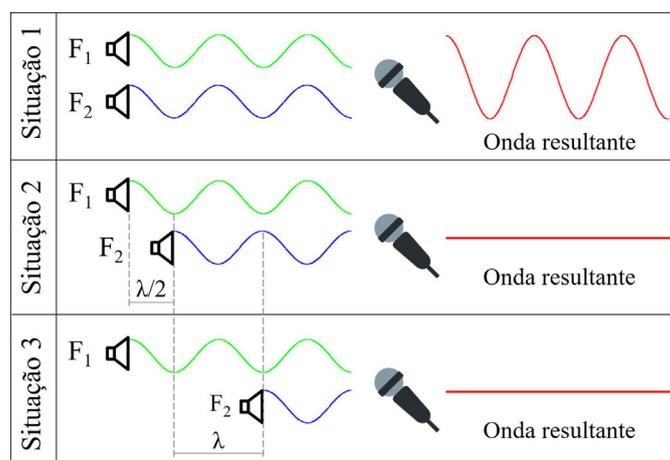


Figura 6 - Interferência sonora captada por microfone em três situações distintas.

2.2. Determinação da velocidade do som no trombone de Quincke

A Fig. 7 mostra um esquema do interferômetro proposto nesse estudo.

Conforme já mencionado anteriormente, o interferômetro foi equipado com dois celulares: o celular 1 atuou como uma fonte emissora de ondas sonoras através do aplicativo Signal Generator¹ e o celular 2 foi utilizado para aferição da intensidade sonora na saída de som através do aplicativo Sound Meter².

O método consistiu em emitir uma frequência sonora de valor conhecido no celular 1. Pelo esquema mostrado na Fig. 7, percebe-se que essa onda se dividiu em duas partes na tubulação a partir do ponto X. Essas duas frações se propagaram pela tubulação, percorreram distâncias diferentes e voltaram a se encontrar novamente na saída de som, no ponto Y, onde ocorreu o fenômeno da interferência entre as ondas. A intensi-

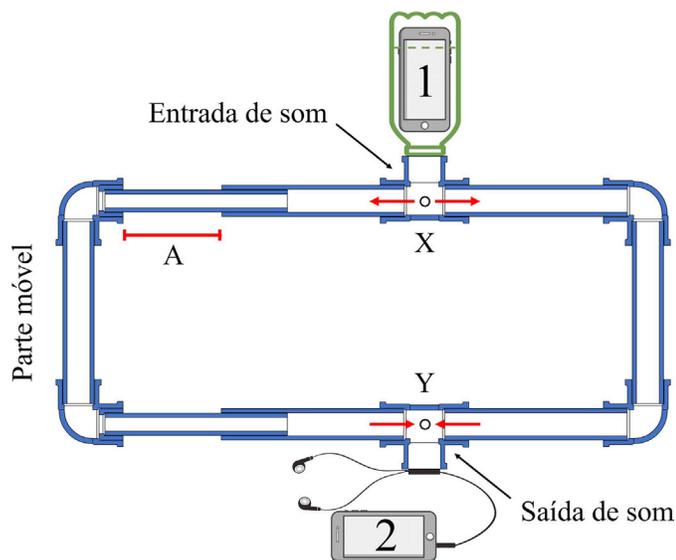


Figura 7 - Esquema do interferômetro feito de tubos de PVC.

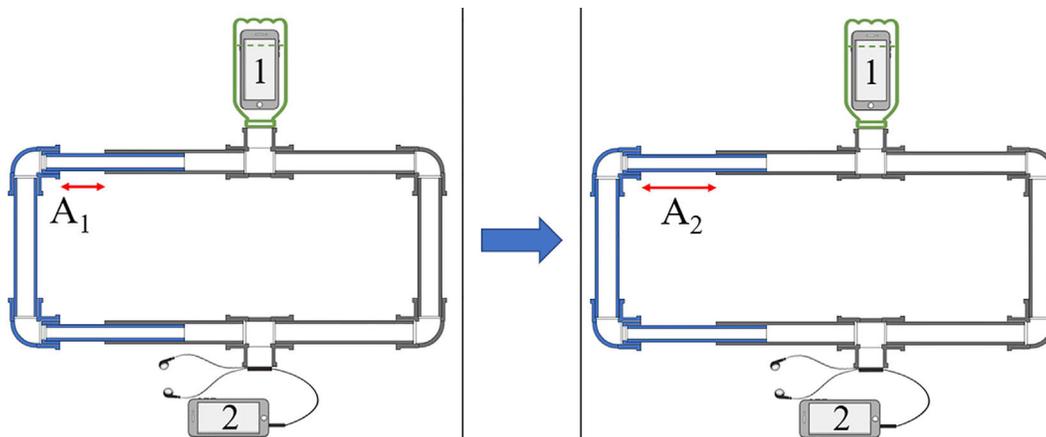


Figura 8 - Aferição das aberturas no trombone de Quincke durante duas interferências destrutivas consecutivas.

dade da onda sonora resultante foi captada pelo microfone do fone de ouvido e aferida pelo celular 2.

Note que o processo de interferência que ocorre no aparato experimental é análogo ao descrito na seção 2.1 e observado na Fig. 6. Quando a onda sonora é dividida no ponto X (Fig. 7), observam-se duas ondas sonoras viajando pelas tubulações, como se fossem as ondas representadas nas cores verde e azul emitidas por F_1 e F_2 na Fig. 6. Durante o reencontro das ondas sonoras, no ponto Y (Fig. 7) ocorre efetivamente o fenômeno da interferência sonora. O tipo de interferência depende da abertura da parte móvel do trombone, uma vez que as duas ondas percorrerão caminhos de comprimentos diferentes, como ocorre com as ondas verdes e azul na Fig. 6. A intensidade da onda resultante é captada pelo microfone do fone de ouvido (Fig. 7). A partir dos valores obtidos, é possível identificar se a interferência é destrutiva – intensidade mínima da onda resultante – ou se a interferência é construtiva – intensidade máxima da onda resultante, como observado nas situações 1, 2 e 3 na Fig. 6.

Com os aplicativos em execução nos celulares e com o trombone de Quincke totalmente fechado (abertura $A = 0$), deslocou-se lentamente a parte móvel para a direita, aumentando-se a abertura A , até que se percebeu um valor mínimo de intensidade sonora no celular 2. Nesse momento, foi detectada uma interferência destrutiva, conforme ilustrado na situação 2 da Fig. 6. O valor da abertura na primeira interferência destrutiva – distância entre as extremidades do cano e do joelho, conforme indica a Fig. 8 – foi notado e denominado A_1 . Em seguida, retomou-se o movimento da parte móvel até perceber outra interferência destrutiva. Notou-se novamente o valor da segunda abertura, que foi denominada A_2 . A Fig. 8 ilustra o interferômetro durante as aferições de A_1 e A_2 .

A Fig. 9 mostra uma captura de tela do aplicativo Sound Meter durante sua execução. Na imagem, observa-se um gráfico gerado pela aferição da intensidade sonora, captada na saída de som do interferô-

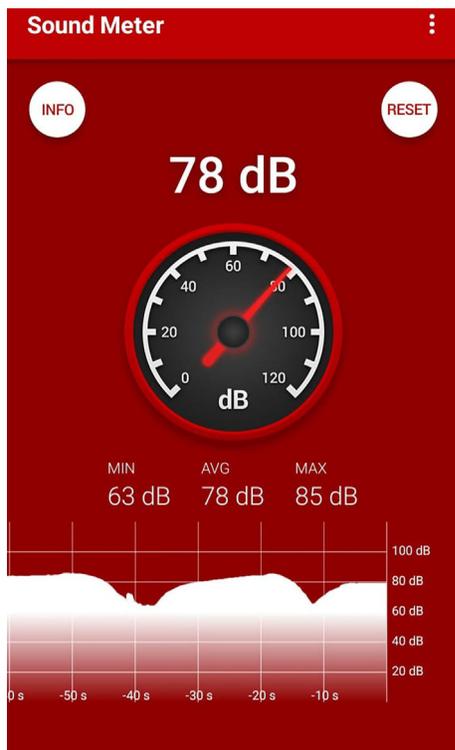


Figura 9 - Gráfico da aferição da intensidade sonora gerado pelo aplicativo Sound Meter.

metro através do microfone do fone de ouvido. Os dois pontos mínimos do gráfico correspondem aos dois momentos nos quais ocorreram as interferências destrutivas.

Conforme mencionado anteriormente, ao variarmos a abertura (representada por A) do interferômetro a partir do estado de interferência destrutiva inicial - A_1 - até chegarmos à detecção da subsequente interferência destrutiva - A_2 , torna-se evidente que a variação da distância percorrida pela onda, propagada através da parte móvel, corresponde a um comprimento de onda - λ .

Como a abertura ocorreu nos dois lados da parte móvel, a relação matemática entre A_1 , A_2 e λ é descrita na Eq. (1):

$$2(A_2 - A_1) = \lambda. \quad (1)$$

A equação pode ser escrita na forma

$$2\Delta A = \lambda, \quad (2)$$

onde $\Delta A = A_2 - A_1$.

Determinando-se os valores dos comprimentos de onda, com base nas medições das aberturas do interferômetro em duas interferências destrutivas consecutivas e visualizando os valores das frequências sonoras emitidas pelo aplicativo Signal Generator, foi possível determinar o valor da velocidade do som no ar dentro do trombone de Quincke através da equação funda-

mental da ondulatória

$$v = \lambda \cdot f, \quad (3)$$

na qual v é a velocidade do som no ar medida em metros por segundo (m/s), λ é o comprimento de onda medido em metros (m) e f é a frequência da onda medida em hertz (Hz).

3. Resultados

A partir do método apresentado, foram testados cinco valores de frequências, escolhidos com base nas dimensões do interferômetro e em uma estimativa dos possíveis valores de ΔA . Os dados obtidos nos testes estão expressos na Tabela 1.

A incerteza dos valores, representada pela letra σ , foi determinada com base no cálculo de desvio padrão, considerando-se os valores obtidos nos cinco testes realizados para cada frequência.

Durante a execução dos experimentos, a temperatura do local era de 28 °C. A aferição foi realizada com um termômetro de laboratório com graduação de 1 °C. Para verificar a proximidade do valor obtido experimentalmente para a velocidade do som no ar, com o valor apresentado pela literatura [7], foi utilizada a Eq. (4),

$$v = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}, \quad (4)$$

em que v é a velocidade do som no meio investigado, medida em metros por segundo (m/s), v_0 é a velocidade do som a 0 °C (273,15 K), cujo valor é de 331,45 m/s, T é a temperatura ambiente medida em Kelvin (K) e T_0 é o valor equivalente a 0 °C na escala absoluta, ou seja, 273,15 K. O valor teórico calculado a partir da Eq. (4) e da temperatura ambiente aferida durante a realização dos experimentos e o valor experimental médio estão apresentados na Tabela 2.

Com base na observação dos valores apresentados na Tabela 2, verifica-se uma grande proximidade entre o valor experimental médio e valor teórico calculado a partir da temperatura ambiente aferida no local de realização dos testes.

Tabela 1: Frequências geradas no aplicativo Signal Generator e os respectivos valores obtidos para os comprimentos de onda e velocidade do som no ar.

f (Hz)	λ (cm)	σ (cm)	v (m/s)
1500	23,4	$\pm 0,2$	351,0
1700	20,2	$\pm 0,2$	343,4
1900	18,4	$\pm 0,3$	349,6
2100	16,1	$\pm 0,1$	338,1
2300	14,9	$\pm 0,2$	342,7
$v = 344,96 \text{ m/s} \pm 5,3 \text{ m/s}$			

Tabela 2: Valor teórico para velocidade do som a 28 °C e valor experimental médio.

Velocidade do som no ar a 28 °C	
Teórico	348,02 m/s
Experimental	344,96 m/s \pm 5,3 m/s

Vale ressaltar que a Eq. (4) é válida apenas na condição de “ar seco”, conforme Ref. [7]. Ou seja, a umidade do ar pode interferir na velocidade determinada. Durante a realização do experimento, não se estimou a umidade do ar no local. Logo, foi levado em consideração o valor teórico apresentado na Tabela 1 como um valor de referência.

4. Considerações finais

Durante a redação deste artigo, procurou-se descrever o processo de confecção do trombone de Quincke proposto de um modo mais minucioso possível, visando à possibilidade de replicação do experimento nas aulas de física pelo leitor/professor. Além disso, foram utilizados, na construção do interferô-

metro, apenas materiais facilmente acessíveis, como tubos e conexões de PVC e uma garrafa PET, caracterizando-o, assim, um experimento de baixo custo.

Diante de sua praticidade, sugere-se que, em uma possível replicação do experimento em sala de aula, sejam confeccionados vários interferômetros. Dessa forma, a prática experimental pode ser realizada por pequenos grupos de alunos, envolvendo todos no processo de descoberta. Ademais, o professor poderá solicitar a eles que utilizem os próprios celulares durante a experimentação.

Sobre os testes realizados com o trombone de Quincke proposto, verificou-se que os resultados obtidos para a velocidade do som no ar apresentaram grande proximidade dos valores previstos em equações e apresentados na literatura, evidenciando plena confiabilidade do equipamento, mesmo sendo ele construído com materiais alternativos.

Recebido em: 27 de Março de 2023

Aceito em: 14 de Agosto de 2023

Notas

¹Disponível em: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.xyz.signal>.

²Disponível em: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.splendapps.decibel>.

Referências

- [1] R.H. Doca, J.B. Gualter, V.B. Newton, *Física 2: Termologia, Ondulatória e Óptica* (Saraiva, São Paulo, 2016), 2ª ed.
- [2] BRASIL, Ministério da Educação, *Base Nacional Comum Curricular*. (MEC, Brasília, 2018).
- [3] M. Gleiser, *A Física na Escola* **1**(1), 4 (2000).
- [4] W.P. dos Santos, F.N.M. Júnior, *A Física na Escola* **19**(2), 132 (2021).
- [5] C.J.M. Souza, L.A. da Silva; I.J.M. Leite M.A.A. Monteiro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210191 (2021).
- [6] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentos de Física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (LTC, Rio de Janeiro, 2009), 8ª ed.
- [7] D.A. Bohn, *J. Audio Eng. Soc.* **36**, 223 (1988).