

Atividades práticas de baixo custo para o estudo de ondas estacionárias

em cordas vibrantes usando smartphones

Thulio Alves de Sá Muniz Sampaio
Renê Pereira de Souza
Maria Isabel Oliveira de Figueiredo
Wellington dos Santos Souza# 

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão
Pernambucano, Campus Salgueiro,
Salgueiro, PE, Brasil.

RESUMO

Este artigo apresenta três atividades experimentais de baixo custo desenvolvidas com o intuito de obter propriedades físicas de ondas mecânicas que se propagam em cordas de violão através do estudo das ondas estacionárias geradas nesse meio. Com o uso de uma trena e de um aplicativo para smartphones, obtiveram-se as frequências das notas da escala de Mi maior e o comprimento correspondente das cordas, o que permitiu encontrar a velocidade das ondas estacionárias e os harmônicos correlatos. Por meio das medidas da tensão e da densidade linear das cordas, pôde-se obter a velocidade da onda produzida em cada corda e comparar os resultados com valores obtidos a partir dos dados coletados com o smartphone. Os resultados apresentaram uma boa concordância entre si, o que corrobora a eficácia da metodologia utilizada como uma maneira alternativa de abordar o estudo das cordas vibrantes visando o ensino de física para alunos do Ensino Médio de maneira que o discente participe de forma ativa no processo de ensino-aprendizagem.

Palavras-chave: ondas estacionárias; smartphones; ensino de física; cordas vibrantes

1. Introdução

Númeras características e diversos fenômenos associados à audição podem ser analisados por meio de leis e modelos da física, da química e de outras disciplinas que tratam das ondas. Como a audição é parte integrante do sistema sensorial, a percepção do mundo e do ambiente em que se está inserido também é mediada por ela. Dessa forma, a decodificação de diferentes sons e a sua associação com outros sentidos faz parte do desenvolvimento cognitivo e do arcabouço cultural e social humano. Aliar o ensino de física do Ensino Médio ao estudo das ondas permite desenvolver a visão de que ela não só é essencial como disciplina, mas também é manifestação da necessidade de compreender e se apropriar da natureza. Tendo isso em mente, uma maneira de executar isso se dá por meio do uso dos smartphones, que fazem parte do cotidiano de muitos estudantes.

O uso de smartphones em sala de aula e a inserção de componentes tecnológicos em ambientes educacionais é algo cada vez mais presente e necessário, pois o seu uso e sua exposição podem promover novas alternativas para o ensino de ciências. O desenvolvimento de atividades práticas explorando dispositivos móveis contribui para a elaboração de experimentos interativos, de baixo custo e de fácil manuseio que oferecem a possibilidade de quantificar grandezas físicas com precisão quando comparados com dispositivos comerciais [1-4]. A prática experimental proporciona ao aluno

uma maior conexão entre a realidade e o conteúdo trabalhado, permitindo que ele interaja diretamente e, assim, se transforme no protagonista de seu próprio saber [5], tornando-se mais maduro e consciente de seu papel na sociedade.

Devido ao fato de possuírem processadores de alto desempenho e de baixo consumo de energia, aliados à grande capacidade de armazenamento e à maior velocidade dos componentes eletrônicos embutidos, os smartphones atuais têm uma grande variedade de recursos e sensores que podem ser explorados mediante aplicativos. Além disso, seu uso como ferramenta pedagógica para o ensino de ciências pode minimizar as dificuldades observadas em virtude da falta de estruturas laboratoriais em muitas escolas e possibilitar melhor formação para o discente.

Portanto, com base nas ideias expostas acima, este trabalho tem como

A decodificação de diferentes sons e a sua associação com outros sentidos faz parte do desenvolvimento cognitivo e do arcabouço cultural e social humano

objetivo apresentar três atividades experimentais de baixo custo realizadas com o intuito de medir e quantificar grandezas e propriedades associadas à propagação de ondas estacionárias na 1ª e na 6ª corda de um violão.

O uso conjunto de uma trena e do aplicativo Phyphox permitiu obter a velocidade dessas ondas e os harmônicos associados à frequência da consequente oscilação do ar. As medidas da densidade linear e da tensão de cada corda feitas com o auxílio de uma balança de precisão e de um dinamômetro possibilitaram uma forma alternativa de alcançar esses resultados e de compará-los.

#Autor de correspondência. E-mail: wellington.souza@ifsertao-pe.edu.br.

2. Características físicas das ondas

O estudo dos fenômenos ondulatórios constitui uma das áreas mais importantes da física, e o conceito de onda estabelece o seu alicerce fundamental. Apesar de uma onda nos remeter, por exemplo, às ondas do mar ou às ondulações produzidas na água após o lançamento de uma pedra, em sentido mais amplo, uma onda se refere a uma perturbação periódica que se propaga no espaço, transmitindo energia e momento, mas não matéria. Devido às suas características, podemos dividi-la em dois grupos: o das ondas mecânicas e o das eletromagnéticas.

O primeiro necessita de um meio material para se propagar, podendo ser um sólido ou um fluido, enquanto o segundo tem a capacidade de propagação no vácuo, como é o caso da luz. Quando a perturbação produzida pela onda ocorre na mesma direção de sua propagação, dizemos que se trata de uma onda longitudinal; caso a perturbação seja perpendicular à propagação, trata-se de uma onda transversal [6].

No caso das ondas que se propagam em um meio material, a sua velocidade está associada às propriedades mecânicas desse meio [7]. Para uma corda fixa entre dois pontos, ela pode ser determinada pela Eq. (1)

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (1)$$

Ela é conhecida como relação de Taylor [8], onde T é a tensão na corda e μ é a sua densidade linear. Logo, alterando qualquer uma dessas propriedades, muda-se a velocidade de propagação da onda no meio.

3. Frequências dos harmônicos em uma corda vibrante

Ao percutir a corda de um instrumento, uma sucessão de pulsos se propagará de uma extremidade à outra e retornará a essa extremidade, ocasionando a superposição desses pulsos. Isso gerará regiões de interferência construtiva e destrutiva, ou seja, regiões em

que as cristas de duas ondas irão se superpor ou regiões em que uma crista encontrará um vale da outra. Esse padrão é chamado de onda estacionária e a propagação desse fenômeno na corda faz com que as moléculas do ar adjacentes oscilem na mesma frequência, produzindo regiões de compressão e rarefação [9] que caracterizam uma onda sonora. Uma onda estacionária pode assumir diferentes configurações, como mostra a Fig. 1.

Os pontos em que a corda não se move são regiões de interferência destrutiva, recebendo o nome de “nós”. Já os pontos de amplitude máxima, que se encontram entre os nós, são regiões de interferência construtiva chamadas de “ventres”. Cada configuração da Fig. 1 caracteriza um modo normal e, para a situação da esquerda, temos que o comprimento L da corda é igual ao comprimento de onda λ . O primeiro modo normal antecede esta imagem, sendo o caso em que L é metade de λ . Logo, nas outras configurações, o comprimento de onda é simplesmente um múltiplo inteiro do primeiro modo normal, o que nos leva a

$$L = \frac{n\lambda}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Escrevendo λ em termos da velocidade e da frequência e explicitando f , temos

$$f = \frac{nv}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

que é a equação de Euler-Lagrange [10]. Ao percutir a corda de um violão, por exemplo, a menor frequência obtida pela Eq. (3) ocorre para $n = 1$ e é chamada de frequência fundamental [11], a qual dá o nome da nota musical tocada. Porém, a onda estacionária produzida na corda é uma superposição de modos normais, em que, além da frequência fundamental, são produzidos múltiplos inteiros desta frequência. Es-

tas frequências são denominadas de harmônicos [7] e a proporção com que surgem define o timbre do som.

4. Descrição do experimento

O experimento realizado consistiu em executar a escala de Mi maior na 1ª e na 6ª corda de um violão do tipo Tagima Dallas e, com o auxílio de uma trena, medir o comprimento das cordas desde o cavalete, que é a peça na região inferior do instrumento onde as cordas são amarradas [12], até a pestana ou o

traste correspondente da nota. Como a pestana é a peça que une a mão do instrumento ao braço, essa foi a medida para a primeira nota da escala. Ao mesmo tempo em que se realizava este procedimento, foram

efetuadas também três medidas de frequência para cada nota da escala por meio do aplicativo Phythox instalado no *smartphone* e, em seguida, foi determinada a média aritmética correspondente. Os dados das medidas foram salvos na plataforma do aplicativo de modo que pudessem ser acessados para o posterior processamento realizado no software OriginPro 8.5. Depois, foi plotado o gráfico da frequência em função do inverso do comprimento para as duas cordas a partir da Eq. (3). Após quantificar as velocidades das ondas na 1ª e na 6ª corda, os modos normais das respectivas cordas soltas foram determinados a partir da análise espectral das frequências produzidas em cada corda. Para isso, usamos o aplicativo Phythox e a função “Espectro de áudio” para obter informações da intensidade do som em função da frequência e, assim, conseguir determinar os modos normais para os harmônicos em cada corda. Em seguida, foi plotado o gráfico da frequência em função dos harmônicos para as duas cordas soltas e determinada a velocidade da onda em cada corda.

O estudo dos fenômenos ondulatórios constitui uma das áreas mais importantes da física, e o conceito de onda estabelece o seu alicerce fundamental

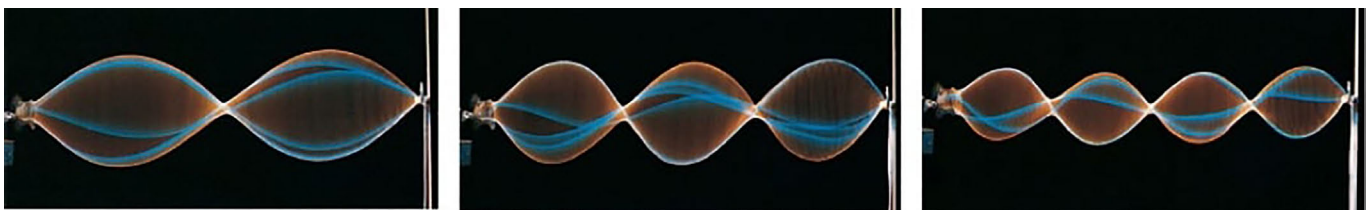


Figura 1 - Fotografias estroboscópicas de uma onda estacionária em uma corda percutida por um oscilador na extremidade esquerda. Fonte: Ref. [6].

Os valores das velocidades obtidos por meio de dados da frequência foram comparados com os valores determinados de forma direta através da medição da tensão e da densidade linear das cordas, tendo como objetivo verificar a precisão entre as três formas distintas de aferição da velocidade propostas neste trabalho. Para determinar a força de tensão na 1ª e na 6ª corda do violão, foi usado um dinamômetro para equilibrar a corda em seu ponto médio, como exemplifica a Fig. 2.

Para pequenos ângulos, a altura da

corda pode ser determinada em função da força aplicada sobre ela a partir da Eq. (4) [13]

$$h = \left(\frac{L}{4T}\right) \cdot F. \quad (4)$$

Nesse caso, F corresponde à intensidade da força exercida pelo dinamômetro sobre a corda, a qual equilibra a corda em uma dada altura h , sendo T o módulo da força de tensão da corda e θ o ângulo de inclinação que ela faz com a direção horizontal. Já as densidades lineares das cordas (consideradas ho-

mogêneas) foram obtidas medindo-se as massas e os respectivos comprimentos a partir da relação $\mu = m/L$.

4.1. Atividade 1: Analisando a frequência do som em função do comprimento da corda do violão

Ao tocar as notas musicais em uma corda de violão, observa-se que o som fica mais agudo à medida que nos aproximamos da boca do violão. Neste caso, para uma mesma corda, a frequência do som produzido depende apenas do comprimento da corda e a sua intensidade aumenta à medida que o comprimento da corda diminui. Nesta primeira atividade, propomos uma maneira rápida de verificar essa relação a partir da Eq. (3) e determinar a velocidade da onda se propagando na corda. Inicialmente, foram medidas as frequências para as notas musicais que fazem parte da escala de Mi maior utilizando o aplicativo Phythox instalado no *smartphone* Xiaomi Redmi Note 8. A Tabela 1 mostra os valores das frequências medidas para as respectivas notas musicais na 1ª e na 6ª corda do violão.

A partir dos dados obtidos na Tabela 1, observa-se que a intensidade da frequência aumenta à medida que o

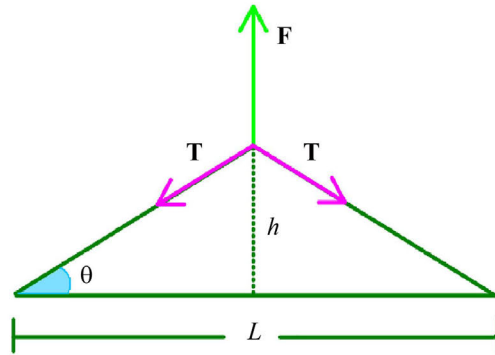


Figura 2 - 6ª corda do violão equilibrada em seu ponto médio (12º traste) com o dinamômetro ao lado do diagrama utilizado para determinar a relação entre a altura da corda e a força aplicada pelo aparelho.

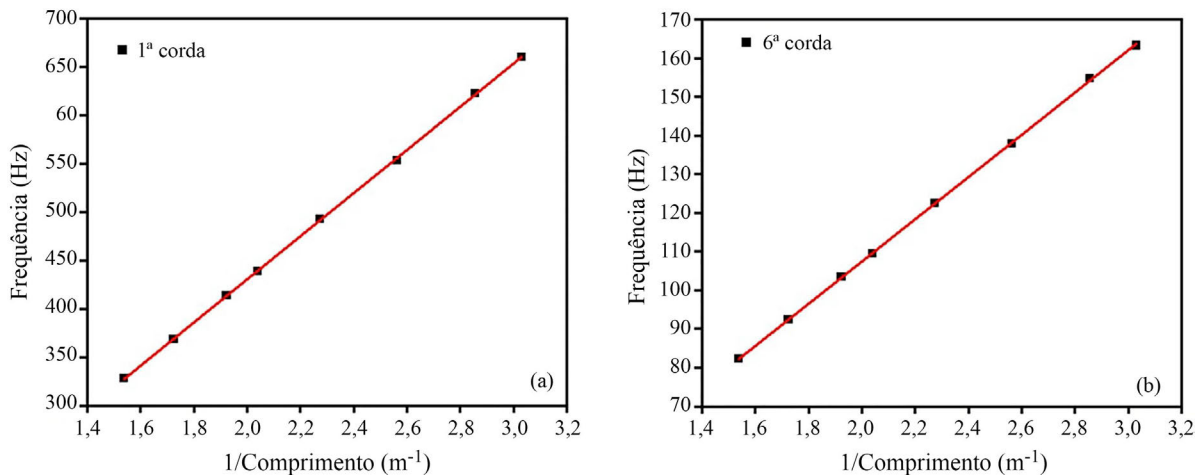


Figura 3 - Gráficos da frequência em função do inverso do comprimento obtidos através do uso da Eq. (3) para a 1ª corda e a 6ª corda, respectivamente.

Tabela 1: Frequências das notas da escala de Mi maior para a 6ª e a 1ª corda.

Nota musical	L (m)	f_1 (Hz)	f_6 (Hz)
E	$0,65 \pm 0,0005$	$328,2 \pm 0,5$	$82,2 \pm 0,3$
F#	$0,58 \pm 0,0005$	$369,3 \pm 0,4$	$92,2 \pm 0,2$
G#	$0,52 \pm 0,0005$	$413,6 \pm 0,7$	$103,4 \pm 0,5$
A	$0,49 \pm 0,0005$	$438,5 \pm 0,2$	$109,5 \pm 0,3$
B	$0,44 \pm 0,0005$	$493,0 \pm 0,6$	$122,6 \pm 0,5$
C#	$0,39 \pm 0,0005$	$553,1 \pm 2,8$	$137,9 \pm 0,9$
D#	$0,35 \pm 0,0005$	$623,0 \pm 2,0$	$154,8 \pm 0,5$
E	$0,33 \pm 0,0005$	$660,3 \pm 1,4$	$163,3 \pm 0,5$

comprimento da corda diminui, como esperado. Além disso, as frequências na 1ª corda são aproximadamente quatro vezes maiores do que as frequências na 6ª corda ($f_1 = 4f_2$). Essa diferença se deve às mudanças das características do meio e serão mais bem descritas na atividade 3. A Fig. 3 mostra o gráfico da frequência em função do inverso do comprimento para as duas cordas. A partir do gráfico, foi possível determinar o valor da velocidade de propagação da onda em cada corda por meio do ajuste linear. Nesse caso, foi utilizado o software OriginPro 8.5.

As velocidades de propagação foram determinadas a partir da inclinação da reta, com os resultados obtidos sendo de aproximadamente $(446,0 \pm 1,0)$ m/s e $(109,2 \pm 0,2)$ m/s para a 1ª e a 6ª corda, respectivamente.

4.2. Atividade 2: Determinando os modos normais dos harmônicos em uma corda de violão

Esta etapa do experimento teve como objetivo determinar os modos normais dos harmônicos para a onda estacionária produzida na 1ª e na 6ª corda do violão a partir da análise espectral do som resultante. Para isso, foi utilizada a função “Espectro de áudio” do aplicativo Phyphox, a qual fornece informações da magnitude do sinal sonoro em função da frequência (Fig. 4) e, dessa forma, quantificar de maneira direta os valores dos correspondentes harmônicos. A Fig. 4(a) mostra o espectro do som produzido devido à oscilação da 6ª corda do violão, o que corresponde ao som da nota Mi. Nesse caso, os picos observados no gráfico da Fig. 4(a) representam as frequências dos harmônicos que compõem o som da nota considerada. Usando a função Zoom, do aplicativo Phyphox, é possível ampliar a região do espectro e avaliar os picos de frequência (Fig. 4(b)). O primeiro pico corresponde à frequência fundamental (que dá nome a uma nota musical de corda solta – Mi) e o valor obtido foi de aproximadamente $(70,3 \pm 0,5)$ Hz. O segundo pico observado corresponde à frequência do 2º harmônico, que está relacionado ao som da nota Mi tocada uma oitava acima e o valor obtido foi de aproximadamente $(164,1 \pm 0,5)$ Hz.

Também foram determinadas as frequências do 3º, 4º e 5º harmônico: $(234,4 \pm 0,5)$ Hz, $(328,1 \pm 0,5)$ Hz e $(398,4 \pm 0,5)$ Hz, respectivamente. Devido a ruídos externos e à sensibilidade do próprio sensor de áudio do *smartphone* utilizado, a partir do 5º harmônico, os picos não ficam mais tão perceptíveis e basicamente o que se tem são ruídos.

A Fig. 5 mostra o gráfico da frequência em função do número de harmônicos obtidos usando o Phyphox.

Calculando a inclinação da reta, é possível determinar a velocidade da onda na 6ª corda, cujo valor obtido foi de $(106,6 \pm 2,4)$ m/s. Procedimentos semelhantes foram realizados para determinar a frequência dos harmônicos e a velocidade de propagação da onda na 1ª corda (Tabela 2).

4.3. Atividade 3: Quantificando as propriedades físicas das cordas (tensão e densidade linear)

Com o objetivo de quantificar as alterações físicas dos meios (1ª e 6ª corda) e comparar com outra fonte os valores que foram determinados na Atividade 2 para as velocidades das ondas estacionárias a partir dos dados das frequências coletadas usando o *smartphone*, foram realizadas medidas diretas das tensões e densidades lineares das cordas. As densidades lineares foram obtidas medindo as suas massas mediante uma balança de precisão e os respectivos comprimentos com o auxílio de uma trena, o que indicou os valores de $(0,43 \pm 0,40) \times 10^{-3}$ kg/m e $(5,20 \pm 0,40) \times 10^{-3}$ kg/m para a 1ª e a 6ª corda, respectivamente.

Para determinar a tensão, foram



Figura 4 - Espectro do áudio captado pelo microfone do *smartphone* e harmônicos da nota Mi da 6ª corda. Ambas as imagens apresentam a interface do aplicativo Phyphox.

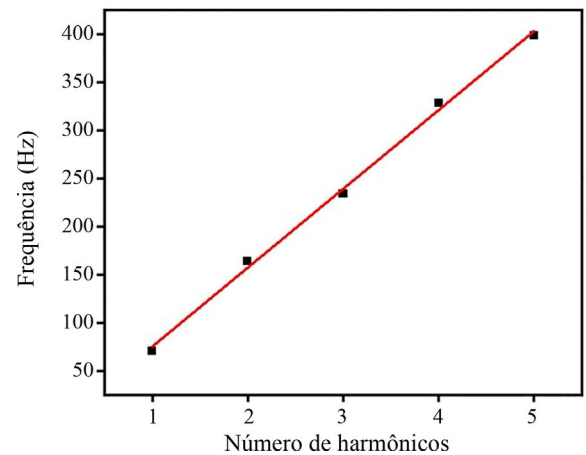


Figura 5 - Gráfico da frequência em função do número de harmônicos obtido mediante a Eq. (3) para a 6ª corda do violão.

realizadas medidas da força aplicada ao ponto médio das cordas do violão (F) e das correspondentes alturas. Nesse caso, a intensidade da força aplicada ao ponto médio da corda foi determinada usando um dinamômetro. A Fig. 6 mostra a relação linear entre a força F exercida no ponto médio das cordas e as alturas correspondentes, onde a tensão da corda está relacionada com a inclinação da reta a partir da Eq. (4).

Com base nos valores obtidos de tensões e densidades lineares, foram calculadas as velocidades de propagação das ondas nas respectivas cordas,

Tabela 2: Frequência dos harmônicos e velocidade de propagação da onda na 1ª e na 6ª corda do violão.

Nº de harmônicos	1	2	3	4	5	Velocidade (m/s)
Frequência 1ª corda (Hz)	$328,1 \pm 0,5$	$679,7 \pm 0,5$	$1008,0 \pm 0,5$	$1383,0 \pm 0,5$	$1734,4 \pm 0,5$	$457,6 \pm 3,8$
Frequência 6ª corda (Hz)	$70,3 \pm 0,5$	$164,1 \pm 0,5$	$234,4 \pm 0,5$	$328,1 \pm 0,5$	$398,4 \pm 0,5$	$106,6 \pm 2,4$

Tabela 3: Velocidade de propagação da onda na corda do violão.

Velocidade (m/s)	Forma direta	Atividade 1	Atividade 2	Erro relativo (1)	Erro relativo (2)
1ª corda	434,8	446,0	457,6	2,57%	5,24%
6ª corda	102,1	109,2	106,6	6,95%	4,41%

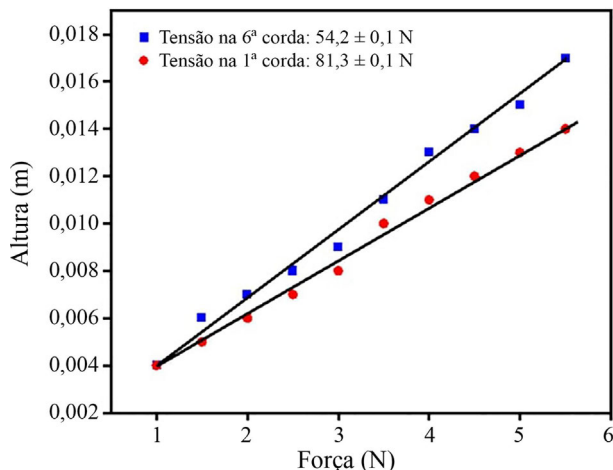


Figura 6 - Gráfico da altura em função da força aplicada pelo dinamômetro para a 6ª corda e a 1ª corda. A tensão exercida sobre cada uma foi obtida por meio do coeficiente angular da Eq. (4).

as quais foram de $(434,8 \pm 0,9)$ m/s para a 1ª corda e $(102,1 \pm 0,1)$ m/s para a 6ª corda. Estes resultados foram comparados com os dados obtidos nas atividades 1 e 2 (Tabela 3).

Verifica-se, assim, uma variação percentual máxima menor do que 7,00% entre os valores para a velocidade

de determinados nas atividades 1 e 2 quando comparados com os valores obtidos de forma direta, o que mostra uma boa concordância entre os resultados.

5. Conclusão

Este trabalho teve como objetivo desenvolver três atividades experimentais de baixo custo com o propósito de estudar as propriedades físicas das ondas estacionárias produzidas em cordas de violão. Através da medição das frequências das notas que constituem a escala de Mi maior por meio do aplicativo Phyphox e da aferição dos seus comprimentos correspondentes na 1ª e na 6ª corda por meio de uma trena, pôde-se obter a velocidade de propagação da onda nesses meios. Isso permitiu mensurar os cinco primeiros harmônicos de cada corda e compará-los com os valores indicados pelo espectro de áudio do Phy-

phox, o que possibilitou encontrar a velocidade das ondas a partir desse outro método e avaliar a concordância dos dados.

Também foram feitas medidas da densidade linear das cordas utilizadas com o uso de uma balança de precisão e da tensão exercida sobre elas mediante um dinamômetro, o que assegurou o encontro da velocidade da onda em cada corda de forma direta. Os resultados alcançados mostraram que as atividades propostas se classificam como uma boa alternativa para a determinação dessas medidas, sendo possível obtê-las com uma boa precisão quando comparadas aos valores demonstrados pelos sensores do *smartphone* e aos que são encontrados na literatura. Ademais, a atividade experimental desenvolvida também permite trabalhar conceitos de ondulatória e acústica em salas de aula do Ensino Médio, propiciando um ensino para a maior autonomia no processo de aprendizagem dos estudantes.

Recebido em: 11 de Julho de 2022

Aceito em: 16 de Novembro de 2022

Referências

- [1] L.P. Vieira, V.O.M. Lara, D.F. Amaral, Revista Brasileira de Ensino de Física **36**, 3505 (2014).
- [2] M.R. Rossini, P.S. de Camargo, K.E. Yamaguti, M.J. Alves, L.H.C. Amorin, Revista Brasileira de Ensino de Física **43**, e20210194 (2021).
- [3] E. Pereira, Revista Brasileira de Ensino de Física **43**, e20210168 (2021).
- [4] G.F. Marranghello, J.V. Falcão, T.L.B. Aveiro, W.M. Lucas, A Física na Escola **18**(1), 9 (2020).
- [5] P. Freire, *Pedagogia da Autonomia: Saberes Necessários À Prática Educativa* (Paz e Terra, São Paulo, 2004), 25thed.
- [6] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentos de Física* (Editora LTC, Rio de Janeiro, 2016), 10th ed.
- [7] H. Young, R. Freedman, *Física II - Termodinâmica e Ondas* (Pearson, São Paulo, 2008), 14th ed.
- [8] G.I. de Mello, A Física na Escola **8**(2), 31 (2007).
- [9] P. Hewitt, *Física Conceitual* (Editora Bookman, Porto Alegre, 2015), 12thed.
- [10] H.M. Nussenzweig, *Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor* (Editora Blucher, São Paulo, 2002), 4th ed.
- [11] E.M. Santos, C. Molina, A.P.B. Tufaille, Revista Brasileira de Ensino de Física **35**, 2507 (2013).
- [12] M.E. Zaczéski, C.H. Beckert, T.G. Barros, A.L. Ferreira, T.C. Freitas, Revista Brasileira de Ensino de Física **40**, e1309 (2017).
- [13] A. Maciel, M.I.V. Orselli, R.E.G. Machado, Z.O. Guimarães-Filho. Cordas vibrantes no Violão. Disponível em http://www2.if.usp.br/~eletivos/posters_2005/painel18.pdf, acesso em 7 de maio de 2022.