

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DENILSON BAHIA DE SOUZA JUNIOR

**UM EXPERIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM EM
BARRAS METÁLICAS**

**Bagé
2019**

DENILSON BAHIA DE SOUZA JUNIOR

**UM EXPERIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM EM
BARRAS METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Edson Massayuki Kakuno

Coorientador: John Welvins Barros Araujo

**Bagé
2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

B278e Bahia Junior, Denilson de Souza
Um experimento para a determinação da velocidade do som em
barras metálicas / Denilson de Souza Bahia Junior.
65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, FÍSICA, 2019.
"Orientação: Edson Massayuki Kakuno".

1. Experimentação. 2. Plataforma Arduino. 3. Ensino de
física. 4. Ondas mecânicas. 5. Velocidade do som. I. Título.

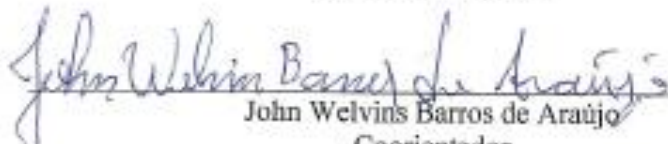
DENILSON BAHIA DE SOUZA JUNIOR

UM EXPERIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM EM
BARRAS METÁLICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Licenciado em Física.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 05 de dezembro de 2019.

Banca examinadora:


John Welvins Barros de Araújo
Coorientador
FURG


Msc. Januário Dias Ribeiro
UNIPAMPA


Dr. Wladimir Hernandez Flores
UNIPAMPA

“Falta Tompero”

Érick Jaquin

RESUMO

O presente trabalho traz uma proposta de criação de um recurso para o estudo de ondas mecânicas, propagação do som em meios sólidos condutores, visando que o mesmo seja utilizado no ensino médio como uma ferramenta de experimentação para o ensino. Acredita-se que este experimento tem potencial de motivar e auxiliar os alunos na melhor compreensão deste conteúdo. Este recurso utiliza uma simples razão entre a distância e tempo de propagação, tornando-o mais compreensível. O aparato experimental desenvolvido durante o projeto de pesquisa se mostrou potencialmente válido para o estudo de ondas mecânicas e sua propagação nos meios. O aparato utiliza materiais encontrados no mercado nacional, tornando acessível sua reprodução.

Palavras-Chave: Experimentação. Plataforma *Arduino*. Ensino de física. Ondas mecânicas. Velocidade do som.

ABSTRACT

The present work proposes the creation of a resource for the study of mechanical waves, sound propagation in conductive solid media, aiming at its use in high school as an experimentation tool for teaching. It is believed that this experiment has the potential to motivate and assist students in better understanding this content, this feature uses a simple ratio between distance and propagation time, making it more understandable. The experimental apparatus developed during the research project proved to be potentially valid for the study of mechanical waves and their propagation in the media. The apparatus uses materials found in the domestic market, making its reproduction accessible.

Keywords: Experimentation. *Arduino* platform. Physics teaching. Mechanical waves. Speed of sound.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 Breve descrição dos métodos para determinação da velocidade do som em sólidos ..	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 Experimentação na ciência <i>versus</i> experimentação no ensino de ciências	16
3.2 O papel da experimentação no ensino de física	18
4 METODOLOGIA	20
4.1 Física por trás dos experimentos semelhantes à Speziali <i>et al.</i> (1986)	20
4.2 Aspectos teóricos clássicos e básicos a respeito da propagação do som em metais	21
4.3 Plataforma <i>Arduino</i>	23
4.4 Instrumentação	24
5 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
5.1 Hastes de Aterramento	28
5.2 Validando o método proposto por meio de outros métodos	33
5.3 Tubo de Alumínio	35
5.4 Tubo de Cobre	35
6 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38
APÊNDICES	41
APÊNDICE I – Trabalhos encontrados que discutem a velocidade do som	41
APÊNDICE II – Programação do <i>Arduino</i> para a coleta do tempo do pulso	50

APÊNDICE III – Plano de aula.....	51
APÊNDICE IV – Guia do aluno.....	56
ANEXOS	60
ANEXO 1 – Experiência reproduzida pelo PIBID Subprojeto Física UNIPAMPA.....	60

1 INTRODUÇÃO

O papel desempenhado pela física é, estudar, interpretar e modelar fenômenos naturais através de uma linguagem universal, prática que normalmente exige uma grande abstração. Muitas vezes os estudantes não possuem, de forma amadurecida, a capacidade de abstração exigida por certos assuntos, abordados na disciplina de física, o que pode dificultar sua compreensão. Hodson (1988) diz que durante a experimentação, os alunos podem passar de agentes passivos para atuantes no processo ensino aprendizagem, superando essa dificuldade de abstração e alcançando o entendimento do assunto abordado.

Durante a componente curricular “Instrumentação para o Ensino de Física”, ao estudar o artigo de Speziali *et al.* (1986), que apresenta um método para medir a velocidade do som em metais, surgiu a motivação de otimizar tal método através um novo recurso para medir o tempo, *i. e.*, alternativo ao proposto originalmente. Speziali propõe a determinação da velocidade por uma combinação de efeitos mecânicos e elétricos, contudo requer uma sequência de procedimentos razoavelmente refinados, o que pode deslocar o foco do aluno ou mesmo desmotivá-lo.

Não se encontram na literatura muitos experimentos didáticos, para o estudo da velocidade do som em sólidos, conforme mostrado no capítulo 2, e quando o fazem, sugerem procedimentos complexos ou de difícil reprodução, como por exemplo o apresentado por Speziali. O problema de pesquisa deste trabalho consiste em: como criar um recurso experimental de fácil reprodução, utilizável em sala de aula e com potencial de inovação, que aborda o tema da propagação de ondas mecânicas (som) em sólidos condutores (metais)?

A ideia para responder a pergunta acima, com tecnologias ativas e de baixo custo, foi a criação de um recurso semiautomático de aquisição de dados, simplificando a sequência de procedimentos, apresentadas por Speziali, e proporcionando uma melhor visualização geral do experimento por parte do aluno, para isso usando a plataforma *Arduino* (Arduino, 2019).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Foi realizada uma busca de trabalhos em 12 revistas científicas das áreas de pesquisa em ensino de física e pesquisa em física básica (sumário encontra-se no quadro 1). O levantamento foi realizado unicamente na *web*.

Quadro 1 - Lista de Revistas com seus endereços eletrônicos e amostragem temporal na qual se realizou a pesquisa

Revista/Editora	Anos	Endereço Eletrônico
Revista Brasileira de Ensino de Física - RBEF	1979-2019	http://www.sbfisica.org.br/rbef/
A Física na Escola	2000-2019	http://www1.fisica.org.br/fne/
Caderno Brasileiro de Ensino de Física	2000-2019	http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica
<i>The Physics Teacher</i>	1963-2019	https://aapt.scitation.org/journal/pte
<i>American Journal of Physics</i>	1963-2019	https://aapt.scitation.org/journal/ajp
<i>Advanced Materials Research</i>	2005-2019	https://www.scientific.net/AMR
<i>Physics Education</i>	1980-2019	https://iopscience.iop.org/
<i>Journal of Physics: Conference Series</i>	2004-2019	https://iopscience.iop.org/journal/1742-6596
<i>Japanese Journal of Applied Physics</i>	1962-2019	https://iopscience.iop.org/journal/1347-4065
<i>Chinese Physics Letters</i>	1984-2019	https://iopscience.iop.org/journal/0256-307X
<i>Journal of Physics E: Scientific Instruments</i>	1924-1989	https://iopscience.iop.org/journal/0022-3735
<i>European Journal of Physics</i>	1980-2019	https://iopscience.iop.org/journal/0143-0807

Fonte: Autor (2019).

A pesquisa de artigos nas revistas já mencionadas foi realizada por meio de palavras-chaves, fazendo uso das ferramentas de buscas de cada portal. As palavras-chaves utilizadas foram: *velocidade do som, propagação do som, propagação de ondas mecânicas, velocidade de ondas mecânicas, som em materiais, ondas sonoras, medir velocidade do som e medindo velocidade do som*. Estas foram traduzidas para a língua nativa da revista, quando necessário.

Figura 1 – Gráfico dos meios de propagação do som estudados



Fonte: Autor (2019).

Obteve-se um resultado de 53 artigos (Apêndice I) com diferentes métodos de se inferir a propagação de ondas sonoras. Como ilustrado na Figura 1 foi identificado 5 artigos (9,4%) propondo medir a velocidade do som em sólidos. Existem poucos artigos descrevendo uma prática experimental didática relacionada à propagação de ondas sonoras em meios sólidos, e, como esperado, um grande número de trabalhos determinando a velocidade do som no ar. Caso se deseje desenvolver um trabalho mais completo em determinação da velocidade do som (explorando o meio gasoso e o sólido), no Anexo I é apresentada uma proposta de medir a velocidade do som no ar, desenvolvida pelo PIBID (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência) subprojeto da física da UNIPAMPA.

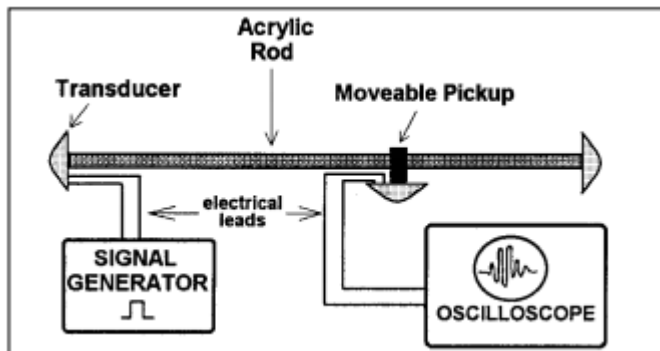
2.1 Breve descrição dos métodos para determinação da velocidade do som em sólidos

Speziali *et al.* (1986) propõe obter a velocidade de propagação do som em barras metálicas, utilizando e associando propriedades mecânicas (elasticidade) e elétricas (condutividade) de um metal, esta técnica será descrita em detalhes na seção 4.1.

O artigo “*Measuring the speed of sound in a solid*” (KEY; SMIDROVSKIS; FROM, 2000), descreve um método para determinar a velocidade do som a partir de um pulso gerado por um transdutor acionado por um gerador de sinal (oscilador de onda quadrada), como demonstrado na Figura 2. No qual utilizam o sinal das deformações de um cristal piezoelétrico, transversal à sua espessura, que é transmitido no corpo de uma haste acrílica e

depois captado por outro transdutor similar, cuja saída pode ser diretamente exibida em um osciloscópio. A velocidade é determinada a partir da razão da distância percorrida, pelo sinal, pelo tempo. Um método similar de determinar a velocidade de propagação do som por meio de um transdutor é utilizado no artigo de OGLAT *et al.*, (2018) sendo mais focado para determinação da velocidade de uma onda ultrassônica em fluidos (água destilada).

Figura 2 – Esboço do aparelho

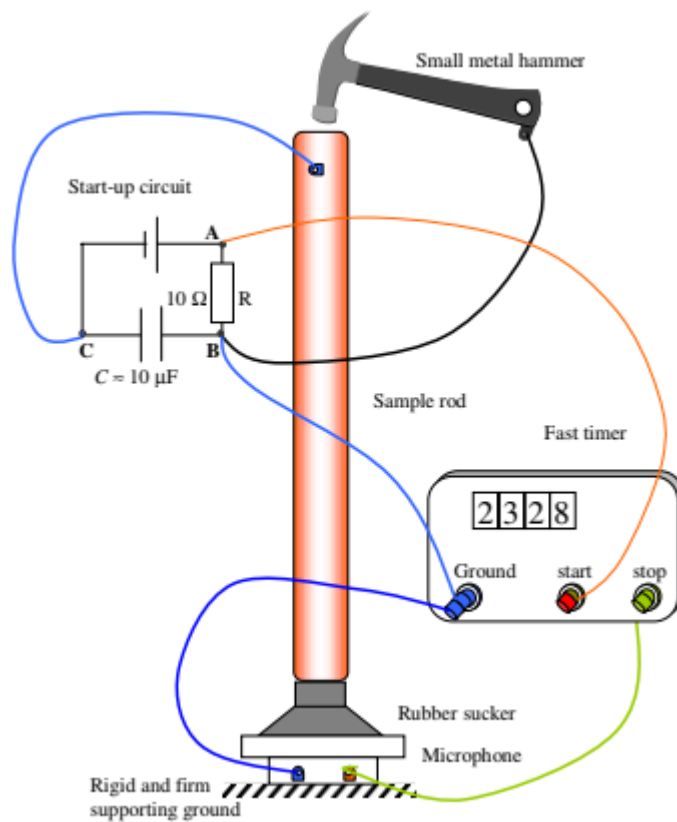


Fonte: Key (2000).

O artigo de Se-Yuen *et al.* (2000) discute dois métodos para calcular a velocidade do som em metais, utilizando uma fonte de tensão, um gerador de sinal e um martelo, na situação em que o martelo atinge a haste metálica e gera um pulso que se propaga ao longo da haste e é refletido, retornando uma função de onda lida pelo osciloscópio. São apresentados possíveis erros nesse procedimento e maneiras de diminuí-los, para cada método apresentado.

No primeiro método feito por Se-Yuen *et al.* (2000), utilizando a abordagem descrita, são adicionados um circuito RC para iniciar um temporizador e uma base de borracha na qual um dos lados apoia a haste e o outro está em contato com um microfone, que tem a função de receber um sinal sonoro, que é emitido da base de borracha ao se contrair e realizar pressão no ar, convertendo o pulso. O microfone é ligado ao temporizador que funciona da seguinte forma: quando o martelo atinge a haste, o contador é iniciado, então o pulso viaja pela haste e chega até a sua extremidade, onde está o aparato de borracha que se contrai e então gera o sinal sonoro recebido pelo microfone, que então, envia um sinal elétrico que para o temporizador. Este procedimento é feito de forma que a haste fique na vertical, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Arranjo experimental utilizado no método 1 por Se-Yuen *et al.* (2000)

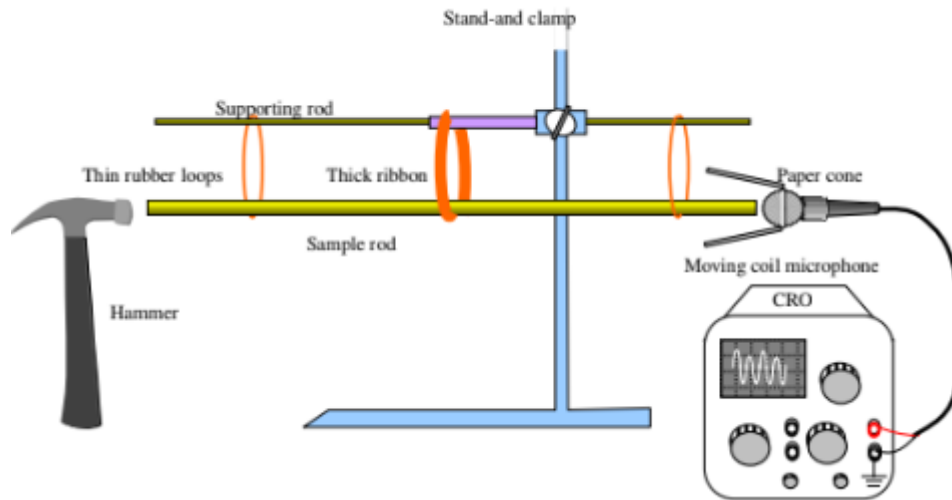


Fonte: See-Yuen *et al.* (2000).

A solução encontrada pelo erro que a base traz, devido ao evidente atraso do sinal, é utilizar barras de diferentes comprimentos, e o erro do atraso devido a indutância do circuito foi minimizado através da utilização de um microfone de cristal.

No segundo método (Figura 4) utilizado por Se-Yuen *et al.* (2000), a haste é suspensa de maneira que fique na horizontal, tem sua continuidade da mesma maneira que o primeiro método, com a diferença de que a barra é permitida ressoar.

Figura 4 – Arranjo experimental utilizado no método 2 por Se-Yuen *et al.* (2000)

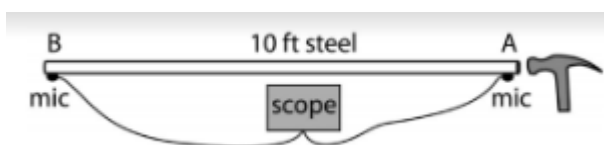


Fonte: See-Yuen *et al.* (2000).

Em seguida, nos resultados e conclusões apresentadas, mostra que o erro de medida do método 1 é de 10% e no método 2, salvo quando o procedimento foi realizado com uma barra de alumínio, o erro de medida foi de 5%. Também faz um ensaio sobre como estudantes podem se envolver com tal atividade.

Huggins (2008), em “Speed of Sound in Metal Pipes: An Inexpensive Lab.” mostra um método para calcular a velocidade do som, a partir da distância e tempo de propagação de um pulso gerado, não se diferenciando dos demais. O artigo descreve um experimento (Figura 5) que utiliza um software que simula um osciloscópio no computador (Mac Scope II), dois microfones, um martelo e um tubo de aço. Os microfones são acoplados nas extremidades do tubo e o martelo é usado para gerar uma colisão em uma delas, no emulador, a partir da função Trigger, se captura diversos picos, que se encontram na ordem de microssegundos, com o tempo médio de propagação, determinado a partir da razão do número de picos detectados pelo tempo total (intervalo temporal entre o primeiro e último pico), é possível determinar a velocidade do som no material estudado.

Figura 5 – Arranjo experimental utilizado por Huggins (2008).



Fonte: Huggins (2008).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Experimentação na ciência *versus* experimentação no ensino de ciências

Há tempos se encontra na área de ensino discussões sobre o papel da experimentação no processo de aprendizagem, porém muito pouco se discute o tratamento que é dado para a prática experimental no ensino básico. A discussão e os pontos levantados por Hodson (1988) em relação às diferenças entre a experimentação científica e a experimentação em sala de aula são pertinentes para se estudar as maneiras de implementar a experimentação em sala de aula. Hodson (1988) levanta o ponto de que a experimentação científica não é a mesma realizada na sala de aula, que elas não se equivalem e têm papéis socialmente diferentes:

O objetivo dos experimentos nas ciências escolares (diferente da ciência em si) não é ajudar o concreto a se tornar abstrato, como os professores geralmente afirmam. Na verdade, o objetivo é dar ilustração e representação concretas a abstrações prévias. Assim, o trabalho em laboratório na escola deveria ser usado para ajudar na exploração e manipulação de conceitos, e torná-los explícitos, compreensíveis e úteis. É a exploração das idéias que constitui o processo de aprendizagem; o experimento apenas fornece a evidência concreta para explorações conceituais posteriores (HODSON, 1988, p. 15).

Hodson (1988) evidencia ainda que a prática experimental de sala de aula tem três objetivos: aprender, ensinar e fazer ciência. Quanto mais o currículo se distancia desses três objetivos, mais a prática experimental de sala de aula se torna defasada.

O estranhamento entre a experimentação em aula e a científica é levantado por Hodson (1988) pelo fato de a prática experimental se manifestar em aula de forma errônea e nada condizente com o método de experimentação científica. Devido a essa distância entre as duas experimentações, Hodson (1988) alerta para alguns fatores prejudiciais para o processo de aprendizagem através da experimentação, como a criação de falsos conceitos e de que a experimentação existe independente da teoria:

Um mito ainda mais danoso, encapsulado no interior da abordagem do aprendizado por descoberta, é o de que a observação e o experimento fornecem dados objetivos, confiáveis e independentes de teorias – a partir dos quais surgem as generalizações e, finalmente, as explicações teóricas. Ao enfatizar a prioridade das observações, muitos currículos de ciências avaliam de forma muito errada as relações entre observações, teorias e experimentos (HODSON, 1988, p. 04).

Com base nisso, Hodson (1988) trabalha a ideia dos três objetivos principais da experimentação no ensino de ciências: (a) aprender ciências; (b) aprendizagem de ciências; (c) fazer ciências.

O primeiro (a) aprender ciências seria a desmistificação da mesma, de que ela ocorre sempre formalmente, através das práticas experimentais os alunos são capazes de descobrir que a ciência é feita por pessoas comuns, que às vezes ela pode dar certo e às vezes não, tornando acessível aos alunos um conhecimento sobre a prática experimental científica, do modo que ela ocorre e que nem sempre é sofisticada.

Em relação à (b) aprendizagem de ciências, Hodson (1988) traz a ideia de três modelos de aprendizagem de ciências: por transmissão, por descoberta e a abordagem construtivista. Em geral na escola vemos o aluno como um receptor de conhecimento passivo, onde ele recebe a informação, mas não sabe onde encaixá-la ou relacionar com o conhecimento que o aluno já possui.

Em contraste com a abordagem tradicional, a construtivista traz a importância de levar em consideração os conhecimentos prévios do aluno, e a ideia de que a aprendizagem é um processo contínuo. Dessa forma, deve-se levar em consideração na aprendizagem de ciências pela abordagem construtivista, fatos como: a visão do aluno, projetar o plano em cima da visão do aluno, propiciar a mudança e aperfeiçoamento da visão do aluno e apoiar as tentativas do aluno de repensar e reconstruir suas visões, em concomitância as visões do professor.

Existem evidências crescentes de que as duas visões (a do aluno e a do professor) podem coexistir, com os alunos usando a sua ciência na vida cotidiana e reproduzindo a ciência “oficial” quando solicitado, na escola. Se for este o caso, precisamos levar em conta uma visão diferente para ensinar e aprender ciência. Uma visão que seja baseada em desenvolver e modificar, e não em substituir, as ideias dos alunos (HODSON, 1988, p. 13).

Já no terceiro objetivo que seria (c) fazer ciências, Hodson (1988) enfatiza que a importância aqui é utilizar os métodos aprendidos pelos alunos, desenvolver e aplicar os processos da ciência para investigar os fenômenos e solucionar problemas, dando seguimento aos interesses escolhidos pelos alunos.

3.2 O papel da experimentação no ensino de física

A premissa de que aulas puramente expositivas não atendem por completo o processo de ensino, já vem sendo desenvolvida, por exemplo, nos de estudos sobre a aprendizagem ativa, que propõe um estudante em ação, a pensar e observar os fenômenos físicos, refletir e discutir com colegas e professores, de modo que o conceito em foco seja apreendido (HENRIQUES; PRADO; VIEIRA, 2014).

Hodson (1988) diz que qualquer método didático demande do aluno uma interação ativa com o conteúdo, está de acordo com a crença de que a manipulação direta com o experimento, *i. e.*, o contato direto com o fenômeno estudado, melhora o aprendizado. A partir da prática da experimentação o estudante pode aprimorar múltiplas habilidades como o trabalho em conjunto, seu protagonismo, sua individualidade, sua aproximação do método científico e sua capacidade de pensar sobre e resolver problemas. Partindo disso, a experimentação pode ser uma estratégia pedagógica capaz de contemplar a aprendizagem ativa, desde que tenha o aluno como protagonista ativo na realização do experimento.

Partindo disso, a experimentação como estratégia pedagógica é capaz de contemplar a aprendizagem ativa, o aluno como protagonista e ativo na realização da experimentação. No trabalho de Coelho (2003), ela traz a experimentação na prática pedagógica de forma aplicada e ilustrada, trazendo abordagens da mesma em sala de aula. Essa autora apresenta o uso da experimentação como uma verificação, ou seja, uma afirmação de um conhecimento que o aluno já possui. O experimento está a serviço do aprendizado da lei ou conceito estudado (COELHO, 2003). Traz ainda o experimento como um comparador de modelos, permitindo uma atividade intelectual ao aluno, como conseguir enxergar um padrão nos modelos físicos (quando houver), como, por exemplo, no estudo de campos magnéticos, elétricos e gravitacionais que caem com o quadrado da distância, e assim conseguir definir por que os modelos se relacionam e no que isso influencia na teoria.

E como comparador de métodos experimentais, onde a teoria apenas serve como suporte para exatidão dos resultados experimentais, pressupondo-se que o aluno já domina a teoria do que está sendo experimentalmente estudado. Por meio dessas abordagens, Coelho acredita ser possível fazer com que o aluno se aproprie das técnicas e métodos científicos:

Compreende-se, então, como as atividades experimentais são enriquecedoras para o aluno, uma vez que elas dão um verdadeiro sentido ao mundo abstrato e formal das linguagens. Elas permitem o controle do meio ambiente, a autonomia face aos objetos técnicos, ensinam as técnicas de investigação, possibilitam um olhar crítico sobre os resultados. Assim, o aluno é preparado para poder tomar decisões na

investigação e na discussão dos resultados. O aluno só conseguirá questionar o mundo, manipular os modelos e desenvolver os métodos se ele mesmo entrar nessa dinâmica de decisão, de escolha, de inter-relação entre a teoria e o experimento (COELHO, 2003, p. 39).

Assim percebemos que tanto Hodson (1988) como Coelho (2003) reconhecem a necessidade de conciliar a teoria e prática, e da importância que a experimentação tem no desenvolvimento da motivação e da participação ativa do aluno durante seu aprendizado.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo será exposto brevemente alguns conceitos de ondas mecânicas e sua propagação em metais, bem como procedimentos adotados para a construção do aparato experimental e uma breve discussão dos instrumentos escolhidos durante a instrumentação.

4.1 Física por trás dos experimentos semelhantes à Speziali *et al.* (1986).

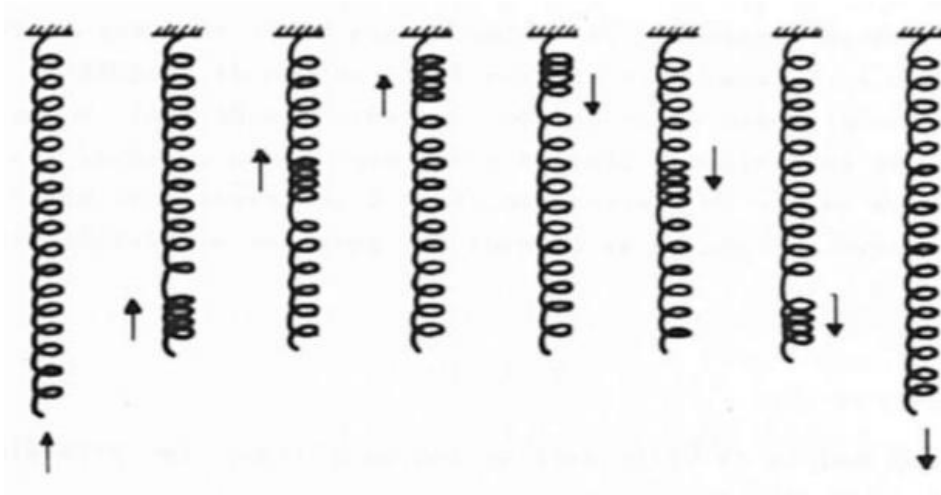
Este trabalho foi inspirado no artigo de Speziali *et al.* (1986) publicado na RBEF, que tem por objetivo medir a velocidade do som (pulso longitudinal), levando em conta um problema do artigo publicado: “*uma barra metálica cai verticalmente sobre uma superfície dura e, devido ao choque, pula para cima. Por que a barra pula?*” (SPEZIALI *et al.*, 1986).

No artigo, Speziali apresenta um modelo construído em resposta da problemática feita, a colisão da barra com uma superfície mais densa gera uma deformação na parte inferior (da barra), que produz um pulso longitudinal de compressão. Este pulso percorre a barra metálica até a extremidade superior, sendo refletido e retornando à extremidade inferior, deste modo fazendo com que a barra volte ao estado inicial antes de colidir, assim a barra exerce uma força contra a superfície que por reação o mesmo gera uma força de sentido contrário na barra, fazendo com que ela salte.

Uma analogia interessante e esclarecedora pode ser feita com uma mola do tipo “SLYNKY” pendurada verticalmente. Estando a mola em repouso dá-se um “toquezinho” para cima na sua extremidade inferior, ou seja, cria-se nela um pulso de compressão. Esta extremidade vai subir um pouquinho e permanecer nesta posição até que o pulso, depois de refletido no extremo superior, volte e a desloque para baixo. No modelo no qual nos baseamos, a colisão da barra com a base é análoga ao “empurrãozinho” que é dado na mola; a ação do pulso sobre a base é equivalente ao deslocamento da extremidade inferior da mola para baixo na volta do pulso (SPEZIALI *et al.*, 1986).

Speziali faz uma analogia com a mola *slinky*, onde efetua-se uma pequena força a ponto dela comprimir, gerando um pulso de compressão que vai percorrer todo o comprimento da mola, que só volta à forma normal, quando o pulso retorna a origem, como pode-se ver na Figura 6, que demonstra a propagação de um pulso longitudinal percorrendo a mola em diferentes instantes.

Figura 6 - Representação da mola *slinky* em diferentes instantes



Fonte: Speziali et al. (1986).

Com isto, basta saber o tempo que o pulso leva para percorrer toda a extensão da barra, ser refletido na sua extremidade superior e voltar, *i. e.*, o tempo de o pulso percorrer duas vezes o comprimento da barra. Dessa forma pode-se calcular a velocidade do som, inserindo o comprimento da barra e o tempo de propagação, objeto de medida, no modelo de Movimento Uniforme.

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{l}{(t/2)} = \frac{2l}{t} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

4.2 Aspectos teóricos clássicos e básicos a respeito da propagação do som em metais

Uma onda é a representação de um movimento oscilatório, *i. e.*, oscilação propagada num determinado espaço. Existem quatro tipos de ondas: mecânicas, eletromagnéticas, de matéria e ondas gravitacionais. As ondas mecânicas caracterizam-se por dependerem de um meio (sólido, líquido ou gasoso) para se propagarem, ou seja, não se propagam no vácuo, sua propagação se dá a partir de vibrações de moléculas ou átomos neste meio, sendo diferenciadas por duas características, dependendo do seu tipo de vibração: longitudinais e ou transversais.

O som é uma onda mecânica longitudinal, sua propagação depende de um meio material para acontecer, sendo que a sua velocidade varia de um meio para outro, *e. g.*, no ar é de 343,2 m/s (ZUCKERWAR, 2002), enquanto na água destilada é de 1482,9 m/s (WILSON, 1959), ambas a temperatura ambiente de 20°C e à uma pressão de 1 atm. Felizmente pode-se calcular a rapidez sonora no dado meio, a partir de algumas características do mesmo, uma

forma tradicional de fazer isso, para metais, é através da densidade volumétrica, que representa quantidade de matéria por unidade de volume e do módulo de Young. Assim serão calculados os valores de referência, para comparação com os obtidos na experimentação deste trabalho.

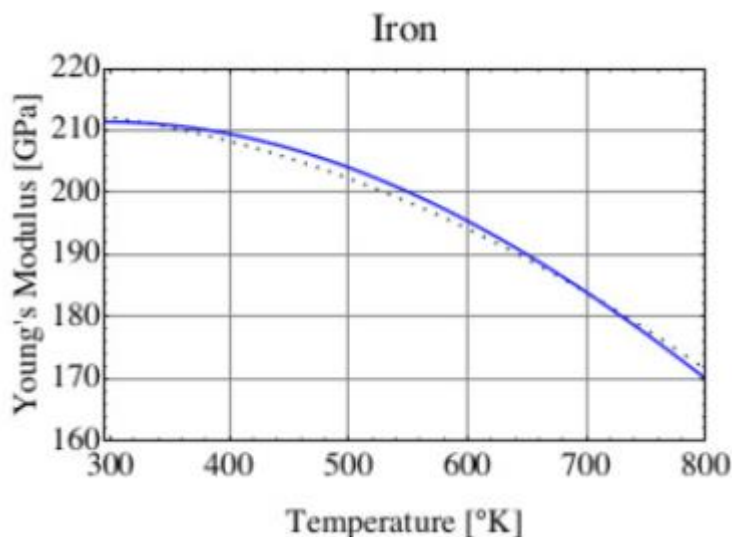
$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \text{ [m/s]} \quad (2)$$

Sendo Y é o módulo de Young e ρ a densidade volumétrica do material.

O módulo de Young é interpretado fisicamente como a tensão necessária, que se deve aplicar numa barra (sendo ela um material elástico) para que dobre o seu comprimento (tração), ou para reduzi-lo (compressão) na mesma proporção Hessel *et al.* (2016). Este módulo é inversamente proporcional ao coeficiente de elasticidade do material, sendo assim uma característica intrínseca do mesmo.

É comum encontramos propriedades físicas que dependem da temperatura, e o módulo de Young é uma delas, porém neste caso a relação não é trivial, ela está relacionada, em metais, com a sensibilidade da função trabalho dos elétrons a mudanças na temperatura, com demonstrado por Rahemi (2014). A Figura 7 representa a variação do módulo de Young em função da temperatura, e como já sabido a densidade de um material metálico, também possui dependência com a temperatura.

Figura 7 - Gráfico da dependência do módulo de Young pela temperatura no Ferro.

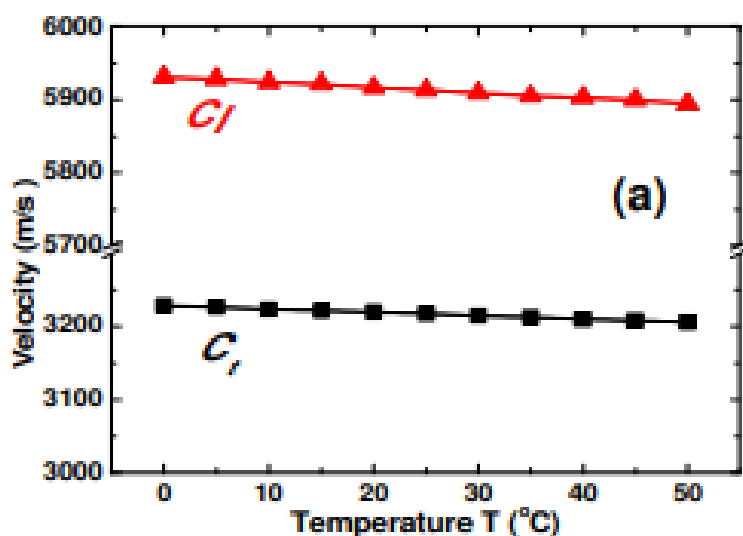


Fonte: Rahemi *et al.* (2014).

A velocidade do som em um metal dependerá das relações citadas no parágrafo anterior diante de uma variação térmica, no nosso caso, esta variação térmica é considerada pequena, assumido que o experimento seja executado em temperatura ambiente.

Than et al (2005), apresentaram um estudo sobre a variação da velocidade de uma onda longitudinal e de uma onda de cisalhamento no aço carbono 1018, na Figura 7 é representado essa a variação, a partir deste trabalho pode-se perceber que a variação da velocidade do som em termos da temperatura é percentualmente pequena, da ordem de 0,36% para um delta de temperatura de 30 °C, em torno da ambiente (25 °C), logo não se esperar complicações devido a variações na temperatura ambiente, durante a experimentação.

Figura 8 – Efeito da temperatura na velocidade longitudinal da onda ultrassônica C_l (linha vermelha) para o aço carbono 1018.



Fonte: Thanh *et al.* (2015).

4.3 Plataforma Arduino

O *Arduino* é um projeto eletrônico de plataforma aberta (*open-source*), com a filosofia de fornecer um *hardware* (circuito eletrônico) e um *software IDE* (ambiente de desenvolvimento integrado) fácil de usar. Tem o objetivo de fornecer uma plataforma em que qualquer um (leigo ou não em programação e/ou eletrônica) possa produzir um projeto interativo. O *hardware* é composto por uma placa eletrônica, placa *Arduino*, que contém um microcontrolador (possui quase todas as funcionalidades de um pequeno computador) que realiza pequenas tarefas que são definidas pelo código criado pelo *software* do *Arduino*, que para o usuário se assemelha a um editor de texto, no qual os comandos são escritos sequencialmente (um comando ou comentário por linha).

A placa *Arduino* identifica características do meio em que se quer atuar através de sensores (luz, temperatura, umidade, etc.) e responde ao meio através de atuadores (motores, relés, lâmpadas, etc.). Vem sendo desenvolvido desde 2005 e a partir desta década (2011) tem

sido proposto como ferramenta de ensino, nas áreas de exatas e engenharias, por vários grupos entre eles da PUC-SP, UFRGS (CAVALCANTE; TAVOLARO, 2011), UFRJ (SOUZA, 2011); (CORDOVA; TORT, 2016); (DO AMORIM; DIAS;SOARES, 2015), UPF (DIONISIO; SCHARDON SPALDING, 2017), UFSC (SILVEIRA, 2016), IFRN (SILVA, 2015), UNIPAMPA (ANTONIO DWORAKOWSKI *et al.*, 2016) e trabalhos em mestrados profissionais (CORDOVA; TORT, 2016); (SILVEIRA, 2016); (ANTONIO DWORAKOWSKI, 2016). Contudo outras áreas do conhecimento podem se beneficiar desta plataforma, como exemplo citamos a área da moda (BUECHLEY; EISENBERG, 2008) e com um pouco de imaginação, o ensino em todas as áreas do conhecimento poderão fazer uso desta plataforma. A plataforma *Arduino* permite a realização concreta de um modelo teórico, propiciando um aprendizado mais significativo.

4.4 Instrumentação

Este trabalho apresenta uma modificação da proposta de medida da velocidade do som apresentada por Speziali *et al.* (1986). Ao invés de utilizar um circuito RC acoplado ao experimento, e medir indiretamente o tempo através da tensão no capacitor, é proposto aqui que essa medição seja feita através da plataforma *Arduino*, com o intuito de facilitar a coleta de dados e permitir uma discussão maior sobre o fenômeno.

A ideia básica é calcular a velocidade do som, através dos seguintes procedimentos: soltar a barra de metal sobre uma base rígida e condutora (Figura 9); quando a barra atinge a base, inicia-se uma onda de choque, compressão da extremidade (a) que se chocou com a base, que através de uma deformação elástica se propaga ao longo da barra até a extremidade (b) oposta. Encontrando um meio de densidade muito menor (o ar, na extremidade (b)), uma fração significativa é refletida de volta para a barra (uma pequena fração é transmitida para o ar), e quando esta onda refletida chega à extremidade que está em contato com a base, provoca uma nova colisão elástica entre esta extremidade e a base, *i. e.*, a barra deixa de estar em contato com a base por um breve instante. Portanto a barra fica em contato com a base pelo período de uma oscilação, isto é, tempo correspondente da onda de choque se propagar da extremidade de contato (a), até a extremidade livre (b) e retornar à extremidade de contato (a).

Este tempo de contato corresponde ao dobro do tempo de a onda percorrer toda a barra e, portanto, fazendo a razão do comprimento da barra pelo metade do tempo medido, tempo de propagação, obtemos de forma indireta a velocidade de propagação da onda na barra.

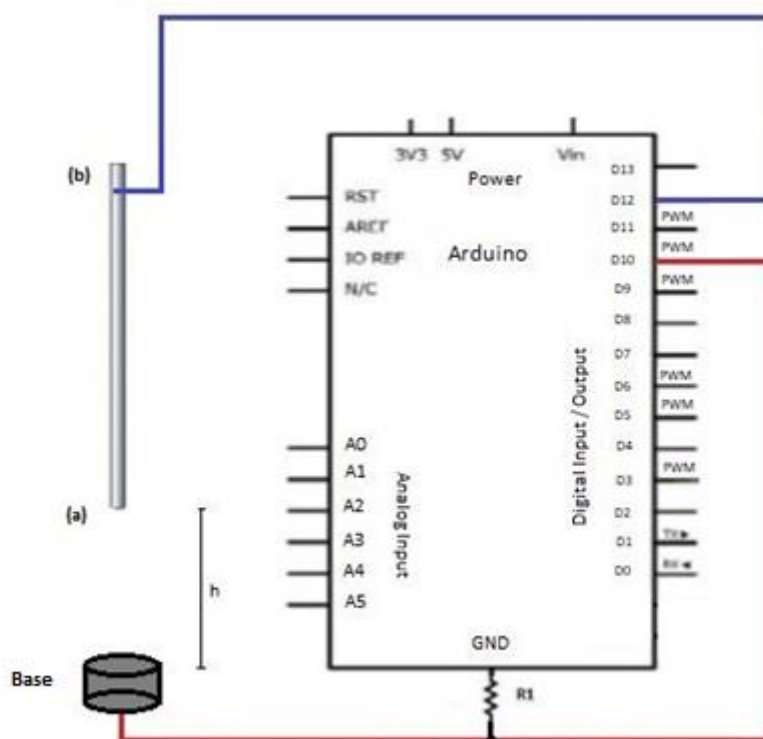
Nota-se que, desta forma, a barra fica colidindo repetidas vezes contra a base, e após toda energia ser dissipada, principalmente por processos de atrito internos à barra, ela repousa sobre a base. O tempo de contato da barra com a base metálica é obtido através da medida da duração do tempo de contato elétrico da barra com a base, Figura 9, e para isso utiliza-se a plataforma *Arduino*.

O aparato experimental constitui-se dos seguintes componentes:

- Barra de metal (objeto de estudo);
- Base de metal;
- Resistor $10k\Omega$ (proporcionar um nível lógico definido na entrada do *Arduino*);
- *Arduino*;
- Computador.

A partir dos materiais foi construído o circuito demonstrado a seguir:

Figura 9 - Circuito para a captura do tempo do pulso longitudinal, no diagrama corresponde ao *Arduino* UNO.



Fonte: Autor (2019).

A barra de metal na qual se pretende observar a velocidade do som, é maciça e de geometria cilíndrica, ligado ao pino digital 12 do *Arduino*, que é configurado como saída de sinal (*Output*) e o pino 10, como entrada de sinal (*Input*), onde é ligado paralelamente um resistor e em série a base de metal.

A coleta de dados consiste em largar sistematicamente a barra metálica de alturas pré-definidas na base de metal, o contato da barra com a base, provoca um curto entre os pinos, possibilitando que o sinal emitido no pino 12 chegue ao pino 10. O pino digital 10 é conectado ao GND por intermédio de um resistor de $10\text{k}\Omega$ (resistor *pull down*), para minimizar as flutuações na entrada, geradas nesse pino, diminuindo assim os ruídos na leitura.

Conforme descrito acima, a barra colide repetidas vezes com a base, gerando vários pulsos elétricos (o tempo de duração destes pulsos correspondem ao tempo de contato da barra com a base), no entanto, somente o primeiro pulso interessa neste experimento, portanto propomos a aplicação de um filtro digital, para descartar os demais.

Para medir o tempo de contato, foi utilizado a função *pulseIn*, realizando a leitura da largura do pulso durante o contato (curto), a função *pulseIn* possui de dois a três argumentos, o primeiro argumento é o número do pino, o terceiro é o que chamamos de *timeout*, *i. e.*, o tempo limite para que o estado esperado comece/termine, o segundo é o valor (ou estado, *HIGH* - alto, *LOW* - baixo) que a função irá vigiar, *i. e.*, quando esse valor é lido no pino escolhido a função (*pulseIn*) começa a cronometrar em microssegundos, quando o estado do pino muda, o cronômetro pára e a função retorna o valor, em outras palavras esse tempo que a função retorna é o período de uma oscilação.

O filtro digital desempenha duas funções no processo de medição, em uma delas ele seleciona apenas o primeiro ponto, para tal sempre que um pulso válido é detectado o filtro congela as medidas, *i. e.*, para de vigiar o nível lógico da entrada 10 com a função *pulseIn*, durante um segundo, assim todos os demais pulsos gerados serão descartados. Essa seleção foi implementada, pois, ao executar o experimento notou-se que apenas o primeiro choque entre a barra e a base fornece medidas sistemáticas, bem provavelmente isso tenha relação com a inclinação da barra, visto que do segundo choque em diante ela não se encontra mais na vertical, em relação à área de choque da base, e tão pouco pode-se controlar seu ângulo de inclinação.

A outra função do filtro é selecionar apenas os tempos de contato que estejam dentro de um intervalo de corte, que deve ser escolhido em termos do tamanho da barra usada e da velocidade do som no seu material, obtido por uma referência confiável. Essa etapa é importante, pois descarta possíveis ruídos elétricos e curtos acidentais, *e. g.*, quando sem querer se deixa a barra encostar na base, para nosso caso, o intervalo é de $100\ \mu\text{s}$ à $1000\ \mu\text{s}$, e foi escolhido considerando o menor e o maior tempo esperado, teoricamente obtidos, sendo o primeiro da ordem de $200\ \mu\text{s}$, para a menor barra, de 0,5 m, e o segundo é da ordem de $800\ \mu\text{s}$, para a maior barra, de 2,0 m.

O intervalo usado no filtro deve abranger os tempos esperados para todos os objetos estudados, bem como possíveis flutuações nas medidas, por exemplo, o máximo erro aceito pelo filtro, com o intervalo especificado no parágrafo anterior, é de no mínimo 25% para erros positivos com a haste de 2,0 m, para todos os outros casos aqui estudados esse filtro aceitará erros superiores.

A intenção do filtro digital não é excluir por completo os erros associados a medição, pelo contrário acredita-se que estes fazem parte do processo experimental e são potenciais fontes de debates produtivos em aula, como, *e. g.*, pode-se fazer uma abordagem estatística analisando o desvio padrão das medidas, e discutir o caráter aleatório e sistemático dos erros. Nesse sentido o filtro foi planejado apenas para otimizar e tornar possível o processo de medição, e além deste apresentado nenhum outro filtro será usado, em outras palavras, todos os pontos coletados serão utilizados na análise, *i. e.*, no cálculo da velocidade.

Durante o desenvolvimento do aparato, foi utilizado duas Bases (Figura 10) de massas diferentes, com a finalidade de verificar qual destas teria uma característica mais adequada para reprodução do experimento.

Figura 10 – Bases de metal utilizadas na construção do aparato.



Fonte: Autor (2019).

A Base 1 pode ser visualizada na parte superior da Figura 10, que corresponde a um fragmento de uma chapa metálica (aço) de 2,1 cm de espessura e massa de 1,5 kg. A Base 2 pode ser visualizada na parte inferior da Figura 10 e corresponde a um segmento de trilho com massa de 15,6 kg.

5 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir é apresentado uma discussão sobre o conjunto de dados obtidos a partir do aparato experimental, *i. e.*, os tempos médios de propagação de um pulso longitudinal, medidos em quatro hastes de aterramento de diferentes comprimentos, em um tubo de alumínio e em um tubo de cobre, não se restringindo a um único material e forma geométrica. Estes tempos são utilizados no modelo de movimento uniforme para calcular a velocidade de propagação do som nos materiais estudados.

Como já mencionado, também pode se obter, indiretamente, a velocidade do som em um material através do seu módulo de Young e sua densidade, forma nada análoga à sugerida, e que será utilizada como parâmetro de comparação, que será usado como o valor padrão. Ainda com intuito de validar, ou avaliar o processo de medição, foram usadas técnicas mais sofisticadas de para analisar a propagação do pulso na haste de aterramento, os resultados deste processo também serão apresentados.

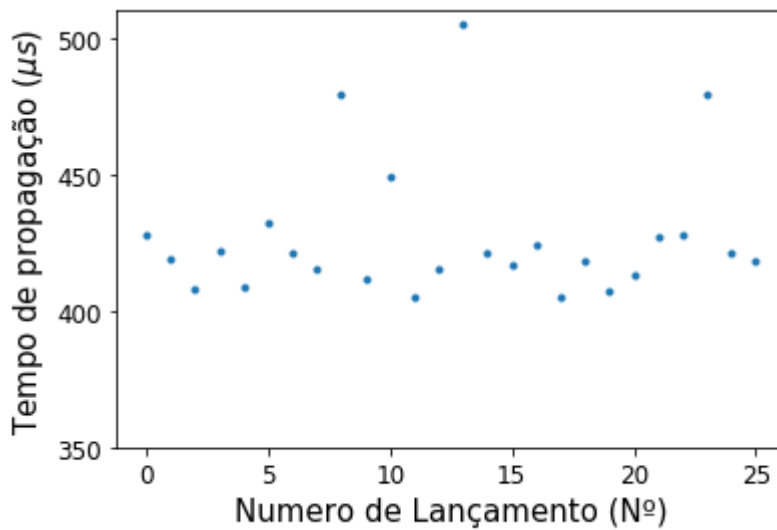
5.1 Hastes de Aterramento

A haste de aterramento (obtido em lojas de material de construção) utilizadas possuem um formato cilíndrico de raio de 12,7 mm, e são feitas de aço 1020, que normalmente é constituído por ferro (99.08 - 99.53 %), carbono (0.17 - 0.23 %), manganês (0.30 - 0.60 %), fósforo (≤ 0.040 %) e enxofre (≤ 0.050 %). A densidade volumétrica deste material é de $7,87 \text{ g/cm}^3$ e seu módulo de Young (inverso da elasticidade) é de 186 GPa (MatWeb, 2019). A velocidade do som neste sólido pode ser calculada a partir destes fatores, logo temos:

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} = 4,861 \text{ km/s} \quad (3)$$

Foram usadas na experimentação quatro hastes de aterramento de tamanhos diferentes, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m, sendo realizado vinte e cinco lançamentos de forma sistemática (descrita na metodologia deste mesmo trabalho), de cinco diferentes alturas e em duas bases distintas, com cada barra. Serão mostrados os dados de tempo de propagação e velocidade do pulso no interior da barra, obtidos na execução experimento. O fato de se usar hastes de diferentes tamanhos possibilita averiguar que a velocidade de propagação do som é independente do tamanho do material utilizado, dependendo quase que exclusivamente de sua constituição.

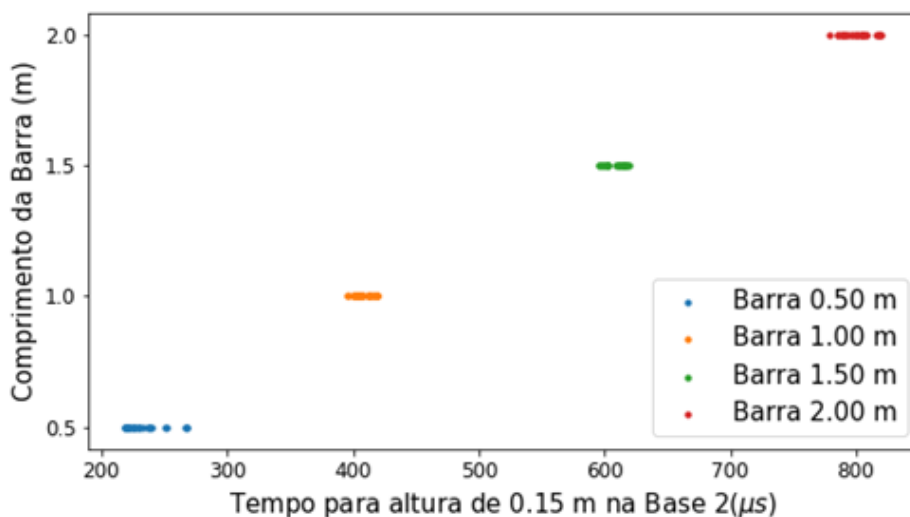
Figura 11 - Gráfico de altura de 5cm para barra de 1 metro da Base 1



Fonte: Autor (2019).

A Figura 11 representa, na forma de um gráfico, os tempos coletados nos vinte e cinco lançamentos feitos à altura de 5 cm com a haste de 1 m de comprimento na base 1, e são os mais dispersos obtidos durante toda experimentação, foi atribuído a esta dispersão, possíveis erros experimentais, tais como: a haste atingindo uma região não homogênea da base, a haste ter sido lançada um pouco inclinada, ruído elétrico e outros.

Figura 12 - Gráfico do comprimento das barras pelo tempo de propagação



Fonte: Autor (2019).

A Figura 12 apresenta um gráfico que relaciona os comprimentos das hastes com o tempo coletado, lembrando que esse é tempo necessário para o pulso ir e voltar na haste, duas vezes o comprimento da mesma. O conjunto de dados apresentado no gráfico da Figura 12,

foram coletados durante lançamentos realizados à altura de 15 cm, com as quatro hastes, todos realizados na Base 2, cada ponto no gráfico representa um lançamento.

A diferença entre os tamanhos das hastes, no mínimo de 25% entre a de 2,0 m e a de 1,5 m, reflete na diferença dos tempos mensurados para cada uma, e conseqüentemente percebe-se a formação de quatro grupos distintos no gráfico da Figura 12. Do canto inferior esquerdo para o superior direito, o primeiro grupo (pontos azuis) refere-se à haste de 0,5 m, o segundo (pontos amarelos) à haste de 1,0 m, o terceiro (pontos verdes) à haste de 1,5 m e o último (pontos vermelhos) à haste de 2,0 m, vale ressaltar que a largura temporal dos grupos fornece um indicativo da dispersão nas medidas.

Ainda observando o gráfico da Figura 12, pode-se constatar que a velocidade do pulso gerado nas hastes de aterramento independe do tamanho da haste, *i. e.*, há uma relação linear entre o comprimento da haste e o tempo coletado, isso corrobora com pressuposto do modelo escolhido de velocidade constante.

Todos resultados obtidos com as hastes estão representados de forma resumida nas nos quadros a seguir, uma para os lançamentos feitos na Base 1 e outra para os feitos na Base 2, nelas estão dispostas as médias aritméticas das velocidades e as suas dispersões, que indicam os erros aleatórios¹ das medidas. É atribuído ao erro aleatório o caráter imprevisível dos lançamentos e possíveis ruídos provocados fontes de mal contato e, ou outros fatores.

As velocidades foram calculadas pela razão entre o comprimento da haste e metade do tempo mensurado, e estão dispostas em termos do tamanho da haste, colunas, e da altura dos lançamentos, linhas. A dispersão das medidas, ou erro aleatório, é expressa por de duas vezes o desvio padrão das mesmas (σ), calculado pela relação abaixo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (4)$$

Onde N é o número total de medidas, x_i é valor da i -ésima medidas e \bar{x} é o valor médio das medidas.

Nos extremos inferior do Quadro 2 e do Quadro 3 encontram-se as médias gerais das velocidades por hastes, e nos extremos direitos as médias gerais por altura de lançamento, e na última célula dos quadros tem-se a média velocidade encontrada com a Base 1 no Quadro 2, e com a Base 2 no Quadro 3.

¹ Erro aleatório é a componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível (VIM, 2012).

Quadro 2 - Velocidade do som e seus desvios para a Base 1 em diferentes alturas

Altura (cm)	Haste de 0,5 m (km/s)	Haste de 1,0 m (km/s)	Haste de 1,5 m (km/s)	Haste de 2,0 m (km/s)	Valores Méd. (km/s)
5	$4,6 \pm 0,5$	$4,4 \pm 0,7$	$4,8 \pm 0,3$	$4,9 \pm 0,2$	$4,7 \pm 0,4$
10	$4,4 \pm 0,4$	$4,5 \pm 0,3$	$4,9 \pm 0,9$	$5,0 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,4$
15	$4,5 \pm 0,3$	$4,5 \pm 0,5$	$4,9 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,2$	$4,7 \pm 0,3$
20	$4,5 \pm 0,3$	$4,6 \pm 0,4$	$4,8 \pm 0,3$	$5,0 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,3$
25	$4,6 \pm 0,2$	$4,6 \pm 0,5$	$4,9 \pm 0,3$	$5,0 \pm 2,8$	$4,7 \pm 0,9$
30	$4,6 \pm 0,3$	$4,8 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,2$	$4,85 \pm 0,2$
Val. méd.	$4,5 \pm 0,3$	$4,6 \pm 0,4$	$4,9 \pm 0,4$	$5,0 \pm 0,6$	$4,7 \pm 0,4$

Fonte: Autor (2019).

Quadro 3 - Velocidade do som e seus desvios para a Base 2 em diferentes alturas

Altura (cm)	Haste de 0,5 m (km/s)	Haste de 1,0 m (km/s)	Haste de 1,5 m (km/s)	Haste de 2,0 m (km/s)	Val. Méd. (km/s)
5	$4,2 \pm 0,4$	$4,4 \pm 0,3$	$4,7 \pm 0,2$	$4,7 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,3$
10	$4,2 \pm 0,6$	$4,6 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,2$	$4,6 \pm 0,2$
15	$4,3 \pm 0,5$	$4,7 \pm 0,2$	$4,9 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,2$
20	$4,3 \pm 0,3$	$4,7 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,1$
25	$4,3 \pm 0,4$	$4,8 \pm 0,2$	$4,9 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,2$
30	$4,3 \pm 0,4$	$4,8 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,3$	$5,0 \pm 0,1$	$4,8 \pm 0,2$
Val. Méd.	$4,3 \pm 0,4$	$4,7 \pm 0,2$	$4,9 \pm 0,2$	$4,9 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,2$

Fonte: Autor (2019).

Pode-se averiguar que os dados coletados na Base 1, possuem uma flutuação maior em relação aos obtidos com a Base 2, pois a dispersão média encontrada para a Base 1, apresentada na última célula do Quadro 2, é de 0,4 km/s. Enquanto para a Base 2, na última célula do Quadro 3, é de 0,2 km/s, portanto conclui-se que a Base 2 é em média 2,0 vezes mais estável do que a Base 1, acredita-se que essa diferença aconteça por conta da diferença de massa entre as bases, lembrando a Base 1 possui uma massa de 1,55 kg enquanto a Base 2 massa de 15,6 kg.

Percebe-se que no lançamento de 25 cm da haste de 2 metros na Base 1 apresenta uma dispersão da ordem de 50% do valor obtido, isto se deu por conta de um ponto muito longe da média do grupo, porém ressalta-se que durante a análise não foi feita nenhuma filtragem no dados, ainda que este decorra de erros durante a medição, pois as filtrações podem mascarar a precisão do experimento, se fosse feito um filtro neste ponto a razão de estabilidade da Base 2 em relação a Base 1 seria de 1,6.

O intuito de fazer diversas medidas com o mesmo material, variando significativamente a massa da base, o tamanho das hastes e as alturas de lançamento, foi o de investigar a melhor condição de reprodução do experimento, precisão e acurácia, *i. e.*, as condições que minimizam o erro aleatório, indicado pela dispersão dos dados, e o erro sistemático², indicado pelo desvio percentual em relação ao valor padrão.

A partir dos dados obtidos e calculados, seria indicado a utilização de uma Base muito mais massiva que o objeto lançado, por gerar valores mais estáveis, quanto a haste, indica-se uma de 1,0 m à 2,0 m de comprimento, e alturas de lançamento entre 10 cm e 25 cm, visto que os dados para estas condições, apresentam menores dispersões da ordem de 0,2 km/s, e um bom erro sistemático menor que 0,1 km/s, ver Quadro 3.

Pode-se dizer que os dados obtidos, com estas condições, concorda com a literatura, apresentado um erro sistemático de 1,2 % e um erro aleatório de 4,1%, além disso percebe-se que o erro aleatório domina, *i. e.*, ele é significativamente maior que o sistemático, o erro absoluto, calculado pela raiz quadrada da soma dos quadrados outros dois erros, é da ordem de 0,2 km/s ou 4,2%.

Como já fora mencionado, a velocidade do som em metais possui uma dependência com a temperatura, e nesse sentido realizou-se uma coleta para verificar a relevância dessa dependência, efetuando o aquecimento de uma das hastes de aterramento, a variação no tempo de propagação do pulso foi insensível a uma variação de temperatura de aproximadamente de

² Erro sistemático é a componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível (VIM ,2012).

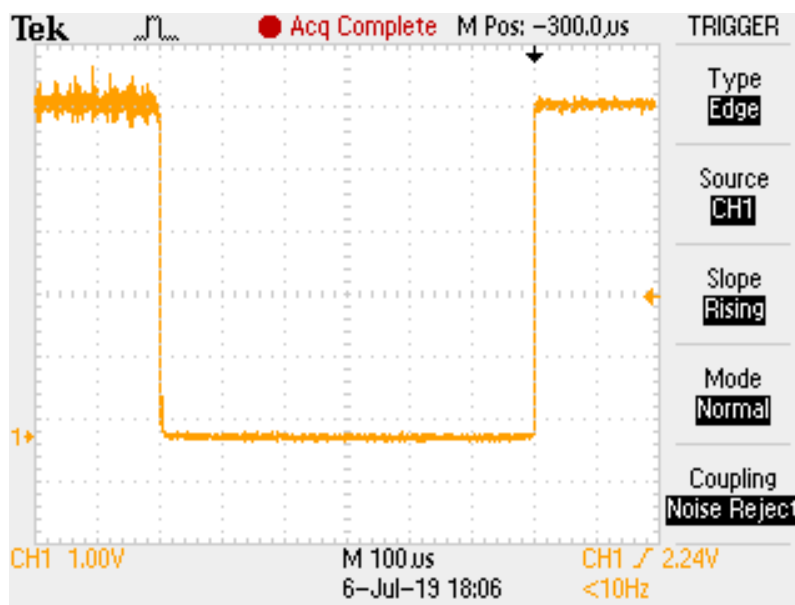
40 °C, por imperceptível entende-se que a variação temporal foi bem menor que a dispersão, logo conclui-se que a variação da temperatura ambiente não deve produzir variações significativas nas medidas, concordando do encontrado por Thanh *et al.* (2015).

5.2 Validando o método proposto por meio de outros métodos

Visando determinar o tempo de propagação do pulso, de forma mais confiável para comparar com os valores já obtidos pela plataforma *Arduino*, foram feitos testes com um osciloscópio que possui resolução e precisão superiores à da instrumentação proposta.

A Figura 13, apresenta uma das imagens feitas a partir da função *trigger* (captura de tela) do osciloscópio, onde o tempo de contato da haste de 1,5 m com a base, num lançamento da altura de 30 cm, foi similar ao obtido com a plataforma *Arduino*, o que corrobora com os dados apresentados acima, na qual no lançamento da altura de 30cm na Base 2 foi de 603 microssegundos e o valor obtido no osciloscópio é de 600 microssegundos.

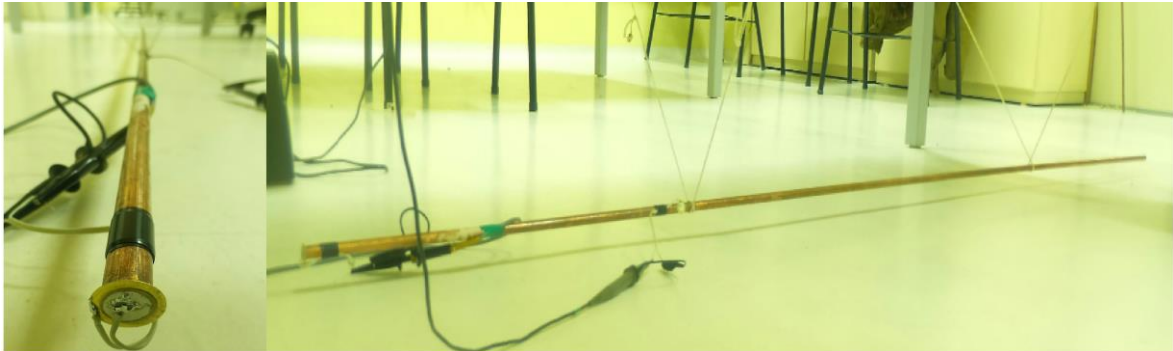
Figura 13 – Captura de tela (*Trigger*) do lançamento da haste na Base 2, mostrando o tempo de contato.



Fonte: Autor (2019).

Através de uma variante do experimento, foi realizado um estudo com um piezoelétrico acoplado em um extremo da haste de aterramento de 2 metros, que foi pendurar como demonstrada na Figura 14, para gerar o pulso na haste, foram realizadas pancadas com um martelo na extremidade contrária à do piezo.

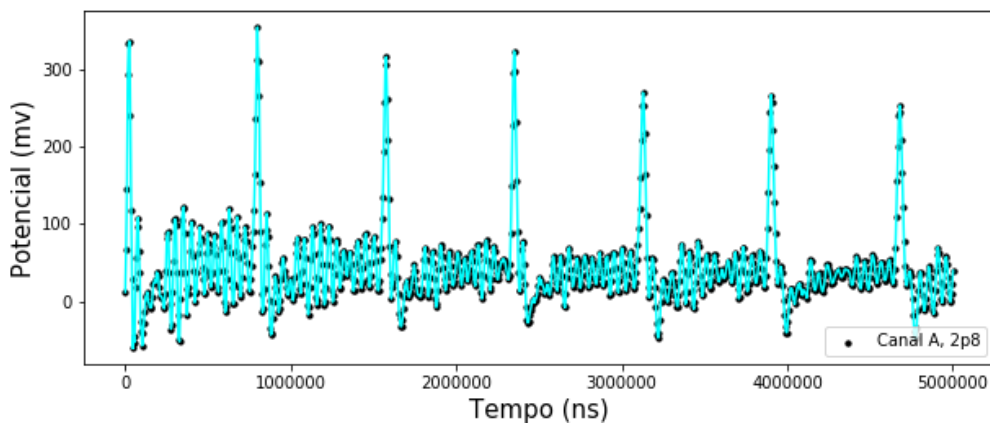
Figura 14 - Haste de aterramento com Piezo elétrico acoplado e pendurada



Fonte: Autor (2019).

A Figura 15, mostra o sinal gerado pelo piezo elétrico devido à propagação do pulso na haste ao longo do tempo, entende-se que os picos mais intensos representam o sinal gerado pelo piezo quando o pulso longitudinal chega na sua extremada, há diversos picos, sete na Figura 15, pois o pulso é refletido nas extremidades da haste, de modo que a diferença temporal entre dois picos é o tempo que o pulso leva para ir e volta na haste, o que neste caso equivale a 4 m.

Figura 15 - Imagem dos pulsos gerados pelo cristal piezoelétrico referente as ondas mecânicas propagando na haste.



Fonte: Autor (2019).

5.3 Tubo de Alumínio

Para verificar o método proposto em um metal diferente ao aço, utilizou-se um tubo de alumínio de 10 milímetros de diâmetro e um metro de comprimento (Figura 16), assumiu-se que o tubo é composto de liga 6063-T5 que possui uma densidade volumétrica de $2,7\text{g/cm}^3$ e um módulo de Young de 68.9 GPa (MATWEB, 2019), o que resulta em uma resultando em velocidade de propagação de 5,052 km/s.

Com este material de estudo foram realizadas 25 medidas de duas alturas distintas (10 cm e 30 cm) na Base 2, com o aparato experimental sugerido na seção 4.4, Figura 9.

Figura 16 -Tubo de alumínio.



Fonte: Autor (2019).

No quadro a seguir são mostrados os valores das médias dos tempos obtidos, das médias de velocidade calculadas e suas respectivas dispersões, para às duas alturas estudadas, além disso, são apresentados os erros sistemático, aleatório e absolutos em relação ao valor padrão.

Quadro 4 - Velocidade do som e seus desvios para o tubo de alumínio

Altura (cm)	Tempo médio (μs)	Velocidade Exp. (km/s)	Erro sist. %	Erro ale. %	Erro asb. %
10	$389,7 \pm 24,4$	$5,1 \pm 0,4$	1,0 %	7,9 %	8,0 %
30	$392,0 \pm 18,2$	$5,1 \pm 0,2$	1,0 %	4,0 %	4,1 %

Fonte: Autor (2019).

5.4 Tubo de Cobre

O tubo de cobre utilizado tem 51,2 cm de comprimento, sendo sua densidade $8,93\text{g/cm}^3$ e um módulo de Young de 110 GPa (MATWEB, 2019), onde a velocidade de propagação neste material é de 3,51 km/s. Foi feito um processo similar aos dos outros

materiais de estudo, no qual foram realizadas 25 medidas para o tubo de cobre, em três alturas diferentes, 10 cm, 20 cm e 30 cm.

Durante o processo de medidas, notou-se que ao fazer lançamentos, o tubo se deformava ao colidir com a base, por ser um material maleável. Durante a coleta de dados o tempo de propagação do pulso, variava gradativamente de 200 microssegundos a 470 microssegundos. Com base nisto, foi feita medidas simples, com 25 lançamentos, onde que após cada medida foi verificado se há deformação no tubo de cobre, caso houvesse era desfeita a deformação obtida com o lançamento, para assim tentar obter uma similaridade dos dados, os resultado obtido nesse processo estão sumarizados no Quadro 5.

Quadro 5 - Velocidade do som e seus desvios para o tubo de cobre

Altura (cm)	Tempo médio (μ s)	Velocidade Exp. (km/s)	Erro sist. %	Erro ale. %	Erro asb. %
10	331,8 \pm 29,4	3,1 \pm 0,2	11,7 %	5,7 %	13,0 %
20	315,6 \pm 38,2	3,2 \pm 0,6	8,8 %	17,1 %	19,2 %
30	319,4 \pm 12,6	3,2 \pm 0,2	8,8 %	5,7 %	10,5%

Fonte: Autor (2019).

A hipótese levantada para este caso, é que a deformação provocada pelo choque, seja a responsável pelo aumento no tempo medido, em relação ao esperado, sabendo que a deformação possui uma relação com a maciez do material e com intensidade do impacto, procurou-se o material mais macio do laboratório com um formato propício para o experimento. O material encontrado foi uma barra da liga Chumbo e Estanho (60% de Sn e 40% de Pb), que foi lançada de duas alturas bem distintas. O que se observou com esse teste foi uma diferença da ordem de 23% na média do tempo coletado em cada altura, vale ressaltar que a deformação da barra for sempre desfeita antes de cada lançamento. A princípio esse resultado reforça a hipótese de que a deformação é a responsável pelo aumento do tempo de medida, e a intenção é que este problema venha a ser estudado em um futuro próximo, neste momento é sugerido evitar materiais muito macios.

6 CONCLUSÃO

A partir da proposta de montar um recurso semi automatizado para determinação da velocidade do som em metais do formato de barra ou tubo, foi possível identificar que algumas ações necessitam de uma atenção especial, no sentido de minimizar os erros para obter um resultado mais fidedigno, por exemplo, a escolha do material da barra ou do tubo, em termos da sua maciez, onde prefere-se os mais rígidos, a escolha da base onde serão lançados as barras ou tubos, onde deve preferir materiais rígidos com uma massa muito maior do que a da barra ou tubo escolhido. Também deve atentar a escolha do tamanho da barra ou do tubo, a escolha das alturas de lançamento.

Com base nos resultados apresentados nos quadros 2 e 3, sugere-se realizar este experimento com hastes de aterramento de 1,0 m a 2,0 m de comprimento e alturas de lançamento em torno de 10 cm a 25 cm, porém por questão de comodidade, na execução do experimento e no transporte do mesmo, indicam-se hastes de 1,0 m a 1,5 m. Divergências menores que 5% entre valores obtidos e os calculados teoricamente ou obtidos em tabelas, reforçam a efetividades desta proposta de prática de determinação de velocidade do som em barras metálicas (de aço).

Foi mostrado que esta prática possui potencial para aplicação no Ensino Médio, uma vez que ela possibilita a medição indireta da velocidade de som em um sólido condutor, utilizando simplesmente a relação da distância com o tempo, modelo de Movimento Uniforme, que é familiar aos estudantes desde a primeira série do Ensino médio. No Apêndice 3 segue uma proposta de atividade que pode ser realizada no ensino médio, a qual já foi aplicada em turmas de terceiro ano do Ensino Médio, resultando apresentado no VIII Encontro Estadual de Ensino de Física, caso se queira, segue um exemplo de atividade para determinação da velocidade do som nos Apêndices III e IV.

REFERÊNCIAS

ANTONIO DWORAKOWSKI, L. et al. Uso da plataforma *Arduino* e do software PLX-DAQ para construção de gráficos de movimento em tempo real. , v. 38, n. 3, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0009>>. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física** Acesso em: 10 jun. 2019

ARDUINO, Disponível em: <<https://www.arduino.cc> > Acesso em: 23 jun. 2019

BUECHLEY, L.; EISENBERG, M. The LilyPad Arduino: Toward wearable engineering for everyone. *IEEE Pervasive Computing*, v. 7, n. 2, p. 12-15, 2008. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4487082>>. Acesso em: 10 jun. 2019

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, Cristiane Rodrigues Caetano; MOLISANI, Elio. Physics with Arduino for beginners. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4, p. 4503-4503, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172011000400018>>. Acesso em: 10 jun. 2019

COELHO, S. M. O papel da experimentação no ensino de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 20, n.1: 30-42, abr. 2003. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/download/6560/6046>>. Acesso em: 10 jun. 2019

CORDOVA, H.; TORT, A. C. Medida de g com a placa Arduino em um experimento simples de queda livre. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, p. e2308, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2015-0012>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

DIONISIO, G.; SCHARDONG SPALDING, L E. Visualização da forma de onda e conteúdo harmônico da corrente elétrica alternada em eletrodomésticos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0121>, Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0121>>. Acesso em: 10 jun. 2019

DO AMORIM, H. S.; DIAS, M. A.; SOARES, V. Sensores digitais de temperatura com tecnologia one-wire: Um exemplo de aplicação didática na área de condução térmica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173742009>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

HENRIQUES, V. B.; PRADO, C. PC; VIEIRA, A. P. Editorial convidado: aprendizagem ativa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 01-02, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172014000400001>>. Acesso em: 10 jun. 2019

HESSSEL, R. et al . Determinação do módulo de Young em sólidos a partir da medida da velocidade do som pelo método do tempo de voo. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo , v. 38, n. 2, e2309, 2016 Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172016000200408&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 15 Nov. 2019.

HODSON, D. Experimentos na ciência e no ensino de ciências. **Educational philosophy and theory**, v. 20, n. 2, p. 53-66, 1988. Disponível em: <<http://www.iq.usp.br/wwwdocentes/palporto/TextoHodsonExperimentacao.pdf>>. Acesso em: maio. 2019.

HUGGINS, E. Speed of sound in metal pipes: An inexpensive lab. **The Physics Teacher**, v. 46, n. 1, p. 13-14, 2008. Disponível em: <<https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2823993>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

INMETRO. Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM, Portaria 029 de 1995, 3ª. Edição, 2012. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2019.

KEY, T. *et al.* Measuring the speed of sound in a solid. **The Physics Teacher**, v. 38, n. 2, p. 76-77, 2000. Disponível em: <<https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.880459>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

MATWEB. Disponível em: < <http://www.matweb.com/>> Acesso em: 23 out. 2019

OGLAT, A. A., et al. Measuring The Acoustical Properties of Fluids and Solid Materials Via Dealing With A-SCAN (GAMPT) Ultrasonic. **Journal of Physics: Conference Series**. Vol. 1083. No. 1. IOP Publishing, 2018. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1083/1/012053/meta>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

RAHEMI, R. et al. Variation in electron work function with temperature and its effect on the Young's modulus of metals. **Scripta Materialia**, v. 99, p. 41-44, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135964621400493X>>. Acesso em: 10 jun. 2019

SE-YUEN, M.; YEE-KONG, N.; KAM-WAH, W. Measurement of the Speed of Sound in a Metal Rod. **Phys. Educ**, v. 35, n. 6, p. 439, 2000. Disponível em: <[http://seniorphysics.com/physics/PhysicsEducation_V35\(6\)_2000.pdf](http://seniorphysics.com/physics/PhysicsEducation_V35(6)_2000.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2019.

SILVA, Janicleide T.; SILVA, Josiane T.; LIMA, Gustavo F. Level Control and Monitoring Using Platform Open Source Arduino. **Journal INNOVER**, v. 1, n. 4, p. 85-92, 2015. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/gustavolima/producao-cientifica/2014/innover/artigo> >. Acesso em: 10 jun. 2019

SILVEIRA, Sérgio. Desenvolvimento de um kit experimental com Arduino para o ensino de física moderna no ensino médio. 2016. Dissertação de Mestrado. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0287>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

SOUZA, Anderson R. de et al. The Arduino board: a low cost option for physics experiments assisted by PC. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 01-05, 2011. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172011000100026>>. Acesso em: 10 jun. 2019

SPEZIALI, N. L., VEAS, F. O LUCIO. Ondas Longitudinais determinação da velocidade do som em metais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, SP, v. 8, n. 1, p. 3-8, 1986. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol08a01.pdf>>, Acesso em: 20 março 2019

VAN THANH, Pham et al. Effect of temperature on ultrasonic velocities, attenuations, reflection and transmission coefficients between motor oil and carbon steel estimated by pulse-echo technique of ultrasonic testing method. **VNU Journal of Science: Mathematics-Physics**, v. 31, n. 4, 2015. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-Temperature-on-Ultrasonic-Velocities%2C-and-Th%3%A0nh-Nhung/53d4d0a4f3f3be86077076c6fad8553c029188e5>>. Acesso em: 11 out. 2019.

WILSON, Wayne D. Speed of sound in distilled water as a function of temperature and pressure. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 31, n. 8, p. 1067-1072, 1959.

ZUCKERWAR, Allan J. Handbook of the Speed of Sound in Real Gases (Volume 1). 2002.

APÊNDICES

APÊNDICE I – Trabalhos encontrados que discutem a velocidade do som.

Foram encontrados 52 artigos com diferentes métodos de se inferir a propagação de ondas sonoras. No Quadro 1, os artigos estão identificados de acordo com o meio de propagação das ondas, sendo eles: 1 – Sólidos; 2 – Ar e outros gases; 3 – Líquido; e 4 Plasma.

Quadro 1 - Trabalhos selecionados que relacionam propagação de onda mecânica; colunas: 1 – Sólidos; 2 – Ar e outros gases; 3 – Líquido; e 4 – Plasma.

Artigos	Meios de propagação			
	1	2	3	4
ALBERGOTTI, J. C. Speed of sound by a time-of-flight method. American Journal of Physics, v. 49, n. 6, p. 595, 1981. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.12466 >. Acesso em: 10 jun. 2019.				
BERG, Richard E.; BRILL, Dieter R. Speed of sound using Lissajous figures. The Physics Teacher, v. 43, n. 1, p. 36-39, 2005. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.1845989 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
BIEHL, George. Measuring the speed of sound The Physics Teacher, v. 27, n. 6, p. 172, 1989. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.2342707 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
CARVALHO, Carlos C.; LOPES DOS SANTOS, J. M. B.; MARQUES, M. B. A time-of-flight method to measure the speed of sound using a stereo sound card. The Physics Teacher, v. 46, n. 7, p. 428-431, 2008. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.2981293 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
CAVALCANTE, M. A.; PEÇANHA, R.; LEITE, V. F. Princípios básicos de imagens ultra-sônicas e a determinação da velocidade do som no ar através do eco. A Física na Escola, v. 13, n. 1, p. 19-23, 2012. Disponível em: < http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol13-		X		

Num1/a071.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2019.				
CAVALCANTE, Marisa A.; TAVOLARO, Cristiane Rodrigues C. Medindo a velocidade do som. A Física na Escola, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 29-30, 2003. Disponível em: < http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol12-Num2/a031.pdf >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
CHRISTENSEN, F. E. Determination of the velocity of sound in air. The Physics Teacher, v. 2, n. 8, p. 390, 1964. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.2350869 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
DA COSTA SAAB, Sérgio; CÁSSARO, Fabio Augusto Meira; BRINATTI, André Maurício. Laboratório caseiro: tubo de ensaio adaptado como tubo de kundt para medir a velocidade do som no ar. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 22, n. 1, p. 112-120, 2005. Disponível em: < https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6397 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
DA SILVA, Wilton Pereira et al. Velocidade do som no ar: um experimento caseiro com microcomputador e balde d'água. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 25, p. 1. Disponível em < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172003000100009&lng=pt&nrm=iso >. Acesso em 09 jun. 2019		X		
DABROWSKI, Jan Paul. Speed of sound in a parking lot. The Physics Teacher, v. 28, p. 410-411, 1990. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2343089 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
EASTON, Don. Speed of sound in air. The Physics Teacher, v. 43, n. 9, p. 567-567, 2005. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2136445 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
FENG-HUA, Li; BO, Zhang; YONG-GANG, Guo. A method of measuring the in situ seafloor sound speed using two receivers with warping transformation. Chinese Physics Letters, v. 31, n. 2, p. 024301, 2014. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0256-		X		

307X/31/2/024301/meta>. Acesso em: 10 jun. 2019.				
GALE, D. S. Measuring the speed of sound. American Journal of Physics, v. 48, n. 6, p. 498, 1980. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.12072 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
GANCI, Salvatore. Time-of-flight measurement of the speed of sound in water. Physics Education, v. 51, n. 3, p. 034001, 2016. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/51/3/034001/pdf >. Acesso em: 10 jun. 2019.				
GAO, Lei, et al. Measurement of the Speed of Sound in 2, 3, 3, 3-Tetrafluoropropylene (R-1234yf) Liquid Phase with an Ultrasonic Sensor. Advanced Materials Research. Vol. 875. Trans Tech Publications, 2014. Disponível em: < https://www.scientific.net/AMR.875-877.588 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
GIRARD, John E. Direct measurement of the speed of sound. The Physics Teacher, v. 17, n. 6, p. 393, 1979. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2340280 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
GÓMEZ-TEJEDOR, José A.; CASTRO-PALACIO, Juan C.; MONSORIU, Juan A. Direct measurement of the speed of sound using a microphone and a speaker. Physics Education, v. 49, n. 3, p. 310, 2014. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/49/3/310 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
GRALA, R. M.; OLIVEIRA, E. S. Medida da Velocidade do Som no Ar com o Uso do Microcomputador. A Física na Escola, v. 6, n. 2, p. 26-28, 2005. Disponível em: < http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num2/a09.pdf >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
HELLESUND, Simen. Measuring the speed of sound in air using a smartphone and a cardboard tube. Physics Education, v. 54, n. 3, p. 035015, 2019. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/ab0e21 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
HIISMAKI, P.; KAMARAINEN, V. J. A hygrometer based on measuring the speed of sound and the temperature. Journal of Physics E: Scientific Instruments, v. 20, n. 12, p. 1465, 1987. Disponível em:		X		

https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3735/20/12/006 >. Acesso em: 10 jun. 2019.				
HUGGINS, Elisha. Speed of sound in metal pipes: An inexpensive lab. <i>The Physics Teacher</i> , v. 46, n. 1, p. 13-14, 2008. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2823993 >. Acesso em: 10 jun. 2019.	X	X		
KARSHNER, G. B. Direct method for measuring the speed of sound. <i>American Journal of Physics</i> , v. 57, n. 10, p. 920-922, 1989. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.15847 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
KASPER, Lutz; VOGT, Patrik; STROHMEYER, Christine. Stationary waves in tubes and the speed of sound. <i>The Physics Teacher</i> , v. 53, n. 1, p. 52-53, 2015. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.4904249 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
KEY, Tony; SMIDROVSKIS, Robert; FROM, Milton. Measuring the speed of sound in a solid. <i>The Physics Teacher</i> , v. 38, n. 2, p. 76-77, 2000. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.880459 >. Acesso em: 10 jun. 2019.	X	X		
KITAMURA, Takaharu; WATANABE, Yoshiaki. Direct In situ Measurements of Sound Speed Profile in Thermocline of Lake: The Example of North Lake Biwa in Autumn 2008. <i>Japanese Journal of Applied Physics</i> , v. 49, n. 7S, p. 07HG16, 2010. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.49.07HG16/meta >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
LUDKE, Everton et al. Velocidade do som no ar e efeito Doppler em um único experimento. <i>Rev. Bras. Ensino Fís.</i> , São Paulo, v. 34, n. 1, p. 1-4, Mar. 2012. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172012000100017&lng=en&nrm=iso >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
MARTIN, Brian E. Measuring the speed of sound—Variation on a familiar theme. <i>The Physics Teacher</i> , v. 39, n. 7, p. 424-426, 2001. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1416315 >. Acesso em: 10 jun.				

2019.				
MEETHOM, Pattanan, et al. Measurement of Sound Speed in Liquid using Optical Approach. Advanced Materials Research. Vol. 979. Trans Tech Publications, 2014. Disponível em: < https://www.scientific.net/AMR.979.75 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
NG, Yee-kong; MAK, Se-yuen. Measurement of the speed of sound in water. Physics Education, v. 36, n. 1, p. 65, 2001. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/36/1/312/meta >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
OGLAT, Ammar A., et al. Measuring The Acoustical Properties of Fluids and Solid Materials Via Dealing With A-SCAN (GAMPT) Ultrasonic. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1083. No. 1. IOP Publishing, 2018. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1083/1/012053/meta >. Acesso em: 10 jun. 2019.	X	X		
OLIVEIRA, Pâmella de Assunção, et al. Speed of sound in biodiesel produced by low power ultrasound. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 975. No. 1. IOP Publishing, 2018. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/975/1/012019/meta >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
OUSEPH, P. J.; LINK, James J. Variation of speed of sound in air with temperature. American Journal of Physics, v. 52, p. 661-661, 1984. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.13872 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
PAROLIN, Sara Orsola; PEZZI, Giovanni. Kundt's tube experiment using smartphones. Physics Education, v. 50, n. 4, p. 443, 2015. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/50/4/443/meta >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
PEREIRA DA SILVA, Wilton et al. The speed of sound in air: An at-home experiment. The Physics Teacher, v. 43, n. 4, p. 219-221, 2005. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.1888080 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
PETTERSEN, Inge HA. Speed of sound in gases using an ultrasonic			X	

<p>motion detector. The Physics Teacher, v. 40, n. 5, p. 284-286, 2002. Disponível em: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1516381>. Acesso em: 10 jun. 2019.</p>				
<p>PUANTHA, Rattanaporn et al. The speed of sound in air of pipe acoustic resonance via the <i>Arduino</i> with LabVIEW interface. Physics Education, v. 54, n. 1, p. 015009, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aaea12/meta>. Acesso em: 10 jun. 2019.</p>			X	
<p>SCHWABE, M. et al. Direct measurement of the speed of sound in a complex plasma under microgravity conditions. EPL (Europhysics Letters), v. 96, n. 5, p. 55001, 2011. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1209/0295-5075/96/55001/meta>. Acesso em: 10 jun. 2019.</p>		X		
<p>SE-YUEN, M.; YEE-KONG, N.; KAM-WAH, W. Measurement of the Speed of Sound in a Metal Rod. Phys. Educ, v. 35, n. 6, p. 439, 2000. Disponível em: <http://seniorphysics.com/physics/PhysicsEducation_V35(6)_2000.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2019.</p>	X		X	
<p>SILVA, Abel A. Determining the speed of sound in the air by sound wave interference. European Journal of Physics, v. 38, n. 4, p. 045802, 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6404/aa6d30>. Acesso em: 10 jun. 2019.</p>		X		
<p>SPEZIALI, N. L., VEAS, F. O LUCIO. Ondas Longitudinais determinação da velocidade do som em metais. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, SP, v. 8, n. 1, p. 3-8, 1986. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol08a01.pdf>, Acesso em: 20 março 2019</p>	X	X		
<p>STACKS, Sebastian et al. Simple time-of-flight measurement of the speed of sound using smartphones. The Physics Teacher, v. 57, n. 2, p. 112-113, 2019. Disponível em: <https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.5088474>. Acesso em: 10 jun. 2019.</p>				X
<p>UMEZAWA, Masaaki et al. Pressure effect of sound speed in the deep</p>			X	

ocean. Japanese journal of applied physics, v. 36, n. 5S, p. 3345, 1997. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.36.3345 >. Acesso em: 10 jun. 2019.				
VELASCO, Santiago et al. A computer-assisted experiment for the measurement of the temperature dependence of the speed of sound in air. American Journal of Physics, v. 72, n. 2, p. 276-279, 2004. Disponível em: < https://www.reed.edu/physics/courses/Physics332.s10/pdf/Sound_Speed.pdf >. Acesso em: 10 jun. 2019.			X	
VICKERY, Jon P. Determination of the velocity of sound in air. The Physics Teacher, v3, n.4, p. 170-171, 1965. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2349085 >. Acesso em: 10 jun. 2019.			X	
WARD, Richard J. Measuring the speed of sound in water. Physics Education, v. 50, n. 6, p. 727, 2015. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/50/6/727 >. Acesso em: 10 jun. 2019.			X	
WARDEN, James A. Measuring the speed of sound without plumbing. The Physics Teacher, v. 43, n. 5, p. 308-308, 2005. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1903820 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
WINTERS, Loren M. A Visual Measurement of the Speed of Sound. Physics Teacher, v. 31, n. 5, p. 284-85, 1993. Disponível em: < https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0712/0712.1577.pdf >. Acesso em: 10 jun. 2019.				
WINTLE, H. J. Measurement of the velocity of sound in gases. American Journal of Physics, v. 31, n. 12, p. 942-943, 1963. Disponível em: < http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1969214 >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		
WORLAND, Rand S.; WILSON, D. David. The speed of sound in air as a function of temperature. The Physics Teacher, v. 37, n. 1, p. 53-57, 1999. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.880153 >.			X	

Acesso em: 10 jun. 2019.				
YARMUS, Leonard. Pulsed waves: Reflections and the speed of sound. American Journal of Physics, v. 64, n. 7, p. 903-906, 1996. Disponível em: < https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.18119 >. Acesso em: 10 jun. 2019.			X	
YAVUZ, Ahmet. Measuring the speed of sound in air using smartphone applications. Physics Education, v. 50, n. 3, p. 281, 2015. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/50/3/281/meta >. Acesso em: 10 jun. 2019.			X	
YAVUZ, Ahmet; TEMIZ, Burak Kağan. Detecting interferences with iOS applications to measure speed of sound. Physics Education, v. 51, n. 1, p. 015009, 2015. Disponível em: < https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/51/1/015009/pdf >. Acesso em: 10 jun. 2019.		X		

Fonte: Autor (2019).

Resultando em: 37 artigos que tratam da propagação do som pelo ar e outros gases; 5 por meios sólidos; 10 por líquidos e 1 pelo plasma. Notoriamente, existem poucos artigos descrevendo uma prática experimental didática relacionada à propagação de ondas sonoras em meios sólidos, e, como esperado, um grande número de trabalhos determinando a velocidade do som no ar.

Quadro 2 – Número de artigos por revista ou editoras encontrados.

Revista	Nº de artigos
Revista Brasileira de Ensino de Física - RBEF	3
A Física na Escola	3
Caderno Brasileiro de Ensino de Física	1
The Physics Teacher	17
American Journal of Physics	8
Advanced Materials Research	2
Physics Education	10
Journal of Physics: Conference Series	2
Japanese Journal of Applied Physics	2

Chinese Physics Letters	1
Journal of Physics E: Scientific Instruments	1
European Journal of Physics	1
EPL (Europhysics Letters)	1
Total	52

Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE II – Programação do *Arduino* para a coleta do tempo do pulso.

```
1  /* 03/2019
2  * Fundação Universidade Federal do Pampa - Campus Bagé
3  * Programa para medição da velocidade do som em uma barra de metal
4  * Está rotina utiliza a função pulseIn(), cuja descrição pode ser
5  * obtida em https://www.Arduino.cc/en/Reference/PulseIn.
6  */
7  //Declaração das variáveis utilizadas, onde a largura_pulso
8  //é o tempo de a onda ir e vim na barra
9  int largura_pulso, d = 6, n=0;
10 float comprimento_barra = 0.98;
11 double t, v;
12
13 void setup() {
14
15   Serial.begin(115200);
16   pinMode(10, INPUT);
17   pinMode(12, OUTPUT);
18   digitalWrite(12 , HIGH);
19 }
20
21 void loop() {
22
23   largura_pulso = pulseIn(10, HIGH);
24
25   if (largura_pulso > 100 && largura_pulso < 1000 && (micros()-t)>1000000){
26     t = micros();
27     Serial.println(largura_pulso);
28     Serial.print("\t");
29     n = n+1;
30   }
31 }
```

APÊNDICE III – Plano de aula

Plano de Ensino da Atividade

1 Identificação

Instituição campo de estágio	Escola Estadual de Educação Básica Professor Justino Costa Quintana
Componente curricular	Física
Turno	Manhã
Turmas/Série	Turma: 32 e 33– 3º ano
Professor(a) Regente/Supervisor(a)	Ana Cláudia Wrasse
Estagiário(a)s	Denílson Junior e Diesse Siqueira
Professor(a) Orientador(a)	Vania Barlette
Provável data de implementação	xx/xx/2019
Tempo previsto	2 horas-aulas para cada turma

2 Tema da atividade

Ondas Mecânicas

3 Conteúdos de ensino da atividade

Propagação do som em meios sólidos (metais).

4 Conteúdos de ensino que são pré-requisitos para a atividade

- Conceitos de mecânica básica, como movimento retilíneo uniforme.
- Conceitos de ondas;
- Operações matemáticas básicas.

5 Objetivos de ensino

a) Objetivo geral

Familiarizar os alunos com as práticas experimentais, estimulando seu desenvolvimento e autonomia em sala de aula, assim como seu espírito científico e de investigação. Possibilitando que os alunos desenvolvam de melhor maneira a aprendizagem do conteúdo

relacionado a ondas mecânicas e propagação do som.

b) Objetivos específicos

- Proporcionar aos alunos o material necessário para a realização da experimentação, explicando de forma lúcida e em uma linguagem não formal, o funcionamento e os procedimentos que os alunos devem seguir para realizar o experimento de forma satisfatória;
- Auxiliá-los na coleta correta dos dados;
- Auxiliá-los na construção da relação física entre os dados coletados e o fenômeno em estudo;
- Realizar uma síntese do experimento de forma que os alunos consigam compreender e relacionar a propagação do som em meios sólidos;
- Introduzir a plataforma *Arduino* como a ferramenta para coleta dos dados.

6 Objetivos de aprendizagem

a) Objetivo geral

Estudar as grandezas relacionadas ao conteúdo de ondas mecânicas, assim como a relação física e matemática existente entre essas grandezas estudadas.

b) Objetivos específicos

- **No nível de conhecimento** – compreender as grandezas envolvidas no fenômeno de propagação do som, não só em meios metálicos, mas em diferentes meios. Apropriação dos alunos em relação às características e propriedades de ondas mecânicas, identificando o som como uma onda mecânica.
- **No nível de aplicação** – fazer a extração dos dados corretamente, relacioná-los em uma tabela para que os mesmos sejam utilizados para discussão e análise.
- **No nível de solução de problemas** – levantar uma hipótese através dos conhecimentos teóricos que os alunos possuem, para que possam identificar uma forma de calcular a velocidade de propagação do pulso na barra, ou seja, desenvolver sua autonomia em

relação a resolução de problemas em geral.

7 Metodologia de ensino da atividade

a) Estratégias

- Modelo hipotético-dedutivo de Mario Bunge (2002);
- Uso de experimentação por investigação para o estudo da propagação do som em meios sólidos (metais), para que os alunos possam associar esses conhecimentos que já possuem durante a prática.
- Trabalho em grupo.

b) Recursos

- Laboratório da escola;
- Apagador, caneta para quadro branco e quadro;
- Kit experimental: Computador, plataforma *Arduino*, base rígida, hastes de aterramento (aço 1020) de diferentes comprimentos (0,5m, 1m, 1,5m, 2m), resistor de 10Kohms, protoboard.
- Guia/Roteiro da atividade, onde se encontrará os passos para a realização do experimento, tabela para a colocação dos dados e perguntas sobre a relação das grandezas estudadas.

c) Desenvolvimento da atividade

i. Momento inicial (ações para introduzir o aluno na atividade-50 min)

Pelo método hipotético dedutivo de Bunge, devemos ter quatro momentos ao se desenvolver a atividade, o primeiro momento então, deve ser dedicado à revisão teórica. Assim inicialmente com os alunos em sala de aula, será realizada uma revisão sobre ondas mecânicas, lembrando alguns conceitos que já foram estudados pelos alunos no 2º ano, como em que meios as ondas mecânicas podem se propagar, quais as características das

ondas mecânicas, por exemplo, comprimento de onda, velocidade de propagação frequência, etc, uma revisão geral sobre ondas. Para este momento inicial será dedicado um período inteiro (50 min), onde deve ser realizado uma discussão junto aos alunos, para que os mesmos levantem suas dúvidas e ainda deve ser apresentado a equação da velocidade para a propagação do som em meios metálicos, evidenciando do que a mesma depende e por quê.

ii. *Desenvolvimento (ações para executar a atividade, propriamente dita-40 min)*

- (i- 5 min) - Após a breve revisão e discussão dos conteúdos prévios, começará o desenvolvimento da atividade. Nesta segunda parte os alunos devem ser encaminhados ao laboratório de ciências e divididos em quatro grupos, onde pelo método hipotético de Bunge, devem ser apresentados ao problema a ser investigado.
- (ii- 10 min) - Após receberem o guia da atividade é apresentada aos alunos a problematização através da pergunta: Uma barra de metal caindo verticalmente sobre uma superfície mais rígida, devido ao choque, ela pula. Por que a barra pula? Desenvolve-se dessa forma a ideia do pulso percorrendo a barra, como a propagação do som neste meio metálico.
- (iii- 5 min)- Após este momento parte-se para o terceiro momento, onde os alunos devem realizar a predição teórica do experimento, antes da realização do mesmo, associando seus conhecimentos de cinemática básica (MRU), a propagação do pulso e relacionar a equação da velocidade do MRU, com o problema investigado, determinando o tempo de propagação do pulso na barra.
- (iv- 10 min)- Enfim após a predição teórica parte-se para a realização do experimento, como os alunos foram divididos em quatro grupos e possuindo-se quatro hastes metálicas, cada haste de cada comprimento deve ser entregue a cada grupo, entretanto como no nosso aparato tem-se apenas um *Arduino*, um computador e uma protoboard, os grupos devem realizar as medidas um grupo por vez. Instruídos pelo guia e pelos residentes, cada grupo deve realizar dez medidas com sua haste, coletando um tempo para cada batida da barra. Vale ressaltar que é necessário que os alunos sejam auxiliados durante sua prática,

caso tenham alguma dúvida. Realizada as medidas, as mesmas devem ser dispostas na tabela que está no guia, onde os alunos ainda devem realizar o cálculo da média dos tempos, utilizar este tempo para o cálculo da velocidade assim como a média da velocidade.

- (v- 10 min) - Por fim deve-se partir para a última etapa que é o confronto entre a predição teórica e os resultados obtidos, que devem ser feitos pelos alunos respondendo as perguntas que se apresentam no guia, que deve ser recolhido após para avaliações futuras dos residentes.

iii. Momento final (ações para fazer o fechamento da atividade-10 min)

Por último, porém não menos importante, deve ser levantado a discussão junto aos alunos em relação ao significado físico dos resultados obtidos, como por exemplo, como a velocidade foi a mesma para todas as barras mesmo elas sendo de diferentes tamanhos. Consolidando a discussão sobre do que depende a propagação do pulso e porque, é importante também levantar alguns comentários sobre erros que acontecem durante a experimentação, de porquê pode-se ter obtido algumas medidas com discrepância, entre outros.

8 Avaliação da aprendizagem



A avaliação será feita de forma qualitativa e quantitativa. A avaliação qualitativa será feita através da observação, participação e realização das atividades propostas, pelos alunos. A avaliação quantitativa será feita através da extração correta dos dados, e a correção das respostas dos alunos no guia.

9 Referências

CUPANI, Alberto. PIETROCOLA, Maurício. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. especial, p. 100-125, 2002.

SPEZIALI, N. L., VEAS, F. O LUCIO. Ondas Longitudinais determinação da velocidade do som em metais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, SP, v. 8, n. 1, p. 3-8, 1986. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol08a01.pdf>>, Acesso em: 20 março 2019

APÊNDICE IV – Guia do aluno

	E. E. B. Prof. Justino Costa Quintana R. Barão do Triunfo, 670 - Centro, Bagé - RS		
	Disciplina:	Física	
	Professor:	Ana Claudia Wrasse	
	Turma/Turno:	32 e 33	
	Residentes	Denilson Junior e Diesse Siqueira	

GUIA EXPERIMENTAL

Ondas Mecânicas: Velocidade do Som em Metais

Revisão Teórica

Uma onda é gerada por um conjunto de perturbações periódicas, produzindo um conjunto de pulsos que se propagam no espaço. As ondas não transportam matéria, mas transportam energia.

Como sabemos uma onda mecânica, pode ser classificada em dois tipos de onda: ondas transversais e ondas longitudinais. São ondas que se propagam na direção perpendicular à perturbação que a gera. Uma corda presa à parede oscilando e as ondas eletromagnéticas são exemplos. São ondas que se propagam na mesma direção à perturbação que a gera. O som é um ótimo exemplo de onda longitudinal.

Uma característica primordial do som (ondas mecânicas) é a de que ela precisa de um meio para se propagar, seja este meio um fluido, como, por exemplo, o ar ou um sólido, por exemplo, um metal.

O que será estudado aqui é a propagação do som em sólidos (barra de metal), para calcular a velocidade com que o som se propaga em sólidos, utiliza-se a equação:

$$v = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

Onde k é a elasticidade do material (GPa) ρ a densidade volumétrica (kg/m³).

Problema a ser investigado

Uma barra de metal caindo verticalmente sobre uma superfície mais rígida, e devido ao choque, ela pula. Por que a barra pula?

Devido a colisão da barra com a superfície, na extremidade inferior da barra acontece uma deformação, gerando assim um pulso longitudinal. Este pulso longitudinal percorre o interior da barra até a extremidade superior, deparando-se com uma mudança de meio, parte deste pulso é transmitida para o ar e outra refletida, assim, o pulso retorna até a extremidade inferior. Ao chegar na extremidade inferior o pulso faz com que a barra volte ao seu estado original, empurrando a superfície para baixo que por sua vez empurra a barra para cima, e então pulando.

Sabendo que o som é uma onda longitudinal e que o som se propaga na mesma velocidade do pulso gerado na barra, tendo como medir o tempo de propagação deste pulso longitudinal, *como determinaríamos a velocidade desta onda gerada no interior da barra, sabendo apenas a distância que o pulso percorre no interior da barra e o tempo que ele leva*

para percorrer esta distância (duas vezes o tamanho da barra)? E qual a velocidade de propagação do som numa barra de metal (aço 1010)?

Predição teórica da velocidade de viagem do som

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2l}{t}$$

Sendo, Δs o deslocamento e Δt o tempo, em que o deslocamento seria 2 vezes o comprimento da barra (l) e o tempo (t). Sabendo a velocidade que este pulso deve ter, com as características do material da barra (objeto de estudo), a velocidade do pulso no interior da barra é:

$$v = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \text{ [m/s]} = 5041 \text{ m/s}$$

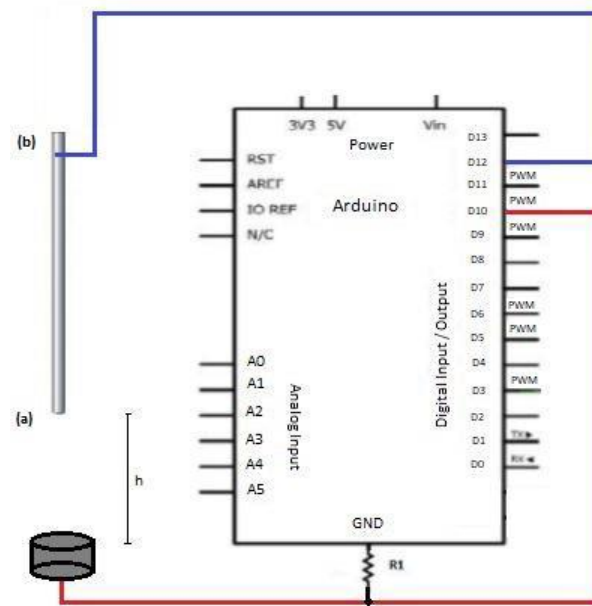
Com isso, determine o tempo (t) de propagação do pulso na barra ao colidir com uma superfície mais rígida.

Aparato Experimental:

O aparato experimental constitui-se dos seguintes componentes:

- Barra de metal (objeto de estudo);
- Base de ferro;
- Resistor 10k Ω (proporcionar um nível lógico definido na entrada do *Arduino*);
- *Arduino*;
- Computador.

Figura 1 - Esquema de montagem do aparato experimental.



Teste experimental para velocidade do som

O experimento montado está programado por meio de sua interface virtual (software) para coletar o tempo de contato da barra de metal com a base de forma automatizada, onde seria o tempo de propagação do som (pulso longitudinal) no interior da barra.

Com a barra que foi cedida ao grupo, faça coleta os seguintes passos:

1. Determine uma altura para abandonar a barra contra a base;
2. Ao soltar a barra, irá aparecer o tempo de propagação do pulso na tela do computador

Agora você deve coletar o tempo de propagação do pulso na barra. Calcule a velocidade a partir do tempo obtido experimentalmente.

Nº de lançamento	Tempo de propagação	Velocidade do som
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
Média:		

O tempo obtido experimentalmente é quão similar ao tempo obtido teoricamente?

E as velocidades calculadas são as mesmas ou diferentes? Por quê?

A velocidade depende do tamanho da barra? Ela varia ao aumentar ou diminuir a barra?

ANEXOS

ANEXO 1 – Experiência reproduzida pelo PIBID Subprojeto Física UNIPAMPA

Roteiro para determinação experimental da velocidade do som (Versão do professor)

1. Introdução

Este roteiro é baseado na referência citada, utilizamos a lista de materiais necessários para elaboração do aparato experimental com algumas modificações. Esse experimento é direcionado ao contexto de salas de aula do ensino médio para subsidiar discussões conceituais sobre as ondas sonoras e outras características experimentais tais como medida física, erros em medidas entre outras.

O procedimento experimental escolhido consiste na utilização de dois microfones posicionados a diferentes distâncias da fonte sonora, para isso será necessário montar um circuito e analisar o sinal elétrico obtido através de um software. A partir dessa ideia podemos medir a diferença temporal entre dois sinais de mesma amplitude em dois microfones com espaçamento conhecido. Com esses dados calcula-se a velocidade pela própria equação que define a velocidade.

O material utilizado é de fácil acesso, tendo em vista a realidade escolar atual. Apesar de nem todas as escolas possuírem Laboratório de Ciências e Informática, não se pode deixar de utilizar a tecnologia no ensino, principalmente na área da física. Este experimento pode ser feito de várias formas, tais como demonstrativo, investigativo e como um desafio. Dessa forma, os alunos irão aprender a trabalhar com software, construir tabelas, analisar gráficos e desenvolver seus conhecimentos na montagem do experimento.

Obtendo a velocidade do som desta maneira o aluno entenderá do que consiste o método científico e entender de que forma foram obtidas as constantes físicas ao longo da evolução da física.

2. Fundamentação teórica

O som é descrito fisicamente como uma onda mecânica a qual se propaga através de perturbações em um meio. No caso de uma onda sonora no ar, esta provoca variações de pressão que permitem a sensibilização do aparato auditivo humano possibilitando a distinção de diferentes qualidades sonoras, intensidades e alturas.

Assim como uma corda tensa, na direção x , percorrida por uma onda transversal, o som é uma onda progressiva. Sendo assim, no instante $t=0$ a forma da corda pode ser representada por:

$$y = f(x) \quad t = 0, \quad (1)$$

Onde y é a elongação da corda, no ponto x . Num instante posterior t a onda percorreu uma distância vt , onde v é a velocidade de propagação da onda. A equação da curva, no instante t é, portanto:

$$y = f(x - vt) \quad t = t \quad (2)$$

Para analisar a fase da onda, devemos tomar um valor particular de y (por exemplo, a crista do impulso escolhido). Matematicamente, isso significa estudar a variação de x com t quando $(x - vt)$ tiver um valor prefixado. Se t crescer, x deve aumentar para manter $(x - vt)$ fixo. Portanto, a equação 2 representa, de fato, a propagação de uma onda para a direita (x crescendo com o tempo). Evidentemente, se desejarmos representar uma onda que se propague para a esquerda, devemos

utilizar a função:

$$y = f(x + vt) \quad (3)$$

Onde o valor de x da fase $(x + vt)$ diminui com o crescimento da variável tempo. É fácil obter a velocidade de uma fase específica de qualquer onda. Para avaliá-la faz-se:

$$x - vt = \text{const.}$$

Diferenciando:

$$dx - vdt = 0$$

$$\frac{dx}{dt} = v$$

(4)

Assim, v é na realidade a velocidade de fase da onda. Para uma onda que se propague para a esquerda obtém-se $-v$, analogamente para sua velocidade de fase.

Consideremos uma onda de forma particular cuja importância logo será posta em evidência. Suponhamos, no instante $t = 0$, um trem de ondas ao longo da corda, dado por:

$$y = y_m \text{sen} \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)$$

(5)

Esta equação obedece à forma geral da equação de propagação (Eq. 2)

Período T é o tempo que a onda leva para percorrer a distância de um comprimento de onda λ .

Logo:

$$\lambda = vT$$

(6)

Substituindo essa expressão na equação da onda, obtém-se:

$$y = y_m \text{sen} 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

(7)

Sob esta forma é evidente o fato de que y tem o mesmo valor em x , $x + \lambda$, $x + 2\lambda$, etc. bem como t , $t + T$, $t + 2T$, etc.

A Eq. 7 pode ser escrita sob outra forma, mais compacta, introduzindo-se duas grandezas, o número de onda k e a velocidade angular ω . São definidas por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ e } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

(8)

Em termos dessas quantidades, a equação de uma onda senoidal que se propaga para a direita (x crescente) é:

$$y = y_m \text{sen} (kx - \omega t)$$

(9)

Comparando-se as equações 6 e 8, deduz-se que a velocidade da fase v da onda é igual a:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$

(10)

Na onda progressiva representada pela equação 9 considerou-se nula a elongação y na posição $x=0$ para o tempo $t=0$. Isto, evidentemente não é necessário. A expressão geral de uma onda senoidal propagando-se para a direita é:

$$y = y_m \text{sen}(kx - \omega t - \phi)$$

(11)

Onde ϕ é chamada fase inicial. Por exemplo, para $\phi = -90^\circ$, a elongação y , em $x=0$ e $t=0$, é y_m . Obviamente, este exemplo corresponde à equação:

$$y = y_m \text{cos}(kx - \omega t)$$

(11)

Isso porque a função cosseno tem uma diferença de fase de 90° , em relação à função seno.

Considerando-se um determinado ponto da corda, por exemplo $x = \pi/k$, a elongação y em cada ponto será dada por:

$$y = y_m \text{sen}(\omega t + \phi)$$

(12)

Portanto, cada elemento da corda executa movimento harmônico simples em relação à sua posição de equilíbrio, enquanto o trem de ondas se propaga ao longo da corda, ou, no caso do som, em cada ponto de variação da pressão ocorre movimento harmônico simples em relação ao seu estado de equilíbrio, enquanto o trem de ondas se propaga ao longo das partículas de ar.

3. Materiais e Desenvolvimento

3.1 Material necessário:

- 2 microfones de eletreto;
- 2 capacitores de $1 \mu\text{F}$;
- 2 resistores de $1 \text{k}\Omega$;
- 1 plugue P2 estéreo
- 4 m de fios com duas vias e malha;
- 1 fonte CC de 9 V (bateria);
- Suportes para firmar os eletretos em uma posição estável;
- Software para aquisição de dados via placa de som (SoundCard Oscilloscope);
- Instruções do uso do software SoundCard Oscilloscope;
- Um objeto para percutir, utilizado como fonte sonora.
- Ferro de solda e estanho;

3.2 Desenvolvimento:

Para determinar a velocidade do som será utilizado o circuito da figura 1. Uma fonte sonora emite um sinal que será captado pelos dois microfones os quais estarão a diferentes distâncias da fonte. Este sinal será enviado ao computador, e com o auxílio de um software será determinada a diferença entre os tempos que o sinal leva para chegar em cada microfone. Com a medida da diferença entre os tempos e a distância entre os microfones pode-se calcular a velocidade do som.

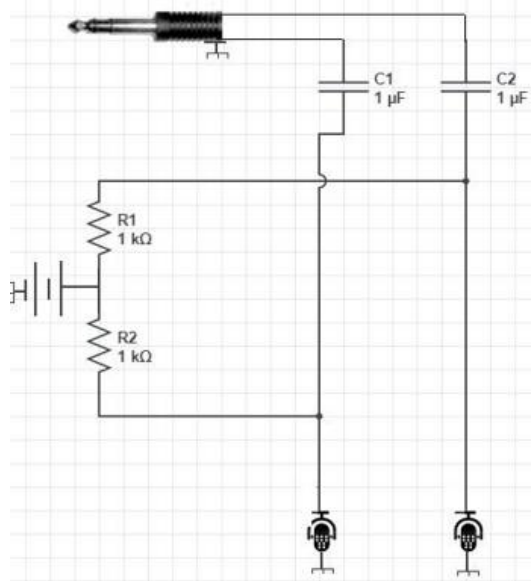


Figure 1 - Esquema do circuito

SoundCard Oscilloscope

Para começar testando a recepção dos sinais dos microfones faça algum som próximo de um deles e observe o resultado na tela do osciloscópio. Observe que cada microfone vai indicar o sinal através de uma cor, ou vermelho ou verde, dependendo do canal ao qual está associado. O canal 1 é representado pela cor verde, o canal 2 pela cor vermelha. Essa parte é importante pois dependendo da ordem na qual estão dispostos os microfones o disparo(Trigger) pode começar invertido. Sendo assim, o microfone que estiver mais próximo a fonte sonora deve ser o primeiro quando for ajustado o disparo(Trigger). O Trigger(disparo) é a parte na configuração da operação do osciloscópio que possibilita tomar os dados por algum tipo de disparo, isto é, podemos configurar a tomada de dados a partir de um determinado valor de amplitude sonora. Esse disparo deve ser configurado na opção *single* e logo abaixo deve-se configurar o canal que irá efetuar o disparo, isto é, o canal que está mais próximo a fonte sonora.

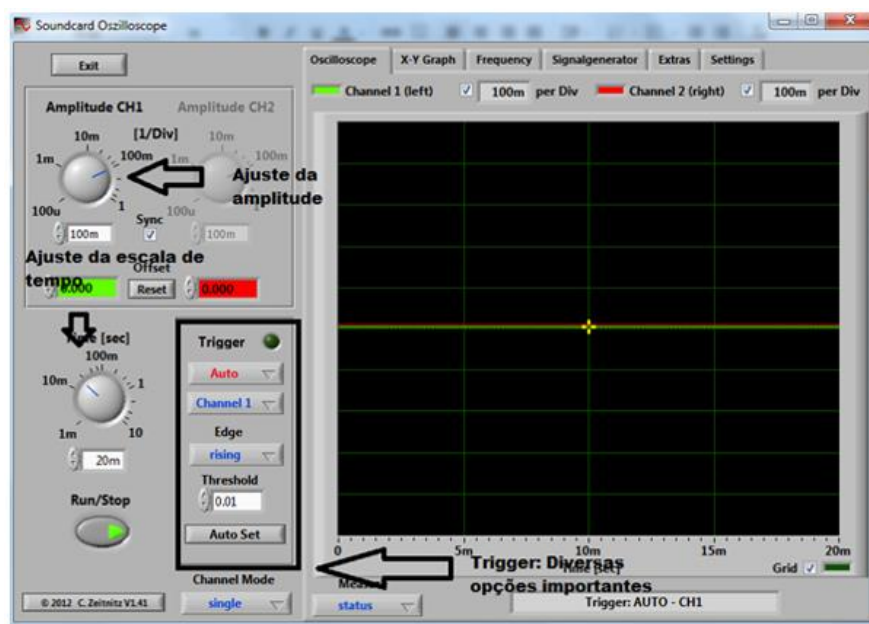


Figure 2 - SoundCard Oscilloscope

3.4 Exemplo desenvolvido:

O circuito foi montado de modo a permitir que os microfones ficassem a uma distancia de 3 metros um do outro, como na Figura 3, onde um microfone se encontra encima da mesa redonda e o outro na outra mesa. A figura 2 mostra a conexão do circuito com a entrada do microfone. A fonte de tensão mostrada na Figura 1 foi uma bateria de 9 V.

O software utilizado foi o Soundcard Scope para medir o tempo que o som levou para chegar em cada microfone. Foram feitas 8 medidas para calcular a velocidade do som com certa precisão, os resultados obtidos estão a seguir, na Tabela 1.



Figura 2 - Circuito

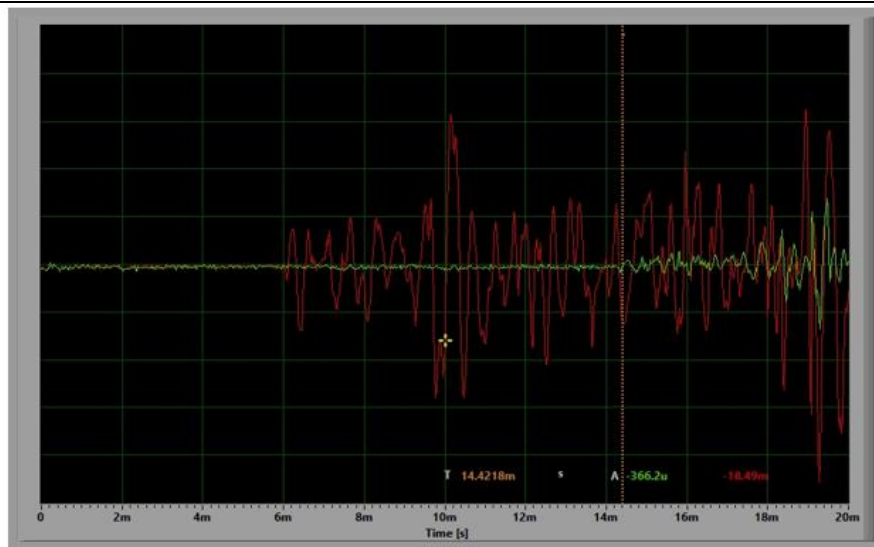


Figura 3 - Microfones

Tabela 1: Medidas e resultados

Medida	Diferença entre os tempos (ms)	Velocidade obtida (m/s)
1	9,7	309,2
2	9,5	315,8
3	9,4	319,1
4	9,0	333,3
5	8,9	337,1
6	9,4	319,1
7	9,6	312,5
8	9,5	315,8
-	-	Média: 320,2

Na figura 4 está um dos gráficos obtidos no software para efetuar a análise dos tempos e calcular a velocidade do som conforme a Tabela 1. Os tempos foram obtidos através da diferença entre os primeiros vales de cada onda, utilizando a distancia de 3 metros entre os microfones foi possível calcular a velocidade



4. Discussões

Foi obtida uma velocidade do som de aproximadamente 320,2 m/s. O valor numérico geralmente encontrado na literatura do ensino médio é 344 m/s, pode-se discutir essa diferença baseando-se nos erros e nas condições do ambiente onde realizou-se a experiência, isto é, a ideia da influência do meio. Um erro muito fácil de se cometer nesse tipo de medida é o posicionamento do cursor no momento da obtenção dos tempos para cada ponto da onda, para uma correta avaliação dos tempos precisa-se inserir o cursor sobre pontos semelhantes dos sinais sonoros, ou seja, se colocarmos o cursos no início do primeiro sinal devemos colocar em local semelhante no segundo sinal. Essa é a parte mais sensível nesse tipo de experiência. Outra influência a ser discutida trata-se da temperatura, a equação para correção do valor da velocidade do som é $v = 331,5 + 0,6\theta$ mais informações sobre esse tema pode-se consultar a referência.

5. Referências:

- <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num2/a09.pdf>
- <http://www.feb.unesp.br/jcandido/acustica/Apostila/Capitulo%2003.pdf>
- Resnick. Halliday – Física Parte 1 – Mecânica, Acústica, Calor

Este experimento foi revistado pelo PIBID Unipampa, subprojeto Física (2014), em que do diagrama da figura 1 foi excluído a bateria, os dois resistores e o dois capacitores. O aplicativo SoudCard Oscilloscope foi substituído pelo aplicativo Audacity.