



**INSTITUTO
FEDERAL**

Piauí

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS PARNAÍBA
CURSO LICENCIATURA EM FÍSICA**

JOÃO LUCAS ALMEIDA SOARES

**FÍSICA EXPERIMENTAL COM ARDUINO: VELOCIDADE DO SOM EM METAIS E
O MÓDULO DE YOUNG**

PARNAÍBA

2025

JOÃO LUCAS ALMEIDA SOARES

FÍSICA EXPERIMENTAL COM ARDUINO: VELOCIDADE DO SOM EM METAIS E O
MÓDULO DE YOUNG

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obten-
ção do diploma do Curso de Licenciatura em
Física do Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Piauí, Campus Parnaíba.

Orientador: Prof. Me. Itamar Vieira de Sousa
Junior

PARNAÍBA
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Soares, João Lucas Almeida

S676f Física experimental com Arduino: velocidade do som em metais e o módulo de Young / João Lucas Almeida Soares. — Parnaíba, 2025.
75 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Instituto Federal do Piauí, Campus Parnaíba, 2025.

Orientador: Prof. Me. Itamar Vieira de Sousa Junior.

1.Física experimental. 2.Plataforma Arduino. 3.Módulo Young. I.Título.

CDD – 530

Elaborado por Micheline Angélica Aragão Gouveia CRB 3/1244

JOÃO LUCAS ALMEIDA SOARES

FÍSICA EXPERIMENTAL COM ARDUINO: VELOCIDADE DO SOM EM METAIS E O
MÓDULO DE YOUNG

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obten-
ção do diploma do Curso de Licenciatura em
Física do Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Piauí, Campus Parnaíba.

Aprovada em 27/02/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Itamar Vieira de Sousa Junior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

Prof. Dr. Francisco Ronan Viana Araujo

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

Prof. Dr. Alexandro das Chagas de Sousa Nascimento

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

PARNAÍBA
2025

Dedico este trabalho a toda minha família e amigos que acreditaram e me apoiaram até aqui,
meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, primeiramente a Deus por ter me protegido, guiado e dado a minha saúde até aqui. Agradeço em especial, à minha mãe, Maria Dilma, e ao meu irmão, Kaio Almeida, que sempre me apoiaram e incentivaram para que eu pudesse chegar até aqui. Sem vocês, nada disso teria sido possível, e serei eternamente grato a vocês.

Também gostaria de dedicar meus sinceros agradecimentos ao meu orientador e mestre, Itamar Vieira de Sousa Junior, por sua orientação e por ter dedicado parte do seu tempo para tornar este trabalho possível. Agradeço por todos os ensinamentos desde o início do curso até aqui, foram aprendizados valiosos que levarei para sempre na minha formação. Acima de tudo, sou grato por você sempre ter acreditado em mim e me incentivado, especialmente nos momentos em que mais duvidei de mim mesmo. Espero ainda lhe dar muito orgulho.

Aos professores Alexandro das Chagas, Francisco Ronan, Jeová Calisto, Diego Prudêncio, Marcos Antônio, Gelson Luiz, Lucas Izídio, Maria de Fátima, Janete Cezar e Iriane do Nascimento, meu muito obrigado pelas ricas discussões e aprendizados ao longo desses quatro anos. Tive o prazer de aprender com cada um de vocês e pretendo transmitir esses conhecimentos aos meus futuros alunos. A vocês, só tenho a agradecer.

Agradeço também aos meus amigos Andreia de Oliveira, Douglas Costa, José Mário e Kaléo Franklin por estarem ao meu lado durante todos esses anos. Vocês tornaram o processo mais leve e enriqueceram minha trajetória com os conhecimentos compartilhados. Saibam que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

E, por fim, agradeço aos demais servidores do IFPI que contribuíram, direta ou indiretamente, para a minha formação. Meu muito, obrigado.

*“O que sabemos é uma gota; o
que ignoramos é um oceano”.*

Isaac Newton

RESUMO

A popularização das tecnologias e o acesso cada vez mais fácil à informação tem permitido aos professores de Física a construção de experimentos didáticos mais elaborados a um custo relativamente baixo. Atualmente é possível desenvolver sistemas de coleta e processamento de dados com relativamente pouco investimento em equipamentos. Neste trabalho, propomos a construção de um aparato experimental, utilizando a plataforma Arduino, em conjunto com sensores e peças impressas em 3D para realizar a medição da velocidade do som em metais e, a partir da obtenção desta velocidade, determinar o módulo de elasticidade (módulo de Young) do material. O aparato experimental aqui proposto, mostrou-se viável para medições de velocidade do som em metais. Os resultados obtidos na experimentação, mostraram que o experimento permite medir a velocidade do som em metais com uma margem de erro inferior a 28%, tornando-se assim uma alternativa acessível aos métodos tradicionais implementados. O uso de experimentos de baixo custo, como o desenvolvido neste trabalho, possibilita a democratização do ensino experimental de ondas sonoras no nível médio e superior, assim como a inserção de tecnologias livres para a formação dos alunos para um mundo cada vez mais exigente no que tange o uso de novas tecnologias e automação.

Palavras-chaves: Física Experimental; Arduino; Módulo de Young.

ABSTRACT

The popularization of technologies and increasingly easy access to information have allowed Physics teachers to build more elaborate educational experiments at a relatively low cost. It is currently possible to develop data collection and processing systems with relatively little investment in equipment. In this work, we propose the construction of an experimental apparatus, using the Arduino platform, together with sensors and 3D printed parts to measure the speed of sound in metals and, from this speed, determine the modulus of elasticity (Young's modulus) of the material. The experimental apparatus proposed here proved to be viable for measuring the speed of sound in metals. The results obtained in the experiment showed that the experiment allows measuring the speed of sound in metals with a margin of error of less than 28%, thus becoming an accessible alternative to the traditional methods implemented. The use of low-cost experiments, such as the one developed in this work, enables the democratization of experimental teaching of sound waves at secondary and higher education levels, as well as the insertion of free technologies for training students for an increasingly demanding world regarding the use of new technologies and automation.

Keywords: Experimental physics; Arduino; Young's Modulus.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Especificações da placa Arduino Mega2560.	19
Figura 2 – IDE do Arduino.	20
Figura 3 – Código sendo rodado no Arduino.	21
Figura 4 – Tensões em um elemento infinitesimal de um cubo.	24
Figura 5 – a) e b), são as representações da tensão normal. E c) da tensão de cisalhamento. . .	25
Figura 6 – Em (a) Máquina de ensaio de tração. (b) Gráfico de tensão versus deformação. . .	27
Figura 7 – Elemento infinitesimal da barra.	28
Figura 8 – Em a) barra com uma extremidade fixa e outra livre. b) primeiro modo de vibração. c) terceiro modo de vibração. E d) quinto modo de vibração.	33
Figura 9 – Em a) barra com ambas extremidades livres. b) primeiro modo de vibração. c) segundo modo de vibração. E d) terceiro modo de vibração.	35
Figura 10 – Em a) barra com ambas extremidades fixas. b) primeiro modo de vibração. c) segundo modo de vibração. E c) terceiro modo de vibração.	36
Figura 11 – Diagrama esquemático com as conexões elétricas do sistema proposto.	38
Figura 12 – Montagem real do circuito eletrônico.	39
Figura 13 – Em (a) temos a bateria para ligar o TDA2050. (b) componentes para captura do sinal. (c) dois sensores de áudio Max4466.	40
Figura 14 – Esboço da interface para controle do experimento utilizando o monitor serial da IDE do Arduino.	40
Figura 15 – Representação das peças de um alto-falante.	41
Figura 16 – Alto-falante modificado.	42
Figura 17 – Aparato experimental completo.	43
Figura 18 – Esquema de conexão do aparato de calibração. Em (a) protoboard e os dois sensores de áudio KY-038. (b) osciloscópio registrando as medidas dos sensores. (c) placa Arduino Mega 2560, conectado aos sensores. (d) zoom dos dados registrados pelo osciloscópio.	44
Figura 19 – Atenuação do sinal e diferença de fase entre as duas ondas, provenientes dos dois sensores	45
Figura 20 – Ruído em uma medida feita utilizando sensores de áudio em corrente contínua . . .	47
Figura 21 – Em (a) o circuito Schmitt Trigger. (b) curva de Histerese.	47
Figura 22 – Em (a) circuito integrado SN74HC14N. (b) esquema do circuito	48
Figura 23 – Em (a) parte da frente microfone. (b) parte de trás circuito integrado Max4466. . .	49
Figura 24 – Em (a) diagrama esquemático do Schmitt Trigger e as formas de onda de entrada e saída. (b) A curva de histerese. (c) Diagrama das tensões de entrada e saída. (d) Exemplo prático de aplicação.	49
Figura 25 – Selecionada a opção de frequência.	50

Figura 26 – Dados coletados pelo Arduino e impressos no monitor serial.	51
Figura 27 – Formas de ondas do sensor A e B	53
Figura 28 – Primeira inversão do Schmitt Trigger	54
Figura 29 – Segunda inversão do Schmitt Trigger	55
Figura 30 – Ponto de cruzamento entre os dois sensores	55
Figura 31 – Largura do pulso 1	56
Figura 32 – Largura do pulso 2	56
Figura 33 – Diferença de tempo entre as bordas de descida dos dois sensores	57
Figura 34 – Simetria da diferença de tempo, entre os dois sensores	57
Figura 35 – Medidas realizadas pelo Arduino	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
ISR	<i>Rotina de serviço de interrupção</i>
STEM	<i>Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática</i>
TICs	Tecnologias da Informação e Comunicação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	EXPERIMENTOS DIDÁTICOS DE BAIXO CUSTO E A PLATAFORMA ARDUINO	17
2.1.1	Hardware do Arduino	18
2.1.2	Software do Arduino	19
2.2	ENSINO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE ONDULATÓRIA	21
2.3	A DEFORMAÇÃO EM UM SÓLIDO ELÁSTICO	23
2.3.1	O estado de estresse ou tensão (STRESS)	23
2.3.2	O estados de deformação STRAIN	25
2.3.3	Módulo de Elasticidade	26
2.4	VIBRAÇÕES LONGITUDINAIS DAS BARRAS	28
2.4.1	Ondas longitudinais numa barra metálica cilíndrica	28
2.4.2	Vibrações longitudinais de uma barra com uma extremidade fixa e a outra livre	32
2.4.3	Vibrações longitudinais de uma barra com as duas extremidade livres	34
2.4.4	Vibrações longitudinais de uma barra com as duas extremidade fixas	35
3	METODOLOGIA	38
3.1	CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL . . .	38
3.1.1	Construção da parte eletrônica	38
3.1.2	Sistema de excitação da barra	41
3.1.3	Determinação da velocidade pelo tempo de voo	42
3.1.4	CALIBRAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	44
3.2	Funcionamento do sistema eletrônico	46
3.2.1	Circuito Schmitt Trigger	46
3.2.2	Captação e tratamento do sinal	48
3.3	Interface serial do Arduino	50
3.3.1	Comentários sobre o firmware implementado	50
3.4	Abordagem Didática por Meio de Roteiro Experimental	51
3.4.1	Aplicação Educacional e Orientada do Procedimento	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Resultados obtidos com osciloscópio	53
4.1.1	Medida da velocidade pelo tempo de voo	56
4.2	Resultados obtidos pelo Arduino	59

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – ROTEIRO EXPERIMENTAL	65
	APÊNDICE B – CÓDIGO UTILIZADO NA PRÁTICA EXPERIMEN- TAL	73

1 INTRODUÇÃO

O uso das novas tecnologias no ensino de física tem sido motivo de grande atenção nas últimas décadas. É praticamente unânime o pensamento de que essas ferramentas devem ser parte integrante dos currículos, desde o ensino básico até cursos de graduação, com o intuito de tornar o ensino de física atraente e, ao mesmo tempo, levar a uma aprendizagem significativa. A Nova Base Nacional Comum Curricular (BNCC) (Brasil, 2018), por exemplo, sugere uma abordagem investigativa a partir de problemas contextualizados que, dentro do cenário contemporâneo, é importante compreender e analisar o uso e potencialidade de materiais e/ou tecnologias. Sem dúvidas, uma tendência em tornar as aulas de física mais contextualizadas e integradas com tecnologias vem sendo adotada por diversos países que, cada vez mais, se voltam para uma educação STEM (acrônimo do inglês *Science, Technology, Engineering and Mathematics*), ou seja, uma proposta que integre o ensino de ciências e áreas correlatas, tais como tecnologia, engenharia e matemática (Pugliese, 2020).

Particularmente no ensino de Física, o laboratório didático é um ambiente que propicia o contato inicial de alunos com diversos instrumentos que serão fundamentais para o entendimento e aplicação da teoria na prática, dominando ferramentas e técnicas que poderão ser utilizadas em investigações científicas (Grandini; Grandini, 2004). Existem diversos fornecedores comerciais de materiais didáticos que possuem linhas completas de equipamentos para a realização das mais variadas atividades. Estas empresas fornecem kit para experimentos didáticos em todas as grandes áreas da física onde temos, em geral, um dispositivo que realiza o controle de sensores e a interface com um computador para aquisição e análise de dados. No entanto, o uso destes kits nas escolas públicas enfrenta alguns obstáculos tais como alto custo e burocracia envolvida na aquisição. Assim, para equipar laboratórios que atendam às necessidades de uma instituição de ensino ou pesquisa demanda grandes investimentos e muitas escolas ainda não possuem esta importante ferramenta.

Em contrapartida, os experimentos de baixo custo têm se mostrado uma alternativa para aqueles professores que desejam realizar atividades práticas, enriquecer suas aulas e melhorar o aprendizado de seus estudantes (Neves *et al.* 2019; Almeida; Dias; Julião, 2017; Duarte, 2012). Com a popularização das tecnologias, o desenvolvimento de experimentos que demonstrem algum tipo de conceito físico está cada vez mais acessível, principalmente quando se utiliza *smartphones* (Ariston *et al.*, 2022).

O uso do Arduino, uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto que permite aos usuários criar objetos eletrônicos interativos, tem se tornado cada vez mais frequente no desenvolvimento de aparatos experimentais capazes de promover a coleta e transferência de dados oriundos de experimentos didáticos. Em trabalhos recentes, encontramos exemplos de aplicações que vão desde a mecânica clássica até experimentos envolvendo Física Moderna (Oliveira *et al.*, 2020; Cardoso; Zannin, 2019; Silveira; Bartherm; Santos, 2019; Cordova; Tort, 2016; Cavalcante; Tavolaro; Molisani, 2011). Dentre esta vasta quantidade de temas explorados com a utilização do Arduino, destacamos os experimentos no campo da acústica. Recentemente,

Sousa Jr *et al.* (2020), por exemplo, desenvolveram um aparato para estudo do som emitido por cordas vibrantes utilizando a plataforma Arduino com um conjunto de sensores, onde foi determinado a velocidade de propagação do som nas cordas para diferentes tipos de material analisando seus modos normais de vibração. Pizetta *et al.* (2017) analisaram ondas de som estacionárias em um tubo de ar, onde a intensidade da onda sonora emitida por alto-falante em uma das extremidades do tubo era medida por um microfone que se comunicava com uma placa Arduino.

Destacamos ainda, que o Arduino tem sido utilizado em recentes trabalhos que vão desde aplicações na indústria (Mir; Rajguru, 2018) até aplicações envolvendo inteligência artificial e internet das coisas (Ganesh *et al.*, 2021) e, portanto, o contato dos futuros professores de física (e também outras áreas) com esta tecnologia é fundamental para a compreensão de uma sociedade cada vez mais automatizada e dependente da tecnologia da informação.

Medidas de velocidade do som em meios materiais tem sido realizado por diferentes técnicas. Entretanto, muitas dessas abordagens envolvem equipamentos que são de difícil acesso como, por exemplo, osciloscópios (Hart, 1986; Key; Smidrovskis; From, 2000), fontes de corrente e geradores de frequência. Neste sentido, desenvolvemos um experimento de medidas de velocidade do som em materiais sólidos com equipamentos relativamente baratos e de fácil execução usando a plataforma Arduino. Além disso, uma outra motivação está relacionada à ausência desse tipo de realização experimental na maioria dos kits didáticos de Física básica. Portanto, nosso aparato experimental, servirá como uma alternativa viável para medidas de velocidade de meios sólidos e sua relação com propriedades mecânicas tais como o módulo de Young que está relacionado com a elasticidade de um material.

Nos diferentes níveis de ensino, o uso da tecnologia já é uma exigência da sociedade para a formação dos estudantes. O desenvolvimento tecnológico depende de profissionais capazes de analisar e interpretar dados do mundo real. Nesse sentido, a introdução prática de situações que envolvam a coleta experimental e a análise de dados por computador representa uma importante estratégia na formação dos novos professores de física e demais cursos relacionados. Desta forma, as aulas experimentais que possibilitem o uso de tecnologias entram em cena como ferramentas fundamentais que viabiliza a ligação entre teoria e prática.

Nos últimos anos, tem-se observado um número crescente de propostas para atividades didáticas que envolvem o uso de TICs (Tecnologias da Informação e Comunicação) com aumento significativo no número de atividades práticas assistidas por microcomputadores. Assim, não podemos negar que a educação no mundo moderno deve se basear na premissa de uso de ferramentas que facilitem interações e descobertas e permitam a elaboração de produtos e soluções para os mais diversos tipos de problemas e desafios dentro do meio social. Experimentos de baixo custo envolvendo sistemas automatizados têm sido desenvolvidos pela comunidade acadêmica e grande parte dos projetos são disponibilizados de forma gratuita na internet ou revistas dedicadas. No que se refere à plataforma Arduino, a comunidade de usuários que usam esse tipo de tecnologia disponibiliza seus projetos em sites de acesso público e gratuito, tornando-

o uma ferramenta com grande potencial para desenvolvimento de propostas experimentais dentro da Física, bem como aplicações na indústria, internet das coisas e inteligência artificial.

Com o intuito de atingir o objetivo principal, foram definidas as seguintes etapas: Desenvolver um sistema de aquisição de dados experimentais, baseado na plataforma Arduino, para estudar o comportamento mecânico de uma barra submetida a oscilações periódicas, projetando e implementando as soluções de hardware, software que permitam determinar a velocidade de propagação do som em materiais sólidos e, a partir desse, dado calcular o módulo de Young do material.

Além disso, deixará como legado todo o conjunto de hardwares e softwares que podem ser utilizados como produtos educacionais para estudo de ondulatória e que ainda podem ser adaptados para instrução na indústria e outros campos de estudo onde ondas sonoras são importantes, justificando assim relevância desta pesquisa para a comunidade acadêmica e para a sociedade, com especial destaque para aplicações no ensino de física.

Para tanto, o trabalho está estruturado da seguinte forma: inicialmente, a seção de fundamentação teórica apresenta uma análise dos experimentos didáticos de baixo custo e do uso da plataforma Arduino no ensino, enfatizando a integração entre a teoria e a prática nas aulas de Física. Em seguida, aborda as características dos materiais e a dedução da equação que descreve a onda sonora em uma barra metálica.

Já na segunda parte, é apresentada a metodologia utilizada no trabalho, incluindo a construção e calibração do aparato experimental, o funcionamento da eletrônica e o processo de aquisição de dados.

Na terceira parte, serão apresentados os resultados obtidos com a prática experimental, assim como a comparação desses dados com aqueles já existentes na literatura, a fim de validar a utilização do aparato em aulas experimentais e outras aplicações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EXPERIMENTOS DIDÁTICOS DE BAIXO CUSTO E A PLATAFORMA ARDUINO

A falta de laboratórios de ensino nas escolas do Brasil é uma questão séria no que tange o ensino de física (Silva; Leal, 2017). Embora as escolas possuam esses espaços, frequentemente eles não são utilizados adequadamente, seja pela ausência de materiais necessários para a execução de experimentos, ou pelo alto preço dos equipamentos experimentais disponíveis. Essas restrições complicam a execução de aulas práticas e, por consequência, o aprendizado dos estudantes. Em resposta a essa situação, vários pesquisadores têm sugerido a aplicação de tecnologias e experimentos pedagógicos de baixo custo, como Arduino e impressão 3D, com a finalidade de democratizar o acesso às aulas práticas e tornar a educação mais inclusiva e acessível (Admiral, 2020). Uma vez que as aulas práticas e que envolvem a interações direta dos alunos com o assunto tratado, mostrou-se um grande aliado as aulas teóricas discutidas em sala de aula.

Com a crescente popularização das modelagens e impressoras 3D, que hoje estão cada vez mais acessíveis, essa tecnologia pode se tornar uma grande aliada na construção de experimentos de baixo custo. Os materiais utilizados nas impressoras 3D possuem preços relativamente baixos, viabilizando para os professores uma alternativa prática e econômica para a realização de aulas experimentais (Evangelista; Oliveira, 2021). Além disso, os alunos podem não apenas participar da etapa final (com o experimento já montado), mas também de todo o processo, desde a modelagem das peças – utilizando plataformas de software que, em muitos casos, são gratuitas – até a construção do aparato experimental. Essa participação ativa em todas as fases promove uma aprendizagem mais significativa, como defendido por David Ausubel (1968), ao envolver os estudantes de maneira mais profunda e interativa no processo de construção do conhecimento (Ausubel, 1968).

Um exemplo promissor de tecnologia acessível para o ensino de física é a plataforma Arduino (Arduino, 2024). Este sistema de prototipagem eletrônica de baixo custo permite a criação de diversos programas que podem ser confluentes aos experimentos didáticos que foram produzidos nas impressoras 3D, tornando-se uma ferramenta valiosa tanto para professores quanto para estudantes. Com o Arduino, é possível desenvolver projetos práticos que envolvem a medição de grandezas físicas, como temperatura, pressão, velocidade do som, entre outros, utilizando sensores e componentes eletrônicos simples e baratos (Sousa JR *et al.*, 2020). Além de seu baixo custo, o Arduino promove um aprendizado mais interativo, estimulando a curiosidade e o pensamento crítico dos alunos ao permitir que eles montem, programem e testem seus próprios experimentos. O Arduino também conta com uma grande vantagem que é a disponibilização de códigos abertos que foram produzidos por outros usuários e disponibilizados gratuitamente, como também é conhecido como “*open-source*”. Dessa forma, o uso dessa plataforma contribui para superar as barreiras financeiras e logísticas dos laboratórios tradicionais, ao mesmo tempo em que oferece uma abordagem mais dinâmica e criativa no ensino de conceitos físicos.

Diante da escassez de laboratórios didáticos nas escolas brasileiras e das limitações impostas pelos altos custos dos equipamentos tradicionais, o uso de tecnologias e experimentos de baixo custo, como a plataforma Arduino e as impressoras 3D, surge como uma solução viável e eficaz. Essas ferramentas não apenas democratizam o acesso às aulas experimentais, mas também proporcionam uma experiência de aprendizado mais interativa e significativa, onde os alunos podem participar ativamente de todo o processo, desde a modelagem até a construção dos experimentos. A disseminação crescente dessas tecnologias, associada ao movimento *open-source*, possibilita que educadores juntamente com as instituições de ensino superem as barreiras financeiras e implementem aulas práticas que estimulam a curiosidade e o pensamento crítico, por parte dos alunos. Assim, o uso de experimentos didáticos de baixo custo juntamente a plataformas gratuitas de criação de códigos, apresenta-se como um caminho promissor para tornar o ensino de física mais acessível, inclusivo e alinhado às demandas do século XXI.

2.1.1 Hardware do Arduino

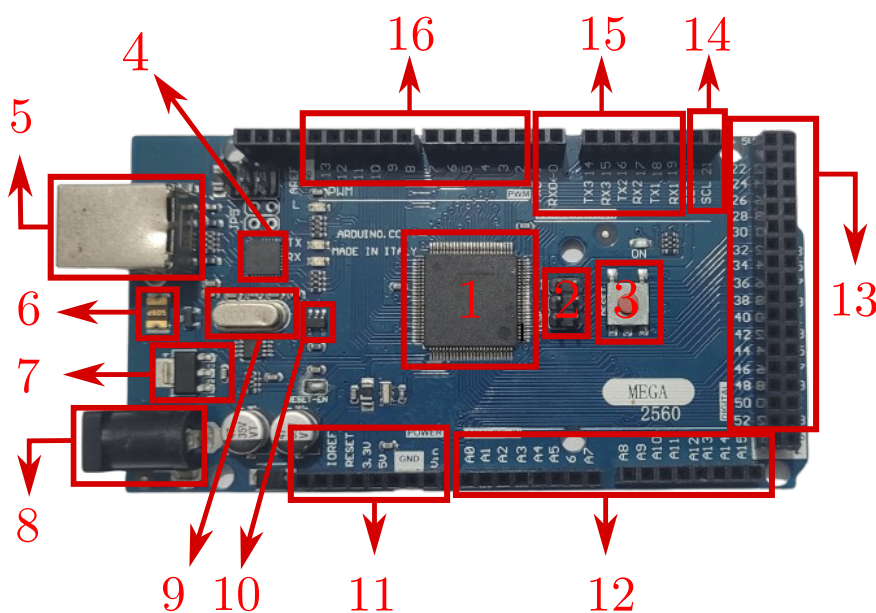
O Arduino é formado por um hardware constituído de uma placa eletrônica projetada para interagir com o ambiente através de sensores e atuadores. No núcleo dessas placas encontra-se o microcontrolador Atmega AVR, fabricado pela empresa Atmel, que oferece suporte para entradas e saídas digitais e analógicas. Essa capacidade permite ao Arduino processar sinais captados por sensores e controlar dispositivos eletrônicos, como motores e LEDs.

Para acessar as funcionalidades do Arduino e realizar as programações necessárias, ele é conectado ao computador por meio de uma porta USB, embora também possa funcionar de forma autônoma. Para operar de maneira independente, a placa precisa ser previamente programada e conectada a uma fonte de alimentação externa, cuja especificação varia conforme o modelo utilizado. A escolha do modelo de Arduino mais adequado depende das exigências específicas de cada projeto. Por exemplo, aplicações que demandam maior capacidade de processamento e um maior número de portas podem optar pelo Arduino Mega 2560, enquanto projetos mais simples e compactos podem utilizar modelos como o Arduino Nano ou o Pro Mini. Graças à sua ampla variedade de opções e à sua flexibilidade, o Arduino se destaca como uma ferramenta eficiente e versátil, capaz de atender a diferentes níveis de complexidade e necessidades em projetos de eletrônica e automação.

Há uma ampla variedade de modelos de placas Arduino disponíveis, como o Arduino Uno, Arduino Mega 2560, Arduino Leonardo, Arduino Due, Arduino Nano, Arduino Pro Mini e Arduino Esplora. Esses modelos diferem em diversos aspectos, incluindo o tamanho, a versão do microcontrolador utilizado, a quantidade de portas analógicas e digitais, o número de portas PWM (que permitem controlar sinais digitais com largura de pulso ajustável), a capacidade de memória, a tensão de operação e as especificações de alimentação.

Na Fig. 1, apresentamos um modelo do Arduino Mega2560, que será utilizado no trabalho, com suas respectivas especificações.

Figura 1 – Especificações da placa Arduino Mega2560.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

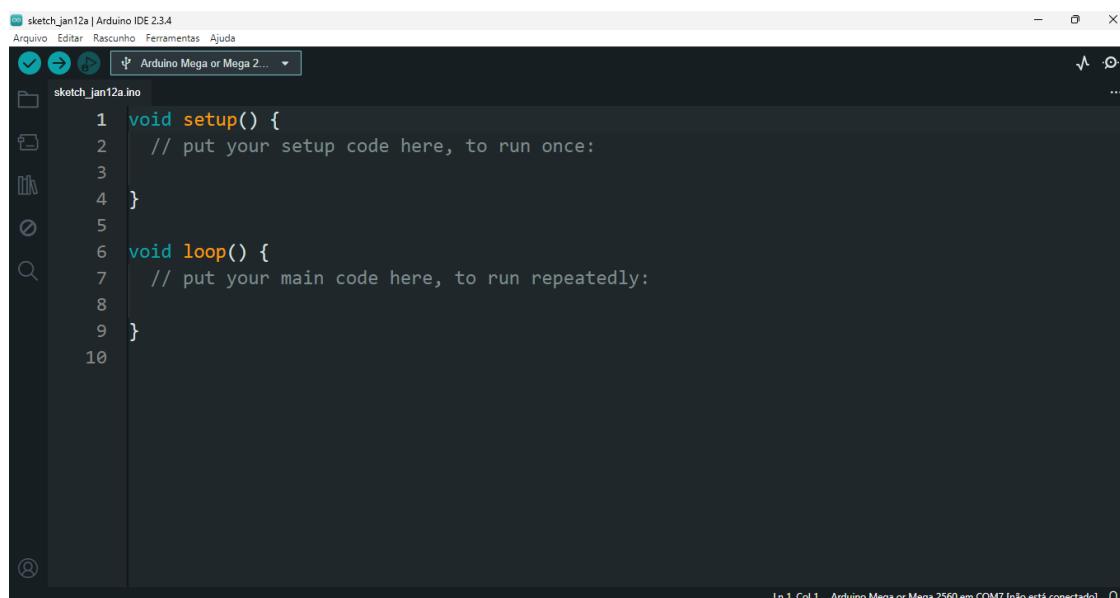
O sistema conta com: (1) microcontrolador ATMEGA 2560, (2) conector para gravação ICSP do ATMEGA 2560, (3) botão de RESET, (4) ATmega16u2 encarregado da comunicação com o computador, (5) conector USB Tipo B, (6) fusível para proteção da USB, (7) regulador de tensão DC para 5V, (8) conector DC, (9) cristal de quartzo de 16 MHz, (10) regulador de tensão DC para 3,3V, (11) pinos de alimentação, (12) entradas analógicas, (13) entradas e saídas digitais de uso geral, (14) TWI (Interface de dois fios), (15) comunicações seriais e (16) saídas PWM.

Esses componentes, compõem a estrutura essencial do Arduino, permitindo que ele funcione como uma plataforma versátil para projetos eletrônicos e de automação.

2.1.2 Software do Arduino

O Arduino conta com uma IDE (*Integrated Development Environment*, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado), que é uma ferramenta essencial para seu funcionamento. Por meio dessa interface, é possível escrever os códigos necessários para o projeto e enviá-los para a placa através de uma conexão USB. Esses códigos são gravados diretamente no microcontrolador da placa, permitindo que ela execute as instruções programadas. A IDE do Arduino oferece um ambiente simplificado e eficiente para programar sua placa. Nela, é possível criar os códigos necessários para controlar diferentes dispositivos eletrônicos, como sensores, motores, LEDs e muito mais, de maneira prática e acessível. Tudo o que você precisa para desenvolver e gerenciar seus projetos está reunido em um único espaço. Na Fig. 2, podemos observar a interface da IDE e como a escrita do código é apresentada.

Figura 2 – IDE do Arduino.



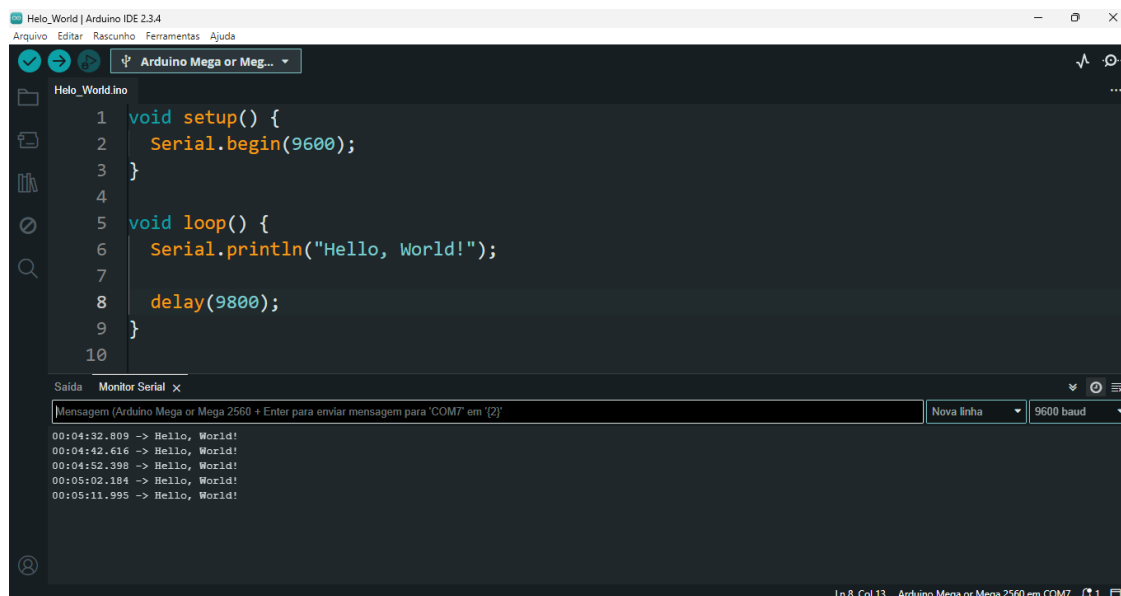
Fonte: Arduino, 2024.

Na Fig. 2, as funções `void setup()` e `void loop()` desempenham papéis essenciais na escrita do código que será executado pelo Arduino. A função `void setup()` é utilizada para as configurações iniciais, como a definição dos pinos de entrada e saída, a comunicação serial e a configuração dos sensores, entre outras. Essa função é executada apenas uma vez, logo após o Arduino ser ligado. Já a função `void loop()` é responsável por executar o código repetidamente enquanto o Arduino estiver ligado. Ela controla a leitura de sensores, o acionamento de atuadores e a lógica de processamento do sistema. Dessa forma, podemos entender o `void setup()` como a etapa de inicialização do código e o `void loop()` como a parte responsável pela lógica principal do programa.

Por ser uma plataforma *open-source* (código aberto), o Arduino oferece uma ampla variedade de bibliotecas, disponibilizadas gratuitamente pelos usuários. Essas bibliotecas podem ser baixadas e utilizadas a qualquer momento em seus projetos. A linguagem de programação utilizada pelo Arduino é baseada em C e C++, com algumas simplificações para tornar a programação mais acessível, especialmente para iniciantes. Além disso, a plataforma conta com uma variedade de bibliotecas que podem ser utilizados em projetos complexos, permitindo maior precisão nos resultados, utilizando os registradores do Arduino. No entanto, projetos mais avançados podem exigir um conhecimento mais aprofundado em linguagens de programação por parte do usuário. Na Fig. 3, é possível visualizar um código em execução, um dos mais simples e comumente utilizado por iniciantes, conhecido como "Hello World".

A IDE, é totalmente gratuita e que pode ser baixada no site oficial do Arduino, sendo compatível com os sistemas operacionais Mac, Windows e Linux (Arduino, 2024).

Figura 3 – Código sendo rodado no Arduino.



Fonte: Arduino, 2024.

2.2 ENSINO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE ONDULATÓRIA

A ondulatória é um ramo fundamental da física que estuda os fenômenos relacionados às ondas e oscilações, que desempenham um papel essencial na sociedade altamente tecnológica em que vivemos. Quando falamos sobre ondas, existem dois tipos principais que devem ser considerados para o entendimento do tema, que são ondas mecânicas e as ondas eletromagnéticas.

As ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagar, como o ar, uma barra metálica ou a água. Serão essas ondas o foco deste trabalho. Em contraste, as ondas eletromagnéticas, como a luz, não precisam de um meio material, podendo se propagar no vácuo. Um exemplo comum de onda mecânica é o som, que se propaga pelo ar. Nós conseguimos ouvir uma pessoa falando porque as vibrações das suas cordas vocais são transmitidas pelo ar até nossos ouvidos, onde fazem vibrar os tímpanos. Essas vibrações são então convertidas em impulsos elétricos que o cérebro interpreta como som, permitindo-nos identificar a voz de quem fala. A seguir, apresentamos alguns conceitos trabalhados tanto no ensino médio quanto no superior, destacando as principais diferenças em suas abordagens.

Nos livros de ensino médio, o estudo geralmente começa com o Movimento Harmônico Simples (MHS), seguido pelos conceitos de ondas e, por fim, pelos princípios de acústica. No nível superior, esses mesmos tópicos são abordados com maior profundidade e rigor matemático. Por exemplo, no ensino médio, o MHS é frequentemente apresentado por meio de uma analogia com o Movimento Circular Uniforme (MCU), já que uma abordagem baseada nas leis de Newton resultaria em uma equação diferencial ordinária, o que ultrapassa o escopo matemático desse nível (Bôas; Doca; Biscuola, 2012). No ensino superior, por outro lado, o MHS é analisado utilizando equações diferenciais, transformadas de Fourier e técnicas avançadas para a resolução

de problemas ondulatórios.

No capítulo dedicado ao estudo das ondas, tanto no ensino médio quanto no superior, são abordadas ondas mecânicas e eletromagnéticas. A principal diferença está na profundidade da abordagem no nível superior, onde há uma preocupação em demonstrar a equação de onda em uma dimensão, discutir a equação das cordas vibrantes, a intensidade das ondas, a reflexão, os modos normais de vibração, o movimento geral da corda, a análise de Fourier, entre outros tópicos relevantes (Nussenzveig, 2014). Já no ensino médio, o estudo é mais limitado, com ênfase nos tipos de ondas (mecânicas, eletromagnéticas, longitudinais e transversais) e nos elementos básicos das ondas, como amplitude, comprimento de onda, frequência, período e velocidade de propagação. Fenômenos como reflexão, refração, difração e interferência são abordados de maneira conceitual e intuitiva. As equações utilizadas são mais simples e diretas, como a equação da velocidade da onda $v = \lambda f$, e o foco está na resolução de problemas básicos e na compreensão de fenômenos do cotidiano.

Em ambos os níveis de ensino, as bibliografias básicas, como (Nussenzveig, 2014) e (Bôas; Doca; Biscuola, 2012), não incluem conceitos como tensão (*stress*) e deformação (*strain*) no contexto da propagação de ondas em meios sólidos, como metais e suas propriedades. No entanto, compreender a propagação de vibrações mecânicas, como o som, em estruturas metálicas sólidas, como pontes e edifícios, é de extrema importância, uma vez que possui aplicações diretas na construção civil e na engenharia. Além disso, muitos laboratórios de nível superior carecem de equipamentos experimentais adequados para realizar essa análise, e nas escolas de ensino médio essa limitação é ainda mais acentuada, como já discutido. Isso resulta em uma lacuna no processo de ensino-aprendizagem em ambos os níveis no que tange o estudo das ondas sonoras.

A implementação destes conteúdos no currículo, seria capaz de contribuir para uma aprendizagem mais significativa, uma vez que o aprendizado se torna mais palpável e de melhor compreensão quando o alunos, fazem assimilações com situações práticas dos fenômenos da natureza ao seu redor (Moreira, 2021). Ao explorar esses fenômenos de maneira mais aplicada, os estudantes não só aprimoram sua compreensão dos conceitos físicos, mas também desenvolvem habilidades críticas e analíticas que lhes permitem enxergar a física como uma ciência conectada ao mundo real. Essa abordagem enriqueceria o processo educacional, tornando o aprendizado mais engajante e útil para a vida cotidiana.

Em vista disso, o presente trabalho surge como uma tentativa de solucionar o impasse no ensino de ondulatória, uma vez que apresenta um material teórico completo sobre os assuntos tratados anteriormente, que pode ser utilizado no nível superior com o mesmo rigor descrito e, para o ensino médio, de forma mais conceitual, adaptando a matemática utilizada. O aparato experimental tem a vantagem de ser de baixo custo, com manuseio relativamente simples, utilizando o Arduino como interface interativa para a coleta de dados, facilitando a compreensão em ambos os níveis de ensino e sem fala na utilização da impressora 3D para imprimir as peças, que serão utilizadas na prática. O aluno pode participar de todo o processo, desde a

impressão das peças até a montagem e a personalização de novos modelos, de acordo com suas necessidades. E por meio do aparato experimental proposto, o aluno tanto do nível superior quanto de nível médio, deverá ser capaz de compreender a relação entre o módulo de Young e a velocidade de propagação. Ou seja, dado a velocidade de propagação no material, ele seja capaz de calcular o módulo de Young do mesmo, uma vez que sejam apresentadas aos estudantes as diferentes elasticidades dos materiais, o estudante deve ser capaz de pressupor em qual deles a velocidade será maior. Dessa forma, torna-se um grande aliado na integração entre teoria e prática, e reforçando ainda mais a importância da utilização de aulas experimentais no ensino de Física.

2.3 A DEFORMAÇÃO EM UM SÓLIDO ELÁSTICO

Em ciências dos materiais, uma análise frequentemente realizada é a determinação das propriedades físicas de um material. Para isso, utiliza-se uma série de conceitos fundamentais, como os de *estresse/tensão* e *deformação*, que descrevem o comportamento do material quando submetido a forças externas. Esses conceitos permitem compreender como o material responde às solicitações mecânicas, revelando características essenciais, como resistência, elasticidade e ductilidade. As diferenças entre cada um deles serão apresentadas a seguir, assim como o significado que cada um representa.

2.3.1 O estado de estresse ou tensão (STRESS)

A tensão, ou estresse, está relacionada às forças internas que surgem dentro de um material quando este é submetido a uma carga externa. Esse conceito é definido como a força aplicada por unidade de área.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (2.1)$$

onde, σ é tensão em Pascal, Pa , ou N/m^2 , F é a Força aplicada em Newtons N e A Área da seção transversal onde a força é aplicada em m^2 .

Um aspecto essencial na análise de tensões é que elas são avaliadas ponto a ponto dentro do material. Para descrever o estado de tensão em um ponto específico, no interior do material considera-se um elemento cúbico infinitesimal (Ward; Sweeney, 2004). Esse cubo é utilizado como referência para entender como as forças se distribuem internamente de maneira geral. Temos também as tensões normais σ , como pode ser observado na Fig. 4 que são perpendicularmente as faces do cubo, que indica tração ou compressão, e as de cisalhamento que atuam paralelamente as faces e que são dadas por τ , que estão relacionadas a tendência em distorcer o material. É importante ressaltar que a tensão normal possui um sinal específico: ela é positiva quando está associada à tração e negativa quando relacionada à compressão. Já a tensão de cisalhamento é sempre considerada em módulo.

Vamos definir a pressão hidrostática P , que é tratada como uma tensão uniforme agindo no material. No contexto deste estudo, as forças serão analisadas em suas nove componentes, as quais são:

$$P_1 = \sigma_{xx} + \tau_{xy} + \tau_{xz} \quad (2.2)$$

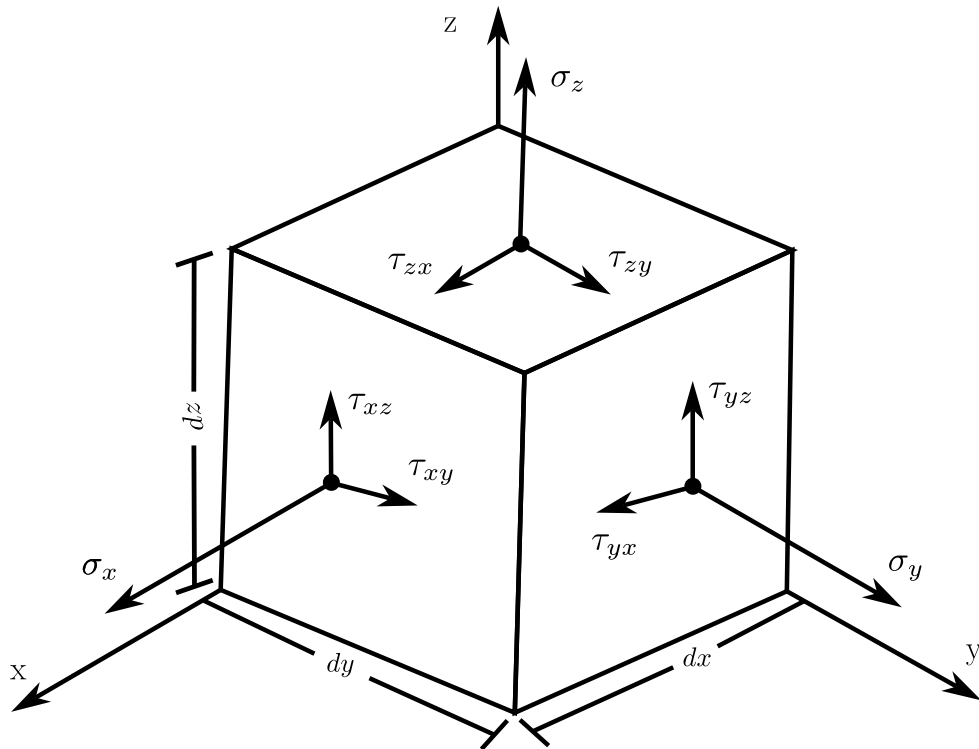
$$P_2 = \tau_{yx} + \sigma_{yy} + \tau_{yz} \quad (2.3)$$

$$P_3 = \tau_{zx} + \tau_{zy} + \sigma_{zz} \quad (2.4)$$

Assim, o tensor pode ser expresso matricialmente, representando as tensões atuantes em um ponto de análise, conforme a seguinte expressão:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Figura 4 – Tensões em um elemento infinitesimal de um cubo.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

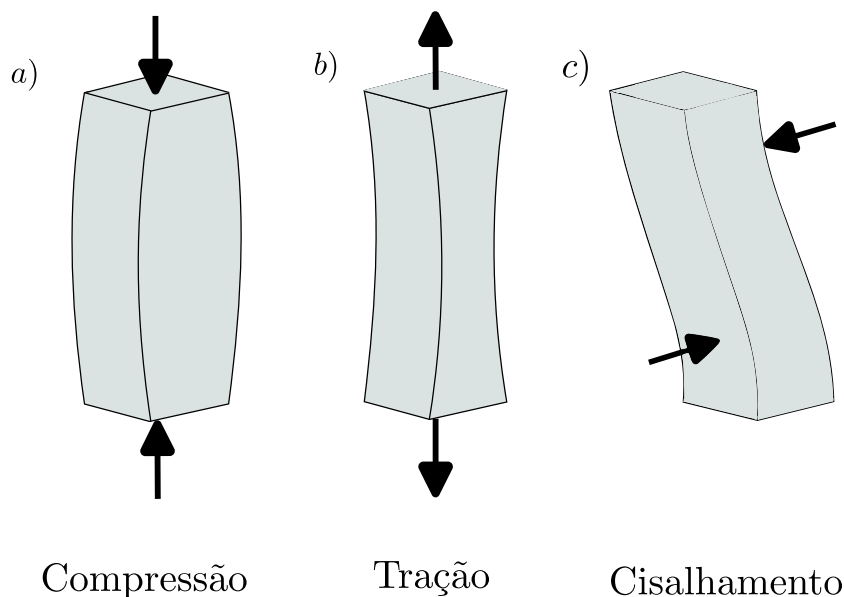
De maneira geral, o tensor de tensões é a ferramenta matemática que nos permite descrever e calcular as tensões que atuam em um material quando este está submetido à ação de uma carga externa. Ele fornece uma representação completa do estado de tensão em cada

ponto do material, considerando tanto as tensões normais quanto as tensões de cisalhamento. Vale destacar que estamos considerando um regime estático, ou seja onde o material em questão esta em repouso.

2.3.2 O estados de deformação STRAIN

A deformação está associada à aplicação de uma carga externa sobre um corpo, resultando em alterações em sua forma ou tamanho. Esse fenômeno está diretamente relacionado à tensão a que o material está submetido, podendo ocorrer de diferentes maneiras (Ward; Sweeney, 2004). Quando a deformação está ligada a esforços que alongam ou comprimem o material, como na Fig. 5(a) e Fig. 5(b), ela é denominada tensão normal, podendo ser de tração (alongamento) ou compressão (encurtamento). Por outro lado, quando as alterações no material resultam de forças que promovem um deslizamento entre camadas internas, Fig. 5(c) caracteriza-se a tensão de cisalhamento, também conhecida como tensão de distorção. Essas deformações dependem não apenas da magnitude da carga aplicada, mas também das propriedades intrínsecas do material, como rigidez e ductilidade. Na Fig. 5, é possível visualizar esse caso descrito.

Figura 5 – a) e b), são as representações da tensão normal. E c) da tensão de cisalhamento.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

De maneira geral a expressão matemática para a deformação de um material é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (2.6)$$

onde ε é deformação (adimensional, pode ser representada em porcentagem), ΔL é variação do comprimento ($L_f - L_0$) e L_0 , comprimento original.

Toda estrutura ou material, quando submetido a variações térmicas e/ou tensões, sofre deformações. No entanto, ao serem removidos esses esforços, os corpos tendem a retornar ao seu estado inicial. Essa capacidade dos materiais de recuperar sua forma original após a remoção das forças aplicadas é denominada “elasticidade”.

Neste caso, existem dois tipos de deformação, dependendo do material em questão. A deformação elástica ocorre em materiais que, quando deformados, retornam ao seu estado original após a remoção da força aplicada. Por exemplo, o aço, ao ser submetido a pequenas forças, sofre deformações elásticas e recupera sua forma inicial. Outro exemplo é um elástico de borracha, que também retorna ao seu estado original quando submetido a forças moderadas.

Já a deformação plástica é o oposto da elástica. Nesse caso, o material não retorna ao seu estado inicial, permanecendo permanentemente deformado (esticado ou comprimido), dependendo da força aplicada. Em muitos casos, a deformação plástica pode levar ao rompimento ou quebra do material. Um exemplo clássico é a argila: ao ser modelada, ela muda de formato e mantém a forma adquirida. Polímeros rígidos, como o PVC e outros tipos de plásticos, também podem sofrer deformação plástica, dependendo da tensão ou da temperatura a que são submetidos.

Outra característica importante é a isotropia, uma propriedade associada ao comportamento elástico de materiais, descrita pelo *módulo de elasticidade* ou *módulo de Young* (E), que depende do material de que a estrutura é feita. Em materiais isotrópicos, quando uma tensão é aplicada em qualquer direção (x , y e z), seja de tração ou compressão, o módulo de elasticidade permanece constante, ou seja, o material apresenta o mesmo comportamento mecânico em todas as direções. Esses materiais são denominados isotrópicos.

Por outro lado, existem materiais chamados anisotrópicos, como a madeira. Sua estrutura é formada por fibras organizadas de maneira desigual, o que influencia diretamente no comportamento mecânico. Por exemplo, ao aplicar uma tensão tangencial às fibras, o material terá um comportamento mecânico diferente de quando a tensão é aplicada ortogonalmente às fibras. Esse comportamento varia de acordo com a direção da aplicação da força, evidenciando a anisotropia do material.

Essas são algumas características importantes para o estudo do comportamento dos materiais e de como eles reagem à aplicação de cargas externas. A partir disso, é possível determinar propriedades intrínsecas desses materiais. Neste trabalho, abordaremos uma delas, fundamental para sua descrição, que é o módulo de Young.

2.3.3 Módulo de Elasticidade

O módulo de Young (E), também conhecido como módulo de elasticidade, descreve a rigidez de um material elástico, sendo uma propriedade mecânica fundamental desse material. Ele é amplamente utilizado em diversas áreas, como construção civil, indústria aeroespacial e automobilística, entre outras. Essa propriedade é essencial para determinar o grau de rigidez de um material e compreender seu comportamento elástico, aspectos fundamentais para o estudo na

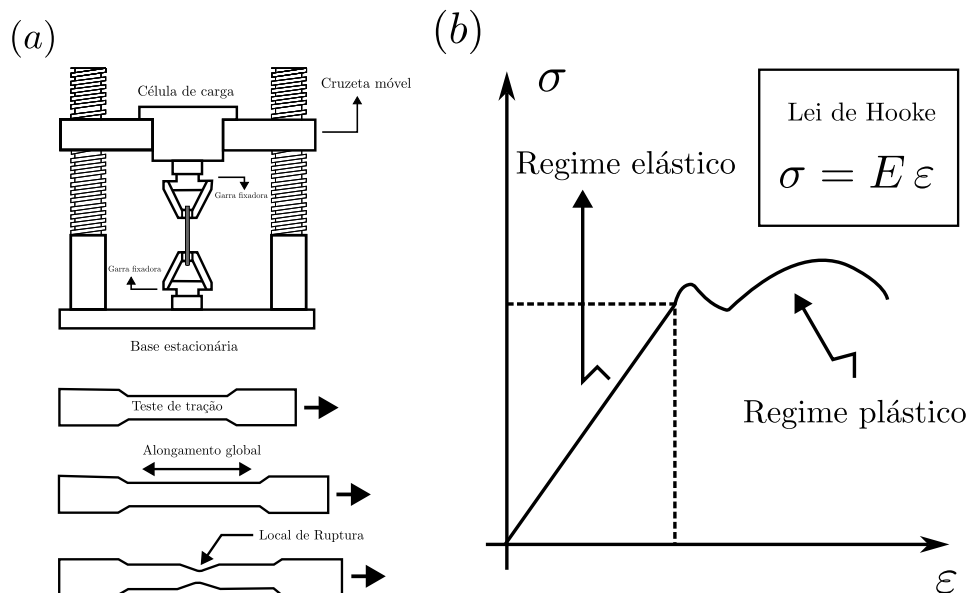
engenharia e em ciência dos materiais (Callister; Rethwisch, 2013).

Uma das maneiras de determinar o módulo de Young é por meio do conhecimento da velocidade de propagação do som em um material sólido (v) e de sua densidade (ρ), que também é uma característica intrínseca do material. Essa será a técnica utilizada neste trabalho para sua obtenção. Assim, por meio da Eq. 2.18, podemos obter a seguinte expressão para o cálculo do módulo de Young (E).

$$E = \rho v^2 \quad (2.7)$$

O módulo de Young pode depender de fatores como a pureza do material (sua composição) e a temperatura ambiente no momento da medição. Outra forma de determinar as características mecânicas de materiais isotrópicos é por meio do teste de tração uniaxial, como pode ser observado na Fig. 6.

Figura 6 – Em (a) Máquina de ensaio de tração. (b) Gráfico de tensão versus deformação.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Em (a), temos a máquina de ensaio de tração, que consiste basicamente em um corpo de prova (material em estudo) fixado em suas extremidades por meio de garras. Esse corpo de prova, por sua vez, é submetido a uma carga ou força de tração ao longo de seu eixo.

Por meio desse teste, é possível obter uma curva conhecida na engenharia e em ciência dos materiais como curva tensão-deformação (b), onde σ (sigma) representa a tensão e o ϵ (épsilon) a deformação. Os regimes elástico e plástico já foram discutidos na Seção 2.3.2.

Para determinar o módulo de Young por essa técnica, basta isolá-lo na equação da lei de Hooke, conforme descrito na figura 6. Dessa forma, obtemos a seguinte expressão.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.8)$$

2.4 VIBRAÇÕES LONGITUDINAIS DAS BARRAS

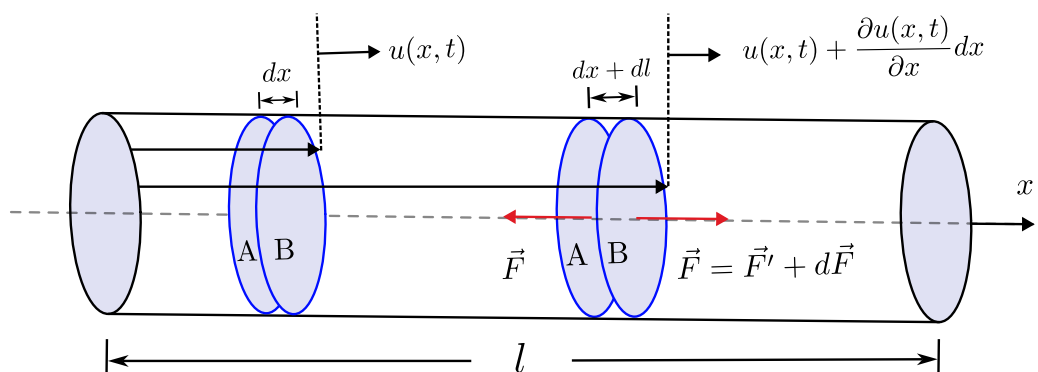
2.4.1 Ondas longitudinais numa barra metálica cilíndrica

Quando se aplica uma perturbação periódica em um dado ponto de um sólido elástico, uma onda se propaga em uma direção qualquer devido às propriedades de deformação que esse material possui. Esse movimento de vibração sempre pode ser tratado como uma combinação de movimentos transversais e longitudinais. Entretanto, para uma barra cujo comprimento é muito maior que o diâmetro, as vibrações transversais se tornam negligenciáveis em confronto com as vibrações longitudinais (Wood, 1930). Em um regime elástico, onde temos uma deformação reversível do material, uma compressão produzida por uma perturbação na extremidade de uma barra cilíndrica propaga-se ao longo da mesma com uma velocidade bem definida. O valor da velocidade depende do tipo de material envolvido e independe da intensidade da perturbação aplicada, ou seja, a velocidade de transmissão é independente da frequência ou amplitude (desde que não seja grande o suficiente para deformar irreversivelmente o material) e é determinada apenas pelas propriedades físicas do meio envolvido.

Para compreender as propriedades físicas de um meio material sólido submetido à uma perturbação, vamos considerar uma barra cilíndrica feita de um material elástico (como um metal), cuja seção transversal e densidade são constantes, como está representado na Fig. 7. Analisemos o que acontece com o elemento infinitesimal de comprimento dx (entre os planos A e B da figura) quando uma onda elástica se propaga.

Quando uma perturbação é aplicada na extremidade da barra, ela gera uma deformação que se propaga ao longo do material, criando uma onda elástica. Essa onda pode ser de compressão, dilatação ou cisalhamento, dependendo do tipo de força aplicada. No caso de uma onda longitudinal, a deformação ocorre na mesma direção da propagação da onda. O elemento infinitesimal de comprimento dx , inicialmente em repouso, sofre uma variação de posição ao longo do eixo longitudinal da barra à medida que a onda passa.

Figura 7 – Elemento infinitesimal da barra.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Tomamos em $t = 0$ um elemento de comprimento limitado pelos planos A e B separados

por uma distância dx . Num instante posterior t esse elemento estará numa posição $(x + l)$ e a separação entre os planos será $(dx + dl)$, pois a barra sofre uma deformação. Essa deformação só existe se houver uma força líquida atuando sobre o elemento dx de modo que temos $F - F' = dF$. Assim, a deformação em uma barra submetida a forças externas pode ser descrita em termos do deslocamento $u(x, t)$, que depende da posição x ao longo da barra e do tempo t . No contexto da teoria da elasticidade linear, a deformação longitudinal (*strain*) da barra (direção x) é $\varepsilon(x, t)$ e que é dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}. \quad (2.9)$$

Enquanto a tensão elástica (*stress*) na direção x é:

$$\sigma_x = \frac{F}{A}, \quad (2.10)$$

onde F é a força resultante que atua na seção transversal da barra com área A . Para pequenas deformações, ou seja, no regime elástico, as equações acima são relacionadas pela lei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (2.11)$$

A grandeza E conhecida como módulo de Young do material e, para materiais isotrópicos, é uma constante. Uma vez que a perturbação se propaga pelo material, a tensão elástica depende da posição, ou seja, $\sigma = \sigma(x)$, dessa forma:

$$dF = A \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx \quad (2.12)$$

Considerando que a massa em cada seção é $dm = \rho A dx$, onde ρ é a densidade do material, e que a aceleração a , é dada por $\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2}$, aplicando a segunda lei de Newton teremos:

$$\begin{aligned} dF &= dma \\ dF &= \rho A dx \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Substituindo a Eq. 2.13 na Eq. 2.12, obtemos:

$$\begin{aligned} A \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx &= \rho A dx \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= \rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Substituindo a Eq. 2.9 na Eq. 2.11, rescrevemos a lei de Hooke, da seguinte forma.

$$\sigma = E \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}, \quad (2.15)$$

diferenciando σ em respeito a x , temos:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= E \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}\end{aligned}\quad (2.16)$$

Finalmente, usando a lei de Hooke 2.16, na Eq. 2.14, teremos uma expressão para a equação da onda em uma barra metálica, ou seja:

$$\begin{aligned}E \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \\ \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} &= v^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2},\end{aligned}\quad (2.17)$$

onde definimos a velocidade de propagação da perturbação como v , e que é dada pela seguinte equação:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.18)$$

Para resolver a Eq. 2.17, uma equação diferencial parcial de segunda ordem, utilizaremos o método de separação das variáveis. Vamos começar definindo duas funções que dependem somente de uma variável, como $\psi(x)$ e $\phi(t)$. Dessa forma, vamos supor que a solução para a Eq. 2.17, possa ser escrita como um produto destas duas funções que acabamos de definir, então temos:

$$u(x,t) = \psi(x) \phi(t) \quad (2.19)$$

Substituindo a Eq. 2.19, na Eq. 2.17, temos:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial t^2} [\psi(x) \phi(t)] &= v^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} [\psi(x) \phi(t)] \\ \psi(x) \frac{\partial^2 \phi(t)}{\partial t^2} &= v^2 \phi(t) \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} \\ \frac{1}{\phi(t)} \frac{\partial^2 \phi(t)}{\partial t^2} &= v^2 \frac{1}{\psi(x)} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2}\end{aligned}\quad (2.20)$$

Como ambos os lados da equação dependem apenas de uma única variável, obtemos agora uma equação diferencial ordinária de segunda ordem.

$$\frac{1}{\phi(t)} \frac{d^2 \phi(t)}{dt^2} = v^2 \frac{1}{\psi(x)} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} \quad (2.21)$$

Como um lado da equação depende apenas de t e o outro apenas de x , e ambos são iguais para todo x e t , isso só é possível se a Eq. 2.21 for igual a uma constante. Essa conclusão decorre diretamente da independência dessas variáveis. Assim:

$$\frac{1}{\varphi(t)} \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} = v^2 \frac{1}{\psi(x)} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = \text{constante},$$

definiremos essa constante como $-\omega^2$, obtendo, assim, as seguintes relações:

$$\frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} = -\omega^2 \varphi(t),$$

e

$$\frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = -\frac{\omega^2}{v^2} \psi(x).$$

Rescrevendo ambas,

$$\frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + \omega^2 \varphi(t) = 0, \quad (2.22)$$

e

$$\frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + \frac{\omega^2}{v^2} \psi(x) = 0 \quad (2.23)$$

As equações obtidas são semelhantes às do oscilador harmônico, cuja solução é dada por:

$$\psi(x) = A \cos\left(\frac{\omega x}{v}\right) + B \sin\left(\frac{\omega x}{v}\right), \quad (2.24)$$

e

$$\varphi(t) = C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t). \quad (2.25)$$

Portanto, substituindo as Eq. 2.24 e 2.25, na Eq. 2.19, temos

$$u(x, t) = \left[A \cos\left(\frac{\omega x}{v}\right) + B \sin\left(\frac{\omega x}{v}\right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right].$$

E, se consideramos infinitos modos de vibração, podemos escrever a expressão da seguinte forma:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[A \cos\left(\frac{\omega_n x}{v}\right) + B \sin\left(\frac{\omega_n x}{v}\right) \right] \left[C \cos(\omega_n t) + D \sin(\omega_n t) \right] \quad (2.26)$$

Por fim, esta é a solução geral. A seguir, determinaremos alguns casos particulares dos modos normais de vibração para a barra.

2.4.2 Vibrações longitudinais de uma barra com uma extremidade fixa e a outra livre

Neste caso particular, em que uma das extremidades da barra está fixa e a outra livre, isso implica que, na extremidade presa, haverá um nó, enquanto na extremidade livre uma formação de um antinó. Com isso, para forma um padrão estacionário o comprimento da barra tem que ser um múltiplo ímpar de $\lambda/4$. Para facilitar a análise, vamos supor as seguintes condições de contorno, quando $x = 0$ e $x = l$.

$$u(0, t) = 0 \quad \text{na extremidade fixa,} \quad (2.27)$$

Vamos aplicar a primeira condição de contorno, Eq. 2.27, na Eq. 2.26, dessa forma temos que.

$$\begin{aligned} u(0, t) &= \left[A \cos\left(\frac{\omega}{v} \cdot 0\right) + B \sin\left(\frac{\omega}{v} \cdot 0\right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] \\ 0 &= A \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right], \end{aligned}$$

Para que a condição de contorno $u(0, t) = 0$ seja satisfeita para todos os instantes de tempo t , é necessário garantir que a seguinte relação seja atendida:

$$C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \neq 0,$$

Isso implica que o coeficiente A , associado a essa expressão, deve ser nulo. Assim, concluímos:

$$A = 0$$

Dessa forma, o valor de A anula qualquer contribuição dessa parcela à solução da equação diferencial, garantindo que a condição de contorno seja respeitada ao longo do tempo.

A solução geral reduzida fica:

$$u(x, t) = \left[B \sin\left(\frac{\omega x}{v}\right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] \quad (2.28)$$

Agora vamos aplica a segunda condição de contorno para $x = l$. Na extremidade livre, a força interna é zero, porque é o limite da barra e não oferece resistência a propagação do pulso, isso implica que:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(l, t)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{B\omega}{v} \cos\left(\frac{\omega l}{v}\right) \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] &= 0, \end{aligned}$$

Para que essa condição seja sempre satisfeita, $\cos\left(\frac{\omega l}{v}\right) = 0$, ou $B = 0$, só que seria uma solução trivial na qual não nos interessa. Então para que o cosseno seja zero, o seu

argumento deve ser igual a um múltiplo ímpar de $\pi/2$, desse modo:

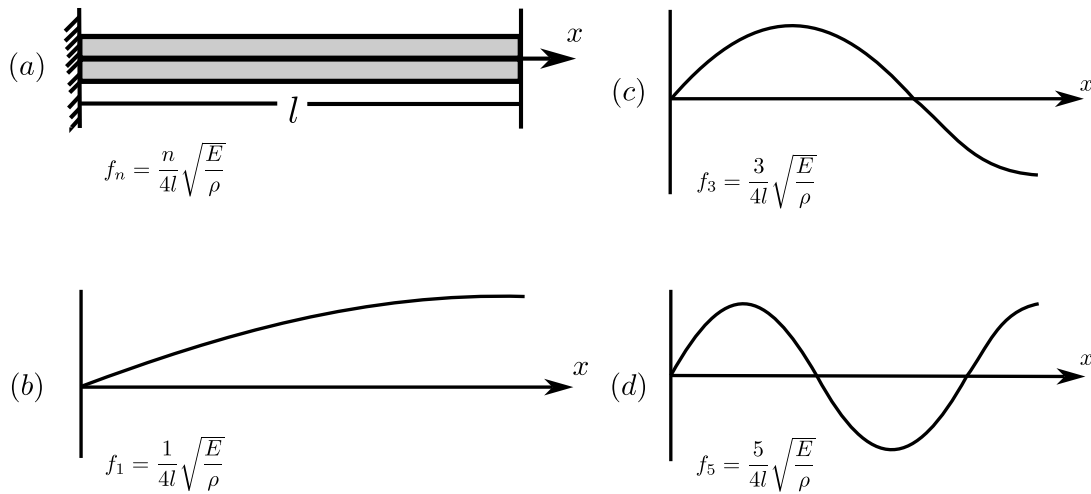
$$\begin{aligned}\frac{\omega}{v}l &= n \frac{\pi}{2} \\ \omega_n &= n \frac{\pi v}{2l}, \quad (n = 1, 3, 5, \dots)\end{aligned}\quad (2.29)$$

Temos ainda que $\omega = 2\pi f$, substituindo na equação que encontramos temos:

$$\begin{aligned}2\pi f_n &= n \frac{\pi v}{2l}, \\ f_n &= n \frac{v}{4l} \\ f_n &= \frac{n}{4l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (n = 1, 3, 5, \dots),\end{aligned}\quad (2.30)$$

que são as frequências naturais. Na Fig. 8, ilustrados no gráfico algumas modos normais de vibração.

Figura 8 – Em a) barra com uma extremidade fixa e outra livre. b) primeiro modo de vibração. c) terceiro modo de vibração. E d) quinto modo de vibração.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Substituindo a Eq. 2.29 na Eq. 2.26, e considerando que $A = 0$, obtemos portanto.

$$u(x, t) = B \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi x}{2l} \right) \left[C \cos \left(\frac{n\pi vt}{2l} \right) + D \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi vt}{2l} \right) \right], \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (2.31)$$

Para a solução mais abrangente desse caso, considera-se a seguinte equação:

$$u(x, t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} B \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi x}{2l} \right) \left[C \cos \left(\frac{n\pi vt}{2l} \right) + D \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi vt}{2l} \right) \right] \quad (2.32)$$

2.4.3 Vibrações longitudinais de uma barra com as duas extremidade livres

Em um sistema onde uma barra de comprimento l possui ambas as extremidades livres, ocorre, no regime estacionário, a formação de antinodos (pontos de máxima amplitude de oscilação) em cada uma dessas extremidades. Isso significa que haverá máximos de deslocamento localizados nas posições $x = 0$ e $x = L$. Este comportamento é característico das ondas estacionárias, pois as extremidades livres permitem que a reflexão da onda mantenha o padrão de interferência construtiva nessas regiões, garantindo que a amplitude seja máxima nesses pontos.

Como as extremidades são livres, temos que ambas as forças internas são zero, desse modo teremos as seguintes condições de contorno.

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = 0$$

$$\left[-\frac{A\omega}{v} \sin\left(\frac{\omega x}{v}\right) + \frac{B\omega}{v} \cos\left(\frac{\omega x}{v}\right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] = 0, \quad (2.33)$$

aplicando $x = 0$, temos:

$$\left[-\frac{A\omega}{v} \sin\left(\frac{\omega}{v} \cdot 0\right) + \frac{B\omega}{v} \cos\left(\frac{\omega}{v} \cdot 0\right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] = 0$$

$$\frac{B\omega}{v} \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] = 0$$

$$B = 0 \quad (2.34)$$

Desse modo a solução geral fica da seguinte forma:

$$u(x,t) = \left[A \cos\left(\frac{\omega x}{v}\right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] \quad (2.35)$$

Para segunda condição de contorno temos que:

$$\frac{\partial u(l,t)}{\partial x} = 0$$

$$\left[-\frac{A\omega}{v} \sin\left(\frac{\omega l}{v}\right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] = 0,$$

Como já foi discutido anteriormente, $A = 0$, não nos interessa, dessa forma, para que o seno seja zero, o seu argumento tem que ser igual a um múltiplo inteiro de π , que fica:

$$\frac{\omega}{v} l = n\pi$$

$$\omega_n = n \frac{\pi v}{l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.36)$$

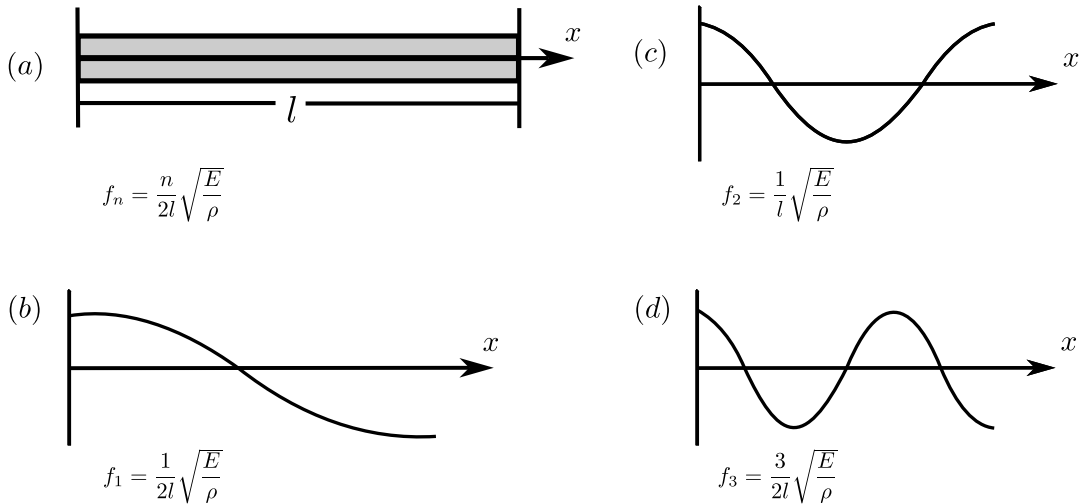
Temos que $n = 0$, não é admissível. Analogamente ao que fizemos anteriormente podemos obter que as frequências naturais que são:

$$\begin{aligned} f_n &= n \frac{v}{2l} \\ f_n &= \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \end{aligned} \quad (2.37)$$

Portanto, para este caso temos:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A \cos\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \left[C \cos\left(\frac{n\pi v t}{l}\right) + D \sin\left(\frac{n\pi v t}{l}\right) \right] \quad (2.38)$$

Figura 9 – Em a) barra com ambas extremidades livres. b) primeiro modo de vibração. c) segundo modo de vibração. E d) terceiro modo de vibração.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

2.4.4 Vibrações longitudinais de uma barra com as duas extremidade fixas

Para este caso, teremos, que nas duas extremidades haverá a formação de nós, com isso, o deslocamento em $x = 0$ e $x = l$ é zero. Para analisar o perfil estacionário vamos ter as seguintes condições de contorno.

$$\begin{aligned} u(0, t) &= 0 \\ \left[A \cos\left(\frac{\omega}{v} \cdot 0\right) + B \sin\left(\frac{\omega}{v} \cdot 0\right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] &= 0 \\ A \left[C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \right] &= 0 \\ A &= 0, \end{aligned}$$

logo.

$$u(x,t) = \left[B \operatorname{sen} \left(\frac{\omega x}{v} \right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \operatorname{sen}(\omega t) \right],$$

usando $x = l$.

$$\begin{aligned} u(l,t) &= 0 \\ \left[B \operatorname{sen} \left(\frac{\omega l}{v} \right) \right] \left[C \cos(\omega t) + D \operatorname{sen}(\omega t) \right] &= 0 \end{aligned}$$

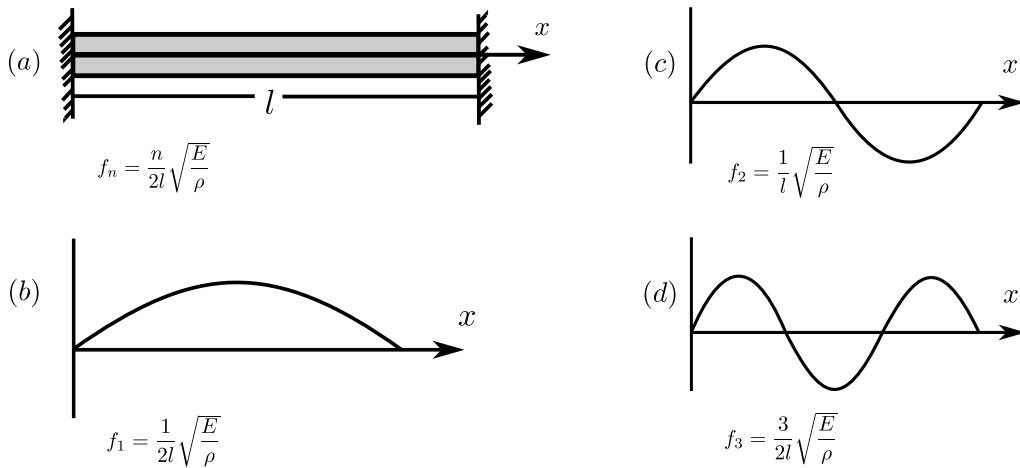
Como já foi discutido anteriormente, obtemos:

$$\begin{aligned} \frac{\omega}{v} l &= n\pi \\ \omega_n &= n \frac{\pi v}{l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (2.39)$$

E, portanto,

$$\begin{aligned} f_n &= n \frac{v}{2l} \\ f_n &= \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Figura 10 – Em a) barra com ambas extremidades fixas. b) primeiro modo de vibração. c) segundo modo de vibração. E d) terceiro modo de vibração.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi x}{l} \right) \left[C \cos \left(\frac{n\pi vt}{l} \right) + D \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi vt}{l} \right) \right] \quad (2.41)$$

Por fim, observa-se que embora as frequências naturais sejam idênticas para uma barra com ambas as extremidades fixas e para uma barra com ambas as extremidades livres, os padrões de vibração diferem (formas modais). No caso da barra com extremidades livres, os antinodos se formam nas extremidades, enquanto, para a barra com extremidades fixas, são gerados nós no mesmo ponto. Essa diferença entre os padrões ocorre devido à simetria das condições de contorno impostas nas duas configurações, de forma que o comportamento das ondas estacionárias em ambos os casos é regido pela mesma relação entre os comprimentos de onda $\lambda/2$ e os harmônicos naturais do sistema.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho desenvolvemos um aparato experimental para o estudo da propagação de ondas sonoras em sólidos utilizando a plataforma Arduino em conjunto com sensores de áudio e demais sistemas eletrônicos. Também foram modeladas e impressas algumas peças em impressão 3D para a construção do suporte, no qual o material em análise será colocado. Implementamos os *firmware* necessários para realizar medições de posição, tempo e velocidade para a partir daí, determinar o módulo de elasticidade ou módulo de Young do metal em análise.

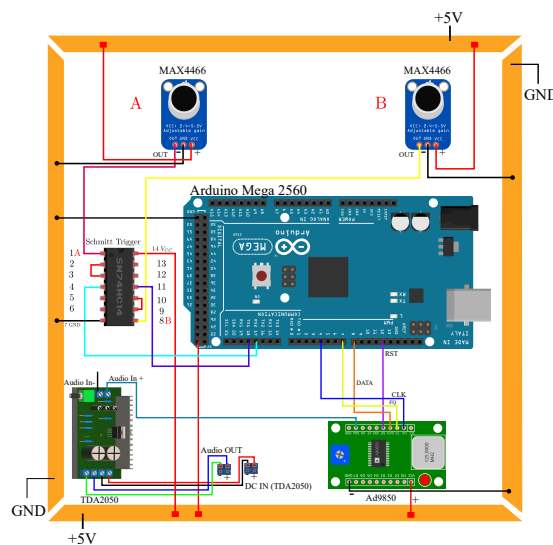
A apresentação da metodologia está dividida em duas partes. Na primeira abordaremos a construção, calibração e funcionamento do aparato experimental. Na segunda apresentaremos o funcionamento do sistema e como se dá a interação do usuário com o experimento a análise dos dados.

3.1 CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

3.1.1 Construção da parte eletrônica

O aparato experimental proposto consiste em um circuito eletrônico que tem como principal componente uma placa Arduino e seu respectivo *firmware*¹ que atuará em conjunto com diversos módulos para a execução de funções secundárias que vão desde a geração de sinais até a medição da resposta do sistema a tais estímulos pela leitura de transdutores apropriados. Na Fig. 11, podemos observar, a placa Arduino Mega 2560, 2 microfones Max 4466, um amplificador de áudio TDA2050, um módulo gerador de funções AD9850, e circuito integrado 74HC14.

Figura 11 – Diagrama esquemático com as conexões elétricas do sistema proposto.

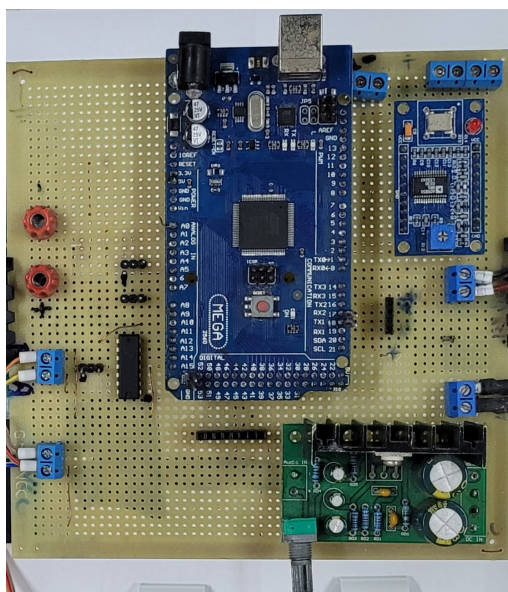


Fonte: Autoria Própria, 2025.

¹ Trata-se de um software incorporado ao hardware que executa funções e operações de entrada e de saída, e as instruções necessárias para que o microcontrolador realize a tarefa designada.

Como podemos observar na Fig. 11, o sensor 1 está conectado à entrada 1A, a primeira entrada inversora, e sai pela porta 2. Esse sinal é então levado para a entrada inversora da porta 3 e, em seguida, sai pela porta 4, indo diretamente para o pino 17 do Arduino, onde será lido. Já o sensor 2, está conectado a entrada inversora 8, saindo na porta 9 e entrando na entrada inversora 10 e logo em seguida sai na porta 11 onde é levado para o pino 18 do Arduino. Na seção 3.2.1 é detalhado melhor o funcionamento de um comparador *Schmitt Trigger*. A montagem do circuito real, pode ser visualizada na Fig. 12.

Figura 12 – Montagem real do circuito eletrônico.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

As conexões da Fig. 12 são feitas em uma placa universal, que possui diversos furos com anéis de cobre. Essa característica melhora a fixação e a condutividade elétrica entre os componentes, garantindo maior estabilidade e organização ao projeto.

Diferentemente da protoboard, que é amplamente utilizada para prototipagem, a placa universal apresenta diversas vantagens para projetos mais robustos e permanentes. A protoboard, apesar de facilitar a montagem inicial de circuitos, possui limitações significativas, como a facilidade com que os componentes se soltam devido ao seu sistema de encaixe temporário, além de ser relativamente cara e inadequada para projetos definitivos, já que não permite uma montagem permanente e confiável.

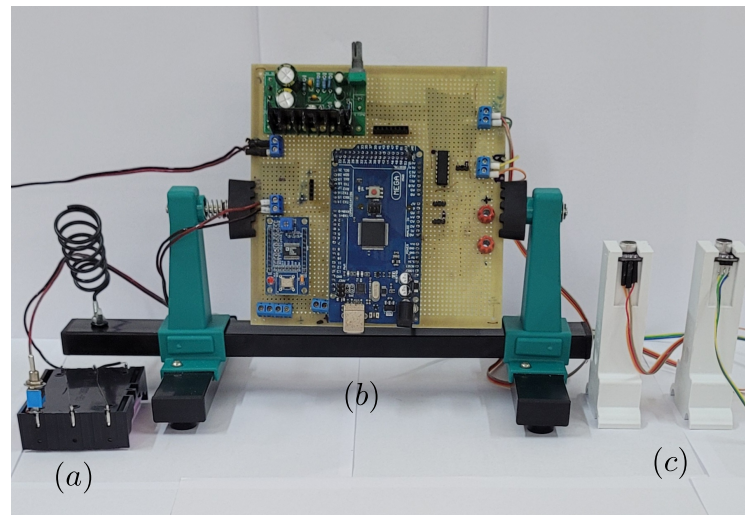
Dessa forma, a utilização da placa universal se justifica por proporcionar maior durabilidade, melhor organização dos circuitos e uma conexão mais segura entre os componentes, tornando-a uma opção mais eficiente para a implementação do projeto.

A Fig. 13 apresenta a montagem completa do sistema de captura do sinal. O circuito é composto por diferentes componentes essenciais para seu funcionamento. Em (a), observa-se a bateria responsável por alimentar o amplificador TDA2050, garantindo a operação do sistema. Em (b), estão dispostos os componentes utilizados para a captura do sinal, que processam e

encaminham os dados para análise. Já em (c), encontram-se os dois sensores de áudio MAX4466, que desempenham um papel fundamental na detecção e conversão das vibrações sonoras em sinais elétricos, permitindo a análise posterior.

Essa configuração possibilita uma captura eficiente do sinal sonoro, assegurando a qualidade e confiabilidade dos dados adquiridos para o experimento.

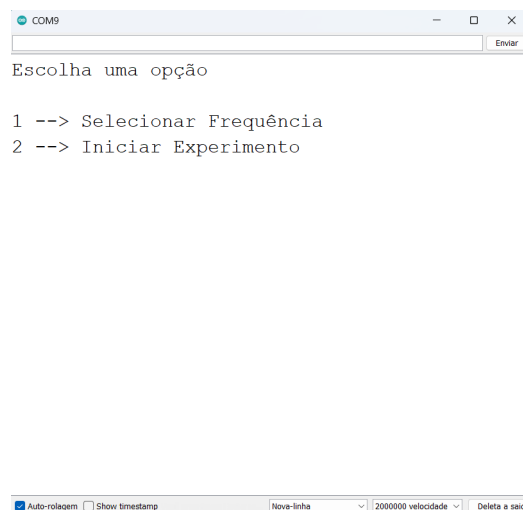
Figura 13 – Em (a) temos a bateria para ligar o TDA2050. (b) componentes para captura do sinal. (c) dois sensores de áudio Max4466.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

A manipulação do experimento deverá ser realizada por meio de uma interface exibida e controlada a partir do monitor serial da própria IDE do Arduino, onde o usuário poderá selecionar diversos parâmetros experimentais e onde serão exibidos os dados da medida. Um esboço dessa interface é apresentado na Fig. 14.

Figura 14 – Esboço da interface para controle do experimento utilizando o monitor serial da IDE do Arduino.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

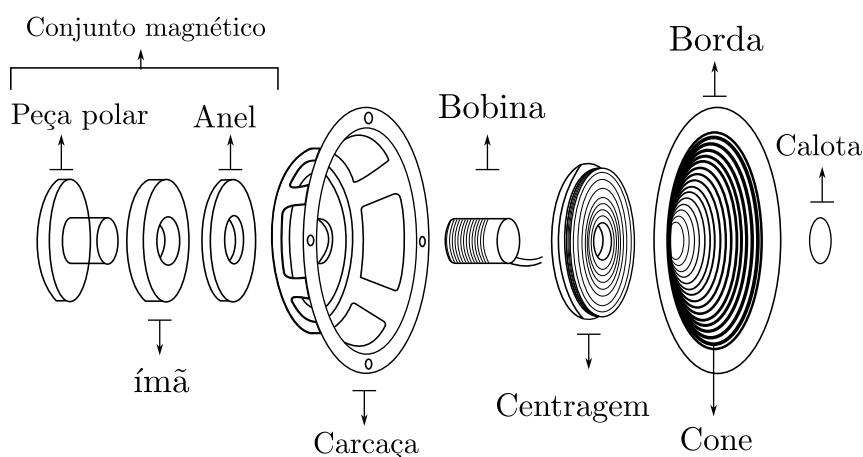
Essa interação do usuário, com o monitor serial será explicada melhor na 3.3.1, no funcionamento do firmware.

3.1.2 Sistema de excitação da barra

O sistema eletromecânico de excitação da barra é composto por um alto-falante, um amplificador de áudio, um digitalizador de sinais e o Arduino. O funcionamento deste sistema é da seguinte forma, o Arduino gera um sinal que é transmitido para um digitalizador de sinais modelo AD9850, que converte esse sinal em uma onda quadrada ou senoidal de acordo com a necessidade. Este sinal por sua vez é de baixa amplitude que, por sua vez, é necessário amplificá-lo utilizando o amplificador de áudio, que neste trabalho foi usado o TDA2050. Recentemente, por exemplo, (Vieira; Júnior, 2022), desenvolveram um aparato experimental, para o estudo da velocidade do som em um gás, que demandava a utilização do mesmo amplificador, uma vez que, os sinais gerados pelos DDS, utilizados no experimento possuíam baixa intensidade e assim, não eram capaz de acionar o alto-falante diretamente.

O sinal proveniente do TDA2050, é transmitida para o alto-falante. Esse alto-falante foi modificado de tal forma a funcionar como um martelo para excitar a barra, no centro do cone foi inserido uma moeda para aumentar o impacto na barra. Um alto-falante, é um dispositivo eletromecânico composto por uma peça polar, ímã e um anel que juntos formam um conjunto magnético, uma carcaça, uma bobina, uma centragem (aranha), diafragma (cone), uma suspensão (borda) e uma calota, como representado na Fig. 15.

Figura 15 – Representação das peças de um alto-falante.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Quando uma corrente elétrica alternada percorre a bobina do alto-falante, ela transforma-se em um eletroímã, cujos polos norte e sul se alternam conforme a inversão da corrente. O ímã permanente do alto-falante e esse eletroímã interagem entre si, sendo responsáveis pelo movimento do cone, que, por sua vez, gera ondas sonoras.

O funcionamento pode ser descrito da seguinte forma, quando a corrente elétrica circula pela bobina em um determinado sentido, ela cria um polo norte ou sul. Se o polo da bobina for igual ao do ímã permanente, ocorre repulsão; caso contrário, ocorre atração. Esse movimento oscilatório da bobina faz com que o cone se desloque, criando sucessivas regiões de compressão e rarefação no ar, o que resulta na propagação de uma onda sonora. Além disso, esse movimento é essencial para que a moeda, posicionada no centro do cone, colida com a barra, gerando assim essa perturbação (pulso), que se propagara ao longo da mesma e consequente será captado pelos sensores de áudio.

Na interface do Arduino, o usuário poderá, escolher uma frequência na qual ele deseja que o alto-falante vibre para assim excitar a barra na frequência adequada para a realização do experimento proposto. Na Fig. 16, podemos observar a montagem real do alto-falante, a moeda no centro e o suporte no qual ele está acoplado.

Figura 16 – Alto-falante modificado.



Fonte: Aatoria Própria, 2025.

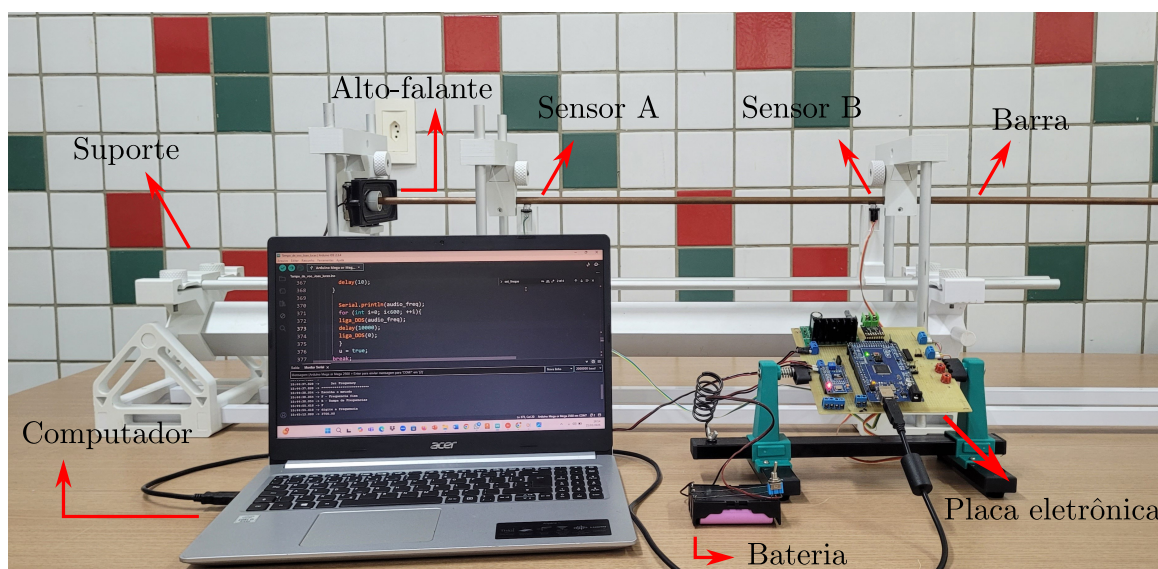
A seguir, falaremos como funcionará a medida pelo tempo de voo.

3.1.3 Determinação da velocidade pelo tempo de voo

Para medida da velocidade de propagação da onda na barra, iremos utilizar inicialmente a técnica “*Time-of-flight*” ou tempo de voo (Huggins, 2008). Este tipo de medida é muito útil quando precisamos determinar a velocidade de propagação de uma perturbação em determinado meio material. A técnica consiste basicamente em medir o intervalo de tempo que um determinado sinal leva para interceptar dois sensores separados por uma distância conhecida e a partir desses dados calcular a velocidade de propagação.

O aparato, que será utilizado está representado na Fig. 17. Transdutores (microfones) serão colocados em pontos específicos ao longo da barra de modo a capturar a perturbação local induzida pelo impulso. Os sinais coletados passarão por um sistema de amplificação e serão direcionados para a placa Arduino que desempenhará o papel de interface de operação, como já discutido anteriormente.

Figura 17 – Aparato experimental completo.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Na montagem do aparato experimental, a barra metálica que desejamos estudar encontra-se apoiada em suportes ajustáveis, e os sensores, que também podem ser ajustados, estão fixados a uma certa distância. Além disso, em uma das extremidades da barra, há um dispositivo controlado pelo Arduino que gerará perturbações mecânicas por meio de um sistema composto por uma bobina e um núcleo móvel, formando um eletroímã (alto-falante). Também é possível observar a placa eletrônica, responsável pela aquisição de dados durante a realização do experimento. Por fim, o computador que será utilizado para a comunicação do usuário com o Arduino, que executará as funções necessárias. Os modelos 3D para impressão e o firmware utilizado podem ser encontrados em (Soares, 2025) e este repositório será atualizado à medida que novos trabalhos ou aplicações forem desenvolvidos.

A execução do aparato vai funcionar da seguinte forma, ele é controlado pela interface serial do Arduino onde o usuário estudante irá informar a frequência, que será gerada no alto-falante digitando o valor em hertz. Este valor é então comunicado ao módulo AD9850 que sintetiza a frequência solicitada.

O sinal é inserido na entrada do módulo amplificador TDA2050 que, por sua vez, aciona o alto-falante gerando uma vibração mecânica estacionária na barra. Isso possibilita que o aluno possa regular a amplitude do sinal por meio de um potenciômetro do próprio TDA2050.

A medição é realizada utilizando o módulo MAX4466, conforme mostrado na Fig.23, que contém um microfone de eletreto. A forma de coleta desses dados será detalhada nas próximas seções deste trabalho. O sinal captado pelos sensores é, então, amplificado pelo MAX4466. Este sinal é analógico, pois o módulo só possui saídas analógicas. Dessa forma, ele é enviado ao SN74HC14N, que converte o sinal analógico em um sinal digital, permitindo que o Arduino leia os dados com maior precisão. Além disso, o sinal é tratado para eliminar os ruídos gerados durante a medição. No entanto, como o SN74HC14N é um comparador inversor, ele

inverte o sinal. Por isso, utilizaremos outra porta do SN74HC14N para inverter novamente o sinal, garantindo que ele seja corretamente lido pelo Arduino.

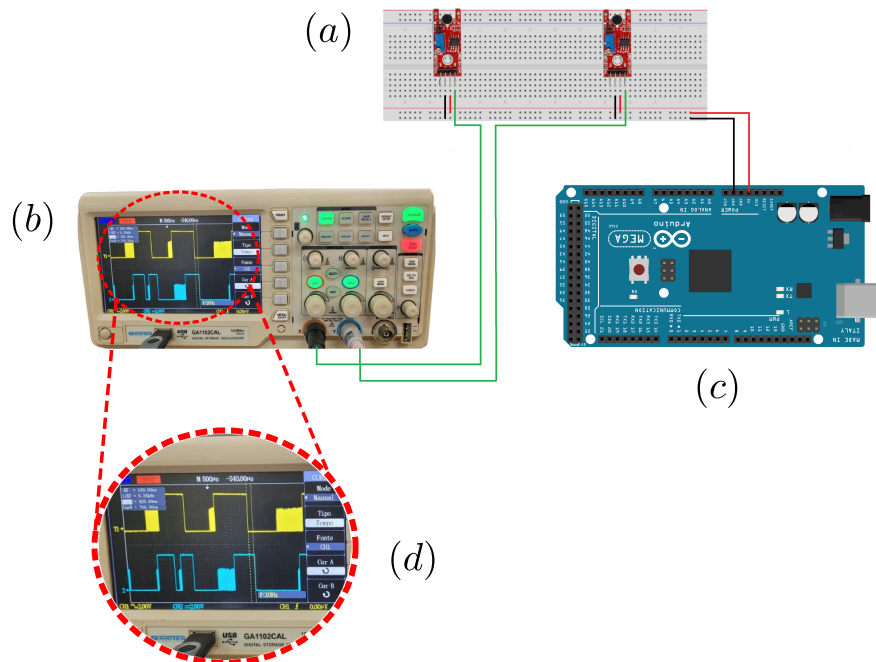
Embora o próprio Arduino consiga realizar a conversão analógica-digital utilizando o ADC, esse processo exige um processamento mais intenso, o que pode resultar em erros significativos nas medições, especialmente quando são utilizadas funções de interrupção. O SN74HC14N, por sua vez, realiza essa conversão de forma eficiente e rápida, sem sobrecarregar o processamento, e mesmo após a segunda inversão do sinal, o erro gerado é insignificante para a medição. E essa dupla inversão será realizada no sinal proveniente dos dois sensores.

Por fim, o Arduino irá capturar esses sinais e, por meio do firmware implementado, fornecer ao aluno os dados necessários para calcular o tempo entre os dois sensores. Esse processo será discutido com mais detalhes na seção 3.3.1.

3.1.4 CALIBRAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

A calibração do aparato experimental foi realizada utilizando a montagem da Fig. 18 onde temos dois sensores de áudio posicionados a uma distância fixa conhecida conectados ao Arduino e um osciloscópio.

Figura 18 – Esquema de conexão do aparato de calibração. Em (a) protoboard e os dois sensores de áudio KY-038. (b) osciloscópio registrando as medidas dos sensores. (c) placa Arduino Mega 2560, conectado aos sensores. (d) zoom dos dados registrados pelo osciloscópio.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Inicialmente ajustamos a sensibilidade dos sensores atuando nos respectivos *trimpot*² de modo a diminuir ao máximo a captação do ruído ambiente. Em seguida um som de frequência

² Um trimpot (Trimmer Potentiometers) é um resistor variável cujo funcionamento é semelhante ao de um potenciômetro comum mas cujo ajuste é em geral realizado utilizando uma chave de fenda ou ferramenta

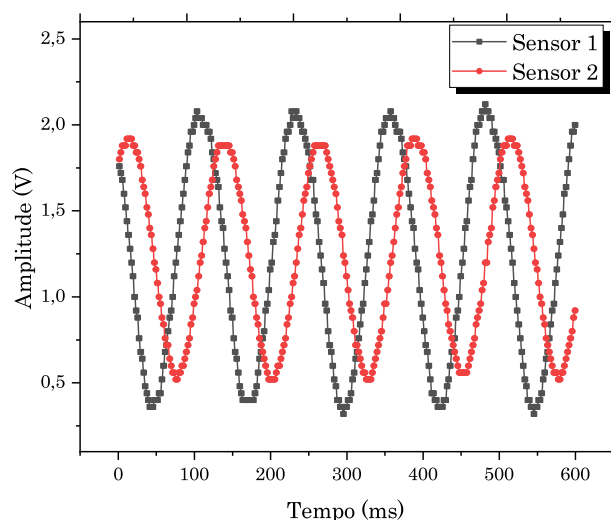
conhecida³ é então gerado em um ponto próximo ao sensor 1 e utilizamos a técnica do tempo de voo descrita na seção 3.1.3 para determinar a velocidade do som no ar utilizando tanto o Arduino como o osciloscópio para medir a diferença de tempo entre a passagem do sinal pelos sensores.

Propomos o teste de dois tipos de sensores de som o KY-038 e o MAX 4466. O primeiro é um sensor de baixo custo e que pode ter em sua saída tanto sinais digitais quanto sinais analógicos. Já o MAX 4466 fornece apenas sinais analógicos em sua saída e o uso deste tipo de sensor demanda um tratamento adicional do sinal. Nos testes iniciais, observou-se dificuldade na calibração do ganho do sensor KY-038, e o mesmo, estava fazendo vários ativamentos indesejáveis, como mostrado nas Fig. 18 e 20 o que comprometeu a confiabilidade dos dados obtidos nas medições com o Arduino. Diante disso, optou-se por implementar ajustes do sinal via software e investigar a viabilidade de sensores alternativos.

O procedimento descrito anteriormente é então repetido movimentando-se os sensores a diversas distâncias de modo a conhecer qual fornece os melhores dados.

Podemos observar na Fig. 19 que o sinal apresenta uma diminuição em sua amplitude (atenuação do sinal), o que já era esperado, pois, à medida que o pulso se propaga ao longo da barra, ele perde energia. Consequentemente, o segundo sensor captará um sinal com amplitude reduzida. Além disso, é perceptível a diferença de fase entre as duas ondas, uma vez que os sensores estão em posições diferentes.

Figura 19 – Atenuação do sinal e diferença de fase entre as duas ondas, provenientes dos dois sensores



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Os dados apresentados na Fig. 18, obtidos por meio do sensor KY-038, indicam que seu trigger é ativado repetidamente, mesmo na ausência de estímulos sonoros intencionais durante

semelhante e que em geral é construído de forma a ser ajustado poucas vezes durante a fase de calibração dos sistemas na qual é aplicado.

³ Isto garante que o som captado pelos sensores é aquele que estamos medindo e não algum ruído externo.

os testes. Esses disparos são atribuídos à presença de ruídos ambientais, interferências da fonte de alimentação, do circuito eletrônico, entre outros fatores. Como não foi possível realizar um ajuste eficaz da sensibilidade para filtrar esses sinais indesejados, optou-se pela substituição do sensor.

Os testes iniciais com o sensor MAX4466 cujo princípio de funcionamento será detalhado na seção 3.2.2 apresentaram resultados significativamente superiores, com maior estabilidade na captação do sinal. Em conjunto com o circuito integrado 74HC14, um comparador com histerese, foi possível reduzir substancialmente os ruídos que comprometiam as medições. Assim, o conjunto MAX4466 e 74HC14 demonstrou ser a solução mais adequada para a captação do sinal na barra metálica.

Após a conclusão da fase de calibração da parte eletrônica, realizamos os ajustes necessários nos suportes e demais componentes mecânicos do sistema. Esses ajustes foram essenciais para otimizar a funcionalidade e permitir a realização de medições em uma variedade de materiais. O objetivo foi simplificar o processo experimental, garantindo maior flexibilidade e precisão nas medições realizadas.

3.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA ELETRÔNICO

3.2.1 Circuito Schmitt Trigger

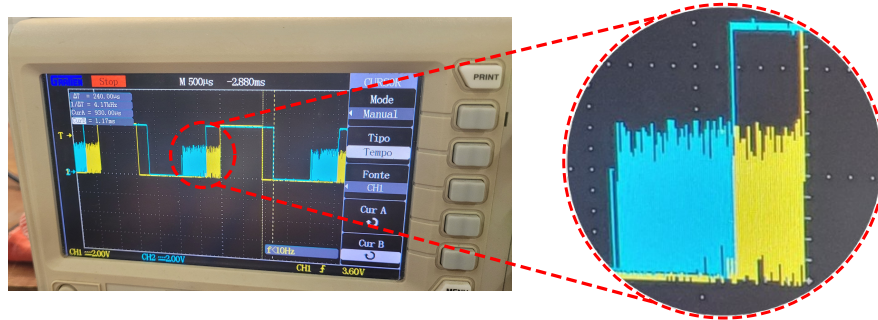
Um dos problemas que foi observado, com as medidas em corrente contínua, é o ruído, como pode ser observado na Fig. 20. Em eletrônica, o ruído é definido como qualquer sinal indesejado que não se origina do sinal de entrada e que não possui uma relação harmônica com ele, que pode ser gerado pela fonte de alimentação, resistores e componentes em geral (Malvino; Bates, 2016).

Uma maneira de minimizar os erros causados pelos ruídos é utilizar um comparador com *histerese*⁴. Em um circuito que utiliza histerese, como, por exemplo, aqueles que empregam duas tensões de referência — uma para acionamento e outra para desligamento —, a histerese corresponde à região onde ocorre a transição de um estado para outro. É importante destacar que, enquanto o circuito permanece nessa região de histerese, o estado anterior, seja ele ligado ou desligado, é mantido até que a tensão ultrapasse os limites estabelecidos pelas referências. Esse comportamento é fundamental para evitar oscilações indesejadas em torno do ponto de comutação, garantindo maior estabilidade e confiabilidade no funcionamento do circuito.

Um dos comparadores mais utilizados é o Schmitt Trigger, conhecido em português como Disparador Schmitt ou Comparador Regenerativo. Esse circuito baseia-se no princípio da histerese e recebe seu nome em homenagem a Otto Herbert Schmitt (1913–1998), que o desenvolveu na década de 1930 (Schmitt, 1938).

⁴ Basicamente é uma curva de resposta de um sistema projetada para preservar suas características mesmo quando o sistema deixa de estar sujeito ao estímulo externo que gerou a mudança de estado.

Figura 20 – Ruído em uma medida feita utilizando sensores de áudio em corrente contínua

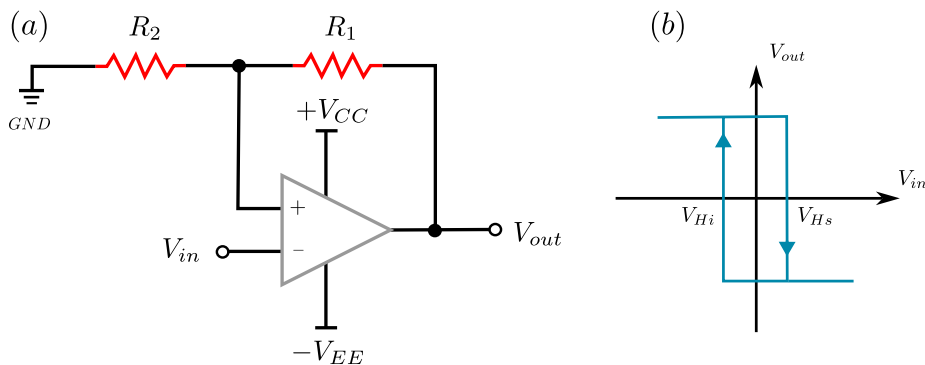


Fonte: Autoria Própria, 2025.

Basicamente, o Schmitt Trigger é implementado utilizando um amplificador operacional, que apresenta as seguintes características: possui uma entrada inversora ($-$), onde é aplicada a tensão de entrada V_{in} . Isso nos permite deduzir que se trata de um tipo de comparador inversor, já que o sinal de entrada é conectado à entrada inversora. Na saída, V_{out} , há um divisor de tensão composto por dois resistores, R_1 e R_2 , conectados em série. A tensão é dividida entre esses resistores, e o ponto intermediário do divisor é realimentado para a entrada não inversora ($+$).

Essa configuração utiliza realimentação positiva, essencial para implementar a histerese no comparador. Além disso, o circuito opera com duas fontes de alimentação: uma positiva, V_{CC} , e outra negativa, $-V_{EE}$. Essa estrutura garante a comutação estável entre os estados alto e baixo da saída, mesmo na presença de ruídos na tensão de entrada. O esquema descrito e a curva de histerese pode ser visualizado na Fig. 21. Essa figura ilustra o funcionamento básico do circuito, evidenciando os componentes essenciais para a implementação do Schmitt Trigger.

Figura 21 – Em (a) o circuito Schmitt Trigger. (b) curva de Histerese.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Onde V_{Hi} e V_{HS} , são as tensões de histerese inferior e superior respectivamente. Para calcular cada uma delas, utiliza-se as seguintes expressões.

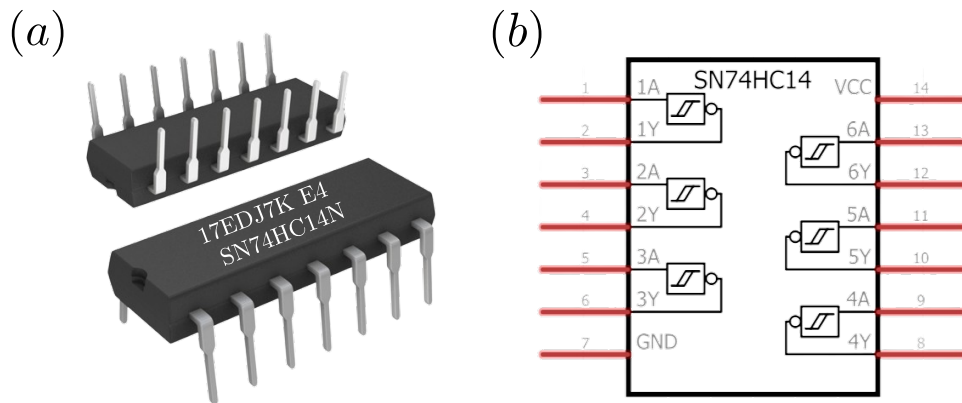
$$V_{Hi} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{EE} \quad (3.1)$$

$$V_{Hs} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad (3.2)$$

O circuito integrado utilizado neste trabalho foi o *SN74HC14N*. Esse circuito implementa o Schmitt Trigger em suas entradas e possui seis inversores independentes que utilizam o princípio da histerese. Ele foi escolhido porque é capaz de filtrar de maneira eficiente o sinal recebido, aumentando a estabilidade do sinal digital. Dessa forma, ele converte sinais ruídos ou analógicos em sinais digitais bem definidos, garantindo maior precisão e confiabilidade no processamento.

Como discutido anteriormente, os sinais indesejados, como os ruídos, serão suprimidos porque o *SN74HC14N* utiliza o princípio da histerese para ignorar flutuações durante a medição. Enquanto o sinal permanecer na região de histerese, o estado de acionado ou desligado será mantido. Isso garante que apenas mudanças significativas no sinal de entrada possam alterar o estado da saída. Além disso, o *SN74HC14N* possui um ganho muito elevado nas transições entre os estados lógicos alto e baixo, o que contribui para medidas mais precisas e confiáveis. Na Fig. 22, mostra uma representação deste comparador.

Figura 22 – Em (a) circuito integrado SN74HC14N. (b) esquema do circuito

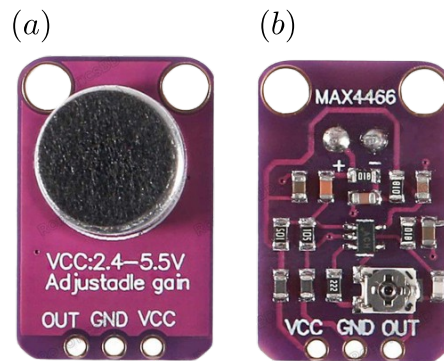


Fonte: Autoria Própria, 2025.

3.2.2 Captação e tratamento do sinal

A perturbação mecânica que se propaga na barra, gera também uma onda sonora no ar que é captada pelo microfone gerando um sinal elétrico de baixa amplitude que por sua vez, precisa ser amplificado para então ser lido pelo Arduino e esse processo é feito pelo amplificador operacional do Max4466. Na Fig. 23, podemos observar o sensor Max4466, que foi utilizado na prática experimental.

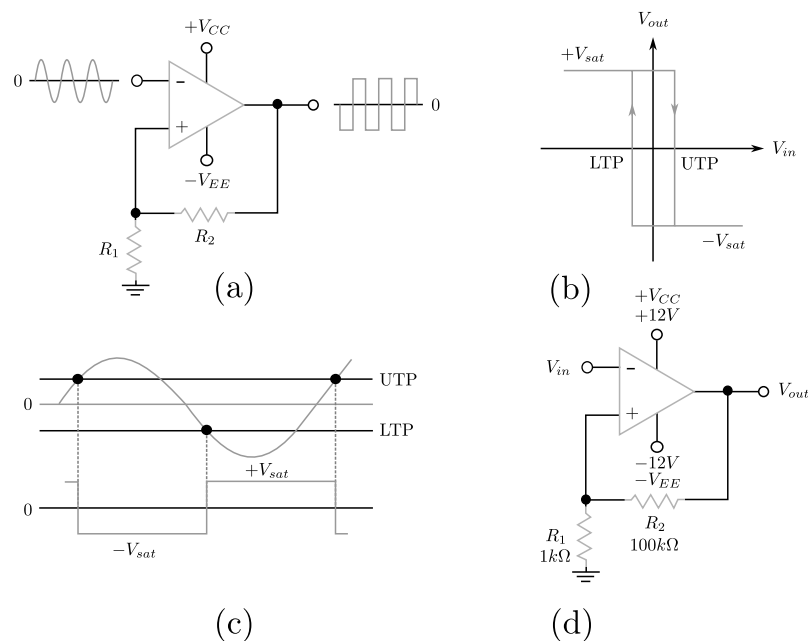
Figura 23 – Em (a) parte da frente microfone. (b) parte de trás circuito integrado Max4466.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

O sinal proveniente do Max4466 é analógico e precisa ser codificado em binário, por que o código que está sendo executado é baseado em uma rotinas de interrupções ISR (Interrupt Service Routine). Essa conversão analógico digital, é feita pelo inversor *Schmitt Trigger 74HC14*. Na Fig. 24, temos uma representação de um caso geral do funcionamento de um inversor Schmitt Trigger.

Figura 24 – Em (a) diagrama esquemático do Schmitt Trigger e as formas de onda de entrada e saída. (b) A curva de histerese. (c) Diagrama das tensões de entrada e saída. (d) Exemplo prático de aplicação.



Fonte: Malvino; Bates, 2016.

Em (a), é possível visualizar o sinal analógico (senoidal) na entrada inversora (V_{in}) que é convertido em uma onda quadrada (V_{out}). E em (b) temos a curva característica, do Schmitt Trigger, que é um gráfico de V_{in} versus V_{out} . Em (c) podemos ver que quando um sinal de entrada

atinge o limiar superior *UTP* (*Upper Trip Point*) ou ponto de comutação superior, a saída é comutada para $-V_{sat}$ e quando a V_{in} é menor que o limiar inferior *LTP* (*Lower Trip Point*) ou ponto de comutação inferior, a tensão de saída muda para $+V_{sat}$, podemos ver que a tensão de saída é invertida em relação a de entrada, caracterizando um circuito inversor. Em (d) temos um circuito típico de aplicação.

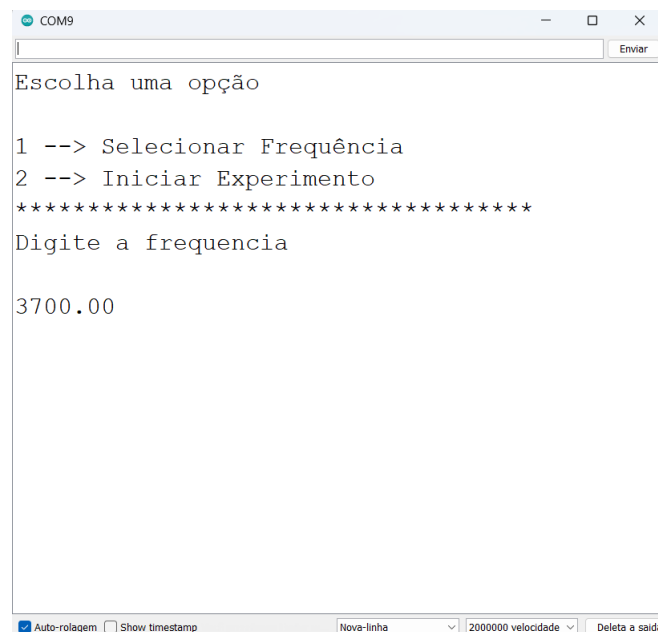
3.3 INTERFACE SERIAL DO ARDUINO

3.3.1 Comentários sobre o firmware implementado

“Firmware” é um software que opera em sistemas embarcados e microcontroladores, que tem função de fazer as operações de entrada e saídas, assim como as demais instruções, para que o microcontrolador realize as funções que ele foi solicitado. Diferenciando-se de programas executados, por exemplo, no Windows.

Inicialmente, o programa realiza uma limpeza no *buffer* de entrada serial, garantindo que nenhum dado residual interfira na recepção dos comandos. Em seguida, exibe um menu de opções no Monitor Serial (interface do Arduino), como ta mostrado na Fig. 14 permitindo que o usuário escolha entre duas opções onde temos modo “*selecionar frequência*” destinado à calibração dos sensores e o comando “*Iniciar experimento*” que incia a medição dos sinais. Após a exibição deste menu, o sistema aguarda a entrada do usuário e valida a opção selecionada. Se a opção não for reconhecida, o programa informa o erro e solicita uma nova entrada, garantindo que apenas comandos válidos sejam processados, Fig. 25.

Figura 25 – Selecionada a opção de frequência.

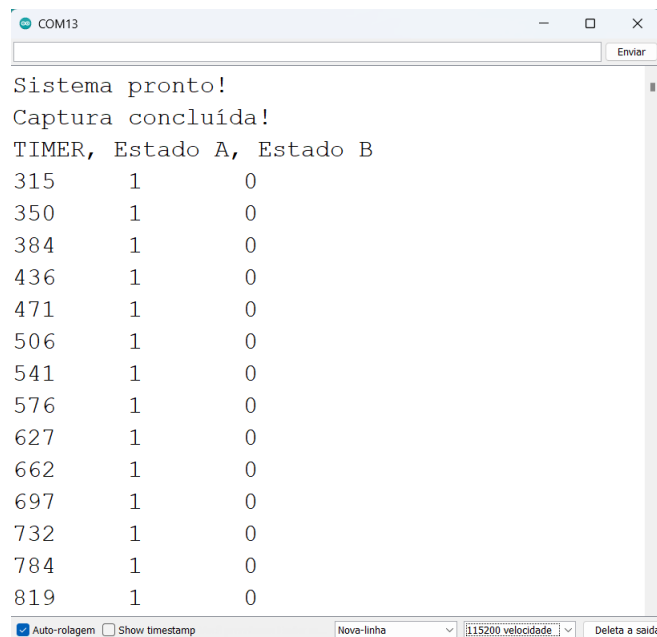


Fonte: Autoria Propria, 2025.

Assim que o experimento inicia, os dados coletados são apresentados no Monitor Serial

em uma forma tabulada que podem ser facilmente copiados para softwares de gráficos como SciDavis ou Origin. Vale ressaltar que nessa versão do firmware os dados de tempo são exibidos em sua forma “bruta”, ou seja, eles correspondem ao valor da contagem do TIMER1 utilizado e devem ser convertidos para unidades de tempo a partir de cálculos posteriores utilizando parâmetros⁵ de configuração deste temporizador. A representação destes dados brutos pode ser observado na Fig. 26.

Figura 26 – Dados coletados pelo Arduino e impressos no monitor serial.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

De posse destes dados é possível reconstruir as formas de onda e então utilizar estes gráficos para calibrar o aparato e realizar as medições desejadas.

3.4 ABORDAGEM DIDÁTICA POR MEIO DE ROTEIRO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de tornar o experimento acessível, reproduzível e adequado ao ambiente educacional, foi elaborado um roteiro experimental detalhado, inserido no Apêndice A deste trabalho. Esse roteiro funciona como uma ferramenta pedagógica que orienta passo a passo a realização da prática, favorecendo sua aplicação tanto no ensino médio técnico quanto na graduação. Ele permite que alunos compreendam não apenas os procedimentos operacionais, mas também os conceitos físicos subjacentes à atividade, promovendo uma aprendizagem significativa por meio da experimentação.

⁵ Para este cálculo devem ser levados em consideração os valores de *prescale* e *clock*.

3.4.1 Aplicação Educacional e Orientada do Procedimento

O roteiro propõe uma sequência clara e objetiva de ações, que vai desde a montagem do aparato experimental até a análise dos resultados. Nele, os estudantes são instruídos a montar o sistema de aquisição de dados com sensores de áudio, posicioná-los corretamente na barra metálica, registrar a distância entre os sensores, inserir o código no Arduino e realizar a excitação da barra por meio de um alto-falante controlado.

Além dos aspectos práticos, o roteiro também orienta o cálculo de grandezas físicas relevantes, como a velocidade do som no material, o módulo de Young, o desvio padrão, o erro absoluto e o erro percentual. Essa estrutura favorece o desenvolvimento de competências experimentais, analíticas e críticas, essenciais na formação de estudantes de ciências exatas.

Portanto, o uso do roteiro não se limita a uma simples execução de etapas técnicas, mas se configura como um instrumento didático que promove a autonomia, o raciocínio científico e o engajamento ativo dos alunos no processo de aprendizagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

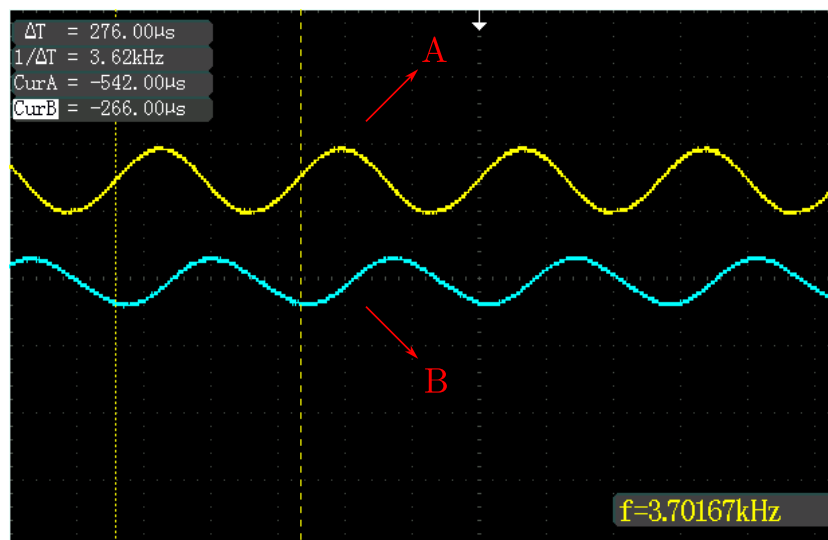
4.1 RESULTADOS OBTIDOS COM OSCILOSCÓPIO

Para determinar a frequência mais adequada para o experimento, foram realizados testes preliminares variando-se a frequência do sinal acústico na faixa de 300 Hz a 10 kHz. Observou-se que frequências muito baixas apresentavam elevada suscetibilidade a ruídos ambientais, enquanto frequências muito altas resultavam em sinais de baixa amplitude, dificultando a detecção precisa pelo sensor. Entre os valores testados, a frequência de 3700 Hz apresentou os melhores resultados, proporcionando um sinal estável, com boa amplitude e baixa distorção.

A escolha dessa frequência está diretamente relacionada às características físicas do sistema, em particular ao comprimento da barra metálica utilizada, que é de aproximadamente 1 metro. Considerando a equação da velocidade de propagação de ondas mecânicas $v = \lambda f$, em que v é a velocidade da onda, λ o comprimento de onda e f a frequência, verifica-se que determinadas frequências geram comprimentos de onda compatíveis com os modos normais de vibração da barra. Quando o comprimento de onda corresponde a um múltiplo inteiro ou fração adequada do comprimento da barra, favorece-se a formação de padrões estacionários, otimizando a propagação da onda e a detecção pelo sensor.

Após iniciar o experimento, percebemos que há uma atenuação¹ do sinal captado pelo sensor B. Isso já era esperado, pois a onda perde energia ao longo da barra, reduzindo, conseqüentemente, sua amplitude. Na Fig. 27, é possível observar essa característica.

Figura 27 – Formas de ondas do sensor A e B



Fonte: Autoria Própria, 2025.

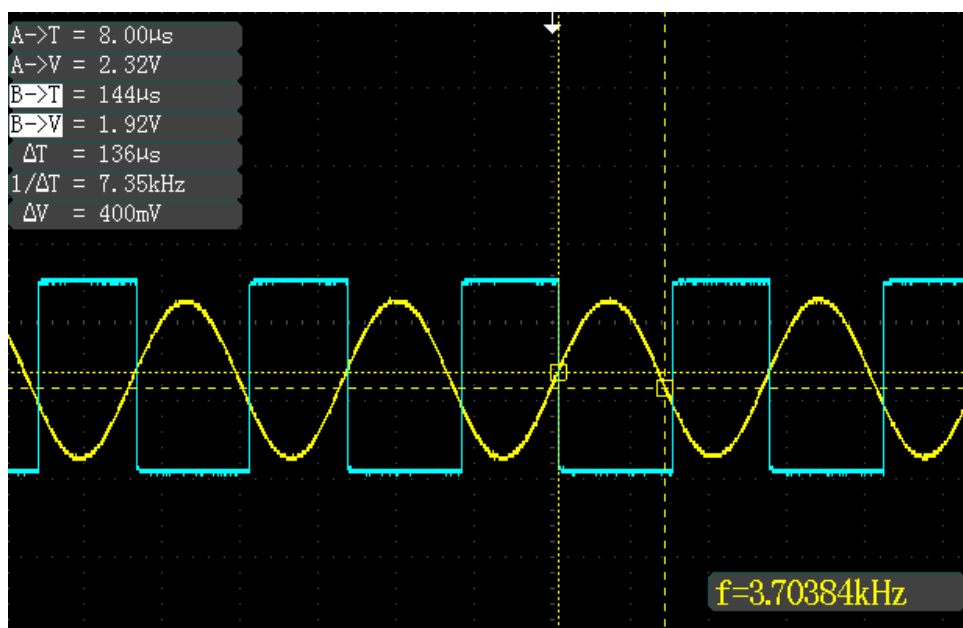
¹ Em eletrônica, a atenuação de um sinal ocorre quando sua amplitude é reduzida ao passar por um componente ou circuito. Atenuação é o contrário de amplificação, que corresponde ao aumento da amplitude do sinal.

Na Fig. 27, também é possível notar uma defasagem entre os dois sinais, causada pelo tempo de propagação.

O sinal analógico oriundo dos sensores é aplicado a uma das entradas do circuito integrado 74HC14 que consiste em um inversor de estado lógico Schmitt Trigger, conforme explicado na seção 3.2.2, para que este sinal seja convertido em uma forma de onda digital que, em nosso experimento, é mais adequada para medições com o Arduino.

Na Fig. 28, observa-se a atuação do comparador Schmitt Trigger sobre o sinal analógico. A curva em amarelo representa a senoide original, correspondente ao sinal analógico puro. Já a curva em azul mostra o sinal convertido pelo Schmitt Trigger, que transforma a forma de onda contínua em um sinal digital retangular. Essa conversão ocorre com base nos limiares de disparo definidos pelo circuito, promovendo a inversão dos níveis lógicos sempre que o sinal de entrada ultrapassa os valores pré-estabelecidos. Dessa forma, é possível identificar claramente o processo de digitalização do sinal analógico. E também é possível observa a inversão do sinal quando o estado logico do sinal analógico é auto o sinal digital é baixo e vice-versa.

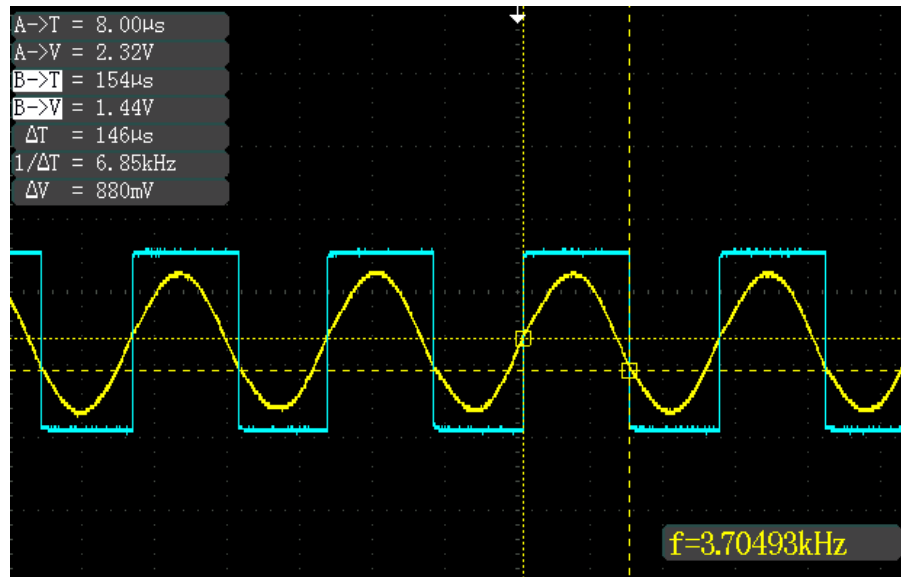
Figura 28 – Primeira inversão do Schmitt Trigger



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Após esta etapa o sinal é enviado para outra entrada inversora de modo que a onda quadrada digital e o sinal analógico tenham as mesmas características, ou seja, mesma fase e mesmos pontos de máximos e mínimos facilitando assim a análise posterior. O resultado desta segunda inversão pode ser observado na Fig. 29.

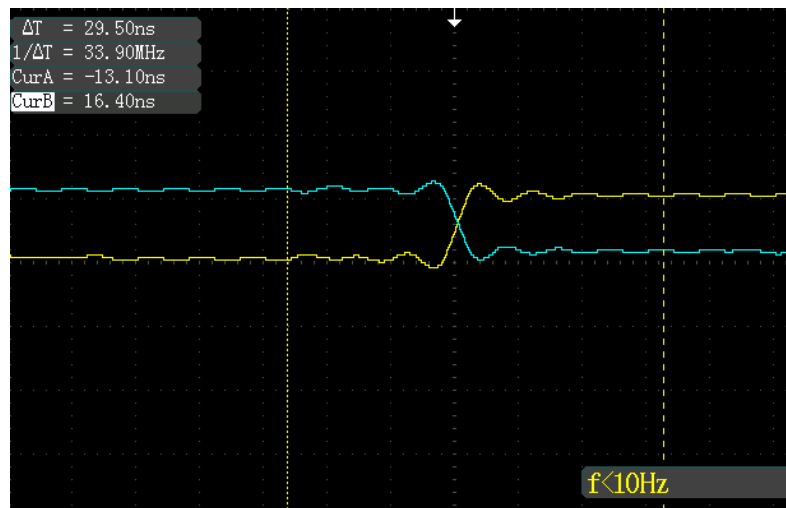
Figura 29 – Segunda inversão do Schmitt Trigger



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Um fato importante que necessita de atenção antes de prosseguirmos é que a passagem do sinal pelo inversor ocorre com velocidade finita, ou seja, cada inversor do circuito 74HC14 produz um atraso no sinal. Os resultados mostrados na Fig.30 mostram que este atraso é da ordem de 30ns para cada inversão, o que é desprezível para nossas medidas.

Figura 30 – Ponto de cruzamento entre os dois sensores

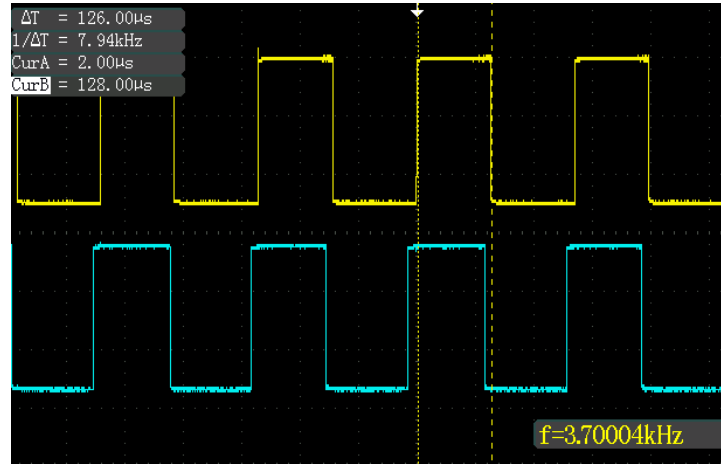


Fonte: Autoria Própria, 2025.

Em função da forma como funcionam os inversores do 74HC14 poderíamos ter um problema de alargamento do pulso no tempo em função da atenuação do sinal no segundo sensor pois como vimos antes, o ponto de comutação depende da relação entre as tensões e isto introduziria um erro no sinal deste sensor. Este fenômeno foi detectado durante a calibração do aparato seção 3.1.4 e uma das soluções adotadas foi aumentar a amplitude do sinal, de modo que

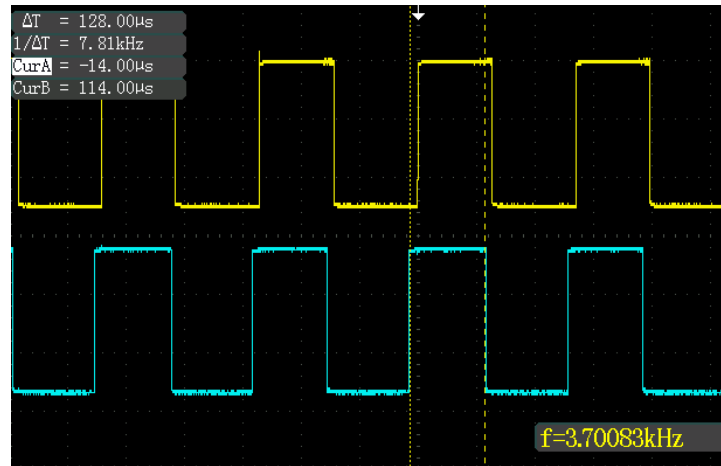
ambos os sensores operem em regime de saturação. Dessa forma, a redução da amplitude da onda no segundo sensor torna-se desprezível, resultando em sinais quase idênticos nas entradas do 74HC14. Nas Figs. 31 e 32, podemos ver as larguras do pulso um e do pulso dois quando os sensores estão saturados.

Figura 31 – Largura do pulso 1



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Figura 32 – Largura do pulso 2



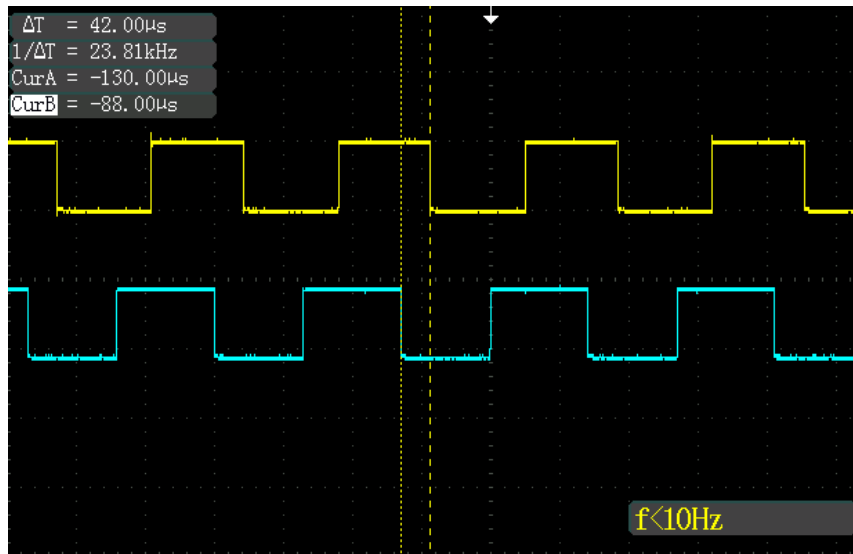
Fonte: Autoria Própria, 2025.

4.1.1 Medida da velocidade pelo tempo de voo

Nas medidas realizadas, determinamos a diferença de fase entre as duas ondas (quando observados os sinais analógicos) e também a diferença de tempo que uma dada “frente de onda” passasse por ambos sensores.

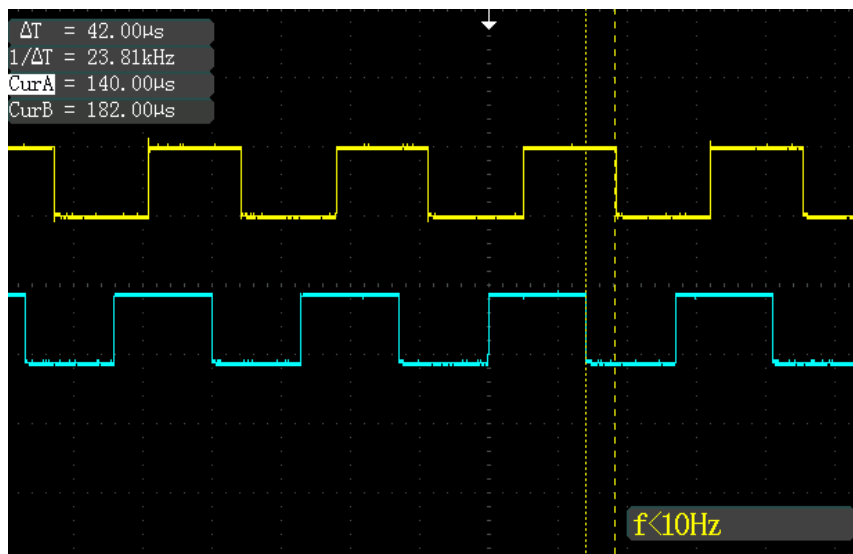
Conforme já discutido anteriormente, a frequência que apresentou os melhores resultados em nosso experimento foi de 3700Hz quando a distância entre os sensores foi $D = 0,14\text{m}$.

Figura 33 – Diferença de tempo entre as bordas de descida dos dois sensores



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Figura 34 – Simetria da diferença de tempo, entre os dois sensores



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Desse modo, dispondo da distância entre os dois sensores e o tempo de propagação, podemos calcular a velocidade do som nesse metal. Em que no caso, estamos usando uma barra de cobre. Usando a seguinte equação:

$$\begin{aligned} D &= vt \\ v &= \frac{D}{t}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

substituindo o valor da distância entre os sensores e a diferença de tempo entre ele na 4.1 obtemos.

$$v = \frac{0,14 \text{ m}}{0,000042 \text{ s}}$$

$$v \approx 3.333,3 \text{ m/s}$$

Agora obtido a velocidade, podemos calcular o modulo de elasticidade do material ou modulo de Young, utilizando a Eq. 2.18, obtemos:

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

$$v^2 = \frac{E}{\rho}$$

$$E = v^2 \rho \quad (4.2)$$

A densidade do cobre é de aproximadamente $\rho = 8,96 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$, então substituindo na 4.4 o valor da velocidade encontrada e da densidade do material temos, portanto,

$$E \approx (3.333,3 \text{ m/s})^2 8,96 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$E \approx 11.110,9 \text{ m}^2/\text{s}^2 8,96 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$E \approx 0,99 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$$

A velocidade do som em um metal, varia de acordo com a pureza do que ele é feito e temperatura. A velocidade do som no cobre a temperatura de 20°C , é de aproximadamente $v = 3560 \text{ m/s}$ e seu modulo de Young é de aproximadamente $E = 1,25 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$. Assim, comparando esse valor de referência para nossa medida realizada, vamos calcular o erro percentual ou erro relativo pela seguinte equação.

$$E_R = \frac{|A - a|}{A}, \quad (4.3)$$

onde:

A é o valor exato;

a é o valor aproximado.

Substituindo na Eq. 4.3 o valor de referência da velocidade e o valor encontrado no experimento obtemos.

$$E_R \approx \frac{|3560 - 3.333,3|}{3560}$$

$$E_R \approx 0,064$$

$$E_R \approx 6,4\%$$

O erro percentual de 6,4% pode ser atribuído a diversos fatores experimentais. Entre eles, destacam-se as incertezas na medição do tempo de voo, que dependem diretamente da

resolução temporal do sistema de aquisição de dados e da precisão dos sensores utilizados. Pequenas variações na temperatura do material também podem influenciar a velocidade do som, uma vez que propriedades elásticas, como o módulo de Young, são sensíveis a mudanças térmicas.

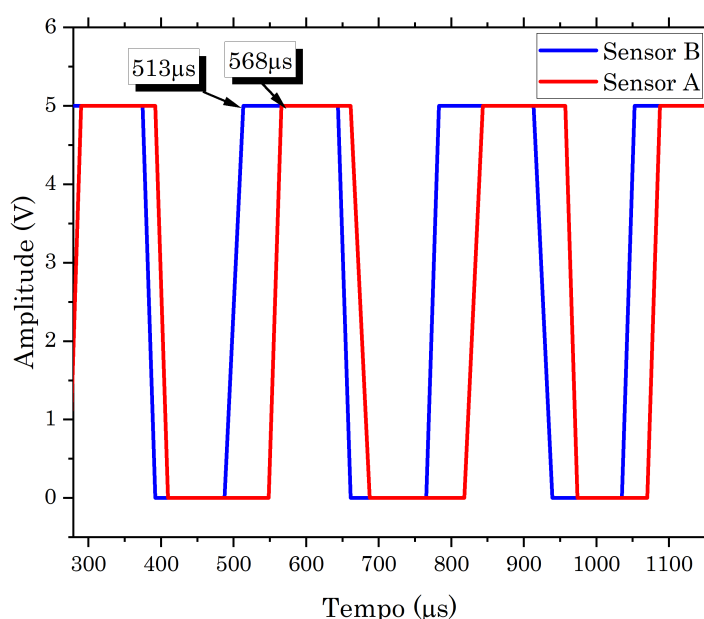
No entanto, nosso experimento se mostrou muito promissor para a medição da velocidade do som em um metal. Com os devidos ajustes e calibrações, é possível obter uma precisão ainda maior. Além disso, por se tratar de um aparato experimental de baixo custo, foi possível obter um valor bastante próximo da velocidade do som no material em estudo (cobre), o que justifica sua utilização e aplicação.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS PELO ARDUINO

Após a fase de calibração e testes com o osciloscópio, utilizamos o Arduino para realizar as medições, seguindo a metodologia discutida na Seção 3. Mantivemos o sistema na mesma configuração e utilizamos os mesmos valores de frequência ($f = 3700$ Hz) e distância entre os sensores (14 cm) utilizado a mesma barra metálica. Com isso foi possível comparar diretamente e em tempo real os resultados registrados pelo osciloscópio e pelo Arduino.

A inicialização do experimento utilizando o Arduino, seguir os mesmos passos já discutidos na 3.3.1. Após a recepção dos dados brutos, no monitor serial, inserimos os dados no software analisador Origin, onde foi possível reconstruir a forma de onda digital registrada pelo Arduino. Este resultado é mostrado na Fig. 35.

Figura 35 – Medidas realizadas pelo Arduino



Fonte: Autoria Própria, 2025.

Podemos observar que a diferença de tempo entre as duas frentes de onda consecutivas escolhidas para o cálculo o tempo corresponde $55 \mu\text{s}$. Prosseguindo com cálculos da forma que fizemos anteriormente obtemos o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} v &= \frac{0,14 \text{ m}}{0,000055 \text{ s}} \\ v &\approx 2.545,4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Calculando o erro percentual, temos.

$$\begin{aligned} E_R &\approx \frac{|3560 - 2.545,4|}{3560} \\ E_R &\approx 0,28 \\ E_R &\approx 28\% \end{aligned}$$

E o módulo de Young é.

$$\begin{aligned} E &\approx (2.545,4 \text{ m/s})^2 8,96 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3 \\ E &\approx 58.098.010 \text{ m}^2/\text{s}^2 8,96 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3 \\ E &\approx 0,58 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Nossos resultados mostram portanto que, na atual configuração, o aparato é capaz de medir a velocidade do som na barra com um erro de cerca de 28%, o que pode ser considerado um valor relativamente alto. Entretanto, vale destacar que este é um aparato construindo com materiais de baixo custo e impressão 3D e encontra-se em sua primeira versão. Durante o desenvolvimento do trabalho identificamos várias pontos que podem ser aperfeiçoados.

Por fim, destacamos nosso sistema uma alternativa acessível em comparação a métodos convencionais que utilizam equipamentos de alto custo, como osciloscópios possibilitando sua implementação em laboratórios de ensino que não dispõe de tais recursos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos fenômenos ondulatórios, com ênfase na acústica, é de suma importância para que o aluno compreenda como os efeitos sonoros funcionam em determinados equipamentos que ele utiliza no dia a dia. No entanto, a realização desses estudos demanda um alto custo com equipamentos para a execução dos experimentos nos quais se deseja medir a velocidade do som.

Diante disso, o experimento aqui proposto apresenta-se como uma alternativa viável para a medição da velocidade do som em metais em escolas e universidades. Com essa compreensão, o aluno será capaz de determinar propriedades intrínsecas do material e verificar suas aplicações no mundo real. A justificativa para sua implementação baseia-se no fato de que o experimento utiliza materiais reaproveitados e componentes eletrônicos relativamente baratos, além do Arduino, que pode ser encontrado em diversas faixas de preço, oferecendo um excelente custo-benefício em comparação, por exemplo, a um osciloscópio. Além disso, o experimento segue a filosofia *open-source*, conforme discutido anteriormente no trabalho, permitindo que os códigos desenvolvidos para a leitura dos sinais sejam disponibilizados gratuitamente, assim como os modelos das peças necessárias para a montagem do aparato. Dessa forma, um professor pode acessá-los, baixá-los e utilizá-los livremente.

Para trabalhos futuros, o aparato experimental pode ser aprimorado para aumentar sua precisão, substituindo a placa Arduino Mega 2560 por uma mais potente, como a Due, além do uso de sensores de áudio com maior sensibilidade, entre outras melhorias, dependendo do grau de precisão desejado para a medição. Isso permitirá que os resultados obtidos estejam cada vez mais próximos dos valores de referência. Além disso, a implementação de um firmware dedicado pode viabilizar o fornecimento dos dados de diferença de tempo entre os sensores e da largura de onda, sem a necessidade de softwares de terceiros como SciDavis ou Origin. No entanto, ressaltamos que a abordagem utilizada neste trabalho é mais vantajosa, pois oferece um leque maior de possibilidades de aprendizado para o aluno, permitindo o manuseio desses softwares, que poderão ser utilizados futuramente.

Por fim, destacamos a importância do uso de experimentos de baixo custo no ensino de física, tanto no nível médio quanto no superior, pois isso contribui para a democratização do acesso à experimentação e promove uma metodologia de ensino mais envolvente e tecnológica. Dessa forma, os alunos estarão cada vez mais preparados para um mundo no qual o uso de tecnologias e a automação tornam-se cada vez mais presentes.

REFERÊNCIAS

- ADMIRAL, T. Ensino de física por investigação: Usando o Arduíno como ferramenta educacional:. **Revista Eletrônica Sala de Aula em Foco**, v. 9, n. 1, p. 116–131, ago. 2020. Disponível em: <<https://ojs.ifes.edu.br/index.php/saladeaula/article/view/495>>.
- ALMEIDA, T. C.; DIAS, E. d. C.; JULIÃO, A. d. S. Um laboratório portátil de baixo custo: medição de g utilizando um pêndulo e a placa raspberry pi. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p. 590–602, ago 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2017v34n2p590>>.
- ARDUINO. **Arduino - Open-source Electronic Prototyping Platform**. 2024. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 23 set. 2024.
- ARISTON, M. *et al.* O uso de smartphones para o desenvolvimento de atividades experimentais no ensino de física. **Revista Insignare Scientia - RIS**, v. 5, n. 3, p. 105–124, ago. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.uffs.edu.br/index.php/RIS/article/view/12659>>.
- AUSUBEL, D. P. **Educational Psychology: A Cognitive View**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968.
- BRASL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**, Brasília, 2018.
- BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. **Tópicos de Física**. 19. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2012. v. 3. ISBN 978-85-02-17812-0.
- CALLISTER, J. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering AN INTRODUCTION**. 9nd. ed. Printed in the United States of America: WILEY, 2013. ISBN 978-1118324578.
- CARDOSO, J. M.; ZANNIN, M. Proposta experimental para análise das variáveis de estado dos gases com Arduino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 41, n. 4, p. e20190028, 2019. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0028>>.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 33, n. 4, p. 4503–4503, Oct 2011. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000400018>>.
- 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**, Sociedade Brasileira de Física, v. 38, n. 2, p. e2308, 2016. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2015-0012>>.
- DUARTE, S. E. Física para o ensino médio usando simulações e experimentos de baixo custo: um exemplo abordando dinâmica da rotação. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, p. 525–542, ago. 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2012v29nesp1p525>>.

- EVANGELISTA, F. L.; OLIVEIRA, L. Moura de. Estudo das consequências da aplicação de impressoras 3d no ambiente escolar. **Physicae Organum - Revista dos Estudantes de Física da UnB**, v. 7, n. 1, p. 39–58, abr. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.unb.br/index.php/physicae/article/view/35946>>.
- GANESH, R. S. *et al.* Artificial intelligence based smart facial expression recognition remote control system. In: **2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1056–1061.
- GRANDINI, N. A.; GRANDINI, C. R. Os objetivos do laboratório didático na visão dos alunos do curso de licenciatura em física da unesp-bauru. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 26, n. 3, p. 251–256, 2004. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-47442004000300011>>.
- HART, G. P. Measurement of the speed of sound in metal rods using the microcomputer. **The Physics Teacher**, v. 24, n. 2, p. 86–89, 1986. Disponível em: <<https://pubs.aip.org/aapt/pte/article-abstract/24/2/89/269251/Measurement-of-the-speed-of-sound-in-metal-rods?redirectedFrom=fulltext>>.
- HUGGINS, E. Speed of sound in metal pipes: An inexpensive lab. **The Physics Teacher**, v. 46, p. 13–14, jan 2008.
- KEY, T.; SMIDROVSKIS, R.; FROM, M. Measuring the speed of sound in a solid. **The Physics Teacher**, v. 38, n. 2, p. 76–77, feb 2000. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000PhTea..38...76K>>.
- MALVINO, A.; BATES, D. J. **Eletrônica**. 8ª edição. ed. Porto Alegre, RS, Brasil: AMGH Editora Ltda., 2016. v. 2. Tradução: Antonio Pertence Jr. ISBN 978-85-8055-593-6.
- MIR, A.; RAJGURU, S. Implementation of an industrial automation system model using an arduino. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 13, p. 4131–4144, 12 2018.
- MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 43, p. e20200451, 2021. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0451>>.
- NEVES, D. R. M. d. *et al.* Uma proposta de baixo custo para experimentos com raios catódicos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 256–286, maio 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2019v36n1p256>>.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas e calor**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014. v. 2.
- OLIVEIRA, I. N. d. *et al.* Estudo das propriedades do diodo emissor de luz (led) para a determinação da constante de planck numa maquete automatizada com o auxílio da plataforma Arduíno. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 42, p. e20190105, 2020. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0105>>.
- PIZETTA, D. C. *et al.* Uma avaliação experimental do tubo de ondas sonoras estacionárias. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 39, n. 3, p. e3301, 2017. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0264>>.

PUGLIESE, G. Stem education-um panorama e sua relação com a educação brasileira. **Currículo sem fronteiras**, v. 20, n. 1, p. 209–232, 2020.

SCHMITT, O. H. A thermionic trigger. **Journal of Scientific Instruments**, v. 15, n. 1, p. 24, jan 1938. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/0950-7671/15/1/305>>.

SILVA, J. C. X.; LEAL, C. E. d. S. Proposta de laboratório de física de baixo custo para escolas da rede pública de ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 39, n. 1, 2017. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0167>>.

SILVEIRA, M. V. d.; BARTHEM, R. B.; SANTOS, A. C. d. Proposta didático experimental para o ensino inclusivo de ondas no ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 41, n. 1, p. e20180084, 2019. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0084>>.

SOARES, J. L. A. **VELOCIDADE DO SOM EM METAIS E O MÓDULO DE YOUNG**. [S.l.]: GitHub, 2025. <<https://github.com/JoaolucasAlmeida011/VELOCIDADE-DO-SOM-EM-METAIS-E-O-MODULO-DE-YOUNG.git>>.

SOUSA JR, I. V. *et al.* Física experimental com Arduino: ondas em uma corda tensionada. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 42, p. e20200177, 2020. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0177>>.

VIEIRA, R. F.; JÚNIOR, I. V. de S. **Velocidade do som em um gás: Um experimento utilizando Arduino**. Monografia (Graduação em Licenciatura em Física) — Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Parnaíba, Parnaíba, 2022. Disponível em: <<http://bia.ifpi.edu.br:8080/jspui/handle/123456789/981>>. Acesso em: 17 fev. 2025.

WARD, I. M.; SWEENEY, J. **An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers**. 2nd. ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2004. ISBN 978-0471496254.

WOOD, A. B. **A textbook of sound: being an account of the physics of vibrations with special reference to recent theoretical and technical developments**. New York: The Macmillan Company, 1930.

APÊNDICE A – ROTEIRO EXPERIMENTAL

PRÁTICA EXPERIMENTAL: Medindo a velocidade do som em uma barra metálica e módulo de Young

1. OBJETIVOS

O objetivo desta prática experimental é determinar o tempo de voo t a partir de uma distância conhecida, de um pulso que se propaga ao longo de uma barra metálica e com isso, calcular a velocidade do som no metal e, com base nessa velocidade, determinar o módulo de Young.

2. INTRODUÇÃO

A propagação do som em sólidos é amplamente estudada para compreender as propriedades mecânicas e acústicas dos materiais. Neste experimento, será determinado o valor da velocidade do som em barras metálicas utilizando sensores de áudio e a plataforma Arduino para a coleta e análise de dados. O objetivo é fornecer uma metodologia prática e acessível para o estudo de vibrações mecânicas e propriedades elásticas dos materiais.

A seguir serão apresentados, alguns conceitos importantes para o desenvolvimento da prática experimental.

2.1 Tempo de voo

Um método amplamente utilizado para medir o tempo que um sinal leva para se propagar entre dois sensores é conhecido como *Time-of-flight* ou *Tempo de voo*. No caso da medição do tempo que um pulso leva para percorrer uma determinada distância em uma barra, o procedimento funciona da seguinte maneira: dois sensores de áudio são fixados na estrutura, posicionados a uma distância conhecida um do outro. Em seguida, uma perturbação é gerada na barra, propagando-se até atingir o primeiro sensor e depois o outro. O intervalo de tempo entre a detecção do sinal por ambos os sensores é denominado tempo de voo.

2.2 Velocidade Média

A velocidade média é definida como a razão entre a distância percorrida por um corpo e o intervalo de tempo necessário para percorrê-la. Essa relação é expressa pela seguinte equação:

$$V = \frac{D}{t}$$

2.3 Módulo de Young

Em ciência dos materiais, um conceito fundamental para a determinação das propriedades de um material é o Módulo de Elasticidade, também conhecido como Módulo de Young. Ele quantifica a resistência do material à compressão ou a deformações elásticas, sendo um parâmetro essencial para caracterizar sua rigidez. E a equação que o descreve é:

$$E = \rho v_{\text{sólido}}^2,$$

onde:

E é módulo de elasticidade;

ρ é a densidade do material;

$v_{\text{sólido}}$ é a velocidade do som no material.

2.4 Velocidade do som em uma barra metálica

A velocidade do som é maior nos sólidos do que nos líquidos e gases, pois depende das propriedades do meio em que se propaga. Nos gases, ela varia com a pressão e a temperatura, enquanto nos líquidos e sólidos é influenciada pela densidade e elasticidade do material.

Dessa forma, diferentes metais apresentarão distintas velocidades de propagação do som. Conhecendo o módulo de elasticidade do material e sua densidade, é possível calcular essa velocidade por meio da seguinte equação:

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

7.5 Desvio Padrão

Para determinar a precisão de uma medida, calcula-se o desvio padrão, que representa a dispersão de um conjunto de dados. Quanto mais próximo de zero for esse desvio, menor será a dispersão dos dados. O desvio padrão é utilizado para quantificar a incerteza e a confiabilidade das medições em um experimento. Ele é representado pela letra grega sigma σ e pode ser descrito pela seguinte equação:

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

onde:

σ : desvio-padrão

n : quantidade de elementos no conjunto

x_i : elementos do conjunto

$\bar{x}$: média do conjunto

Para calcular $\bar{x}$, que é a média entre as medidas, utilizasse a seguinte expressão:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Para avaliar a confiabilidade de uma medida experimental, como a distância D e o tempo t , calcula-se o desvio padrão correspondente a cada um, representado por σ_D e σ_t . E consequentemente o da velocidade σ_v também, e tais medidas serão calculadas ao decorrer da prática.

7.6 Erro absoluto

O erro absoluto de uma determinada medida, é dada pela diferença em modulo do valor Exato com o valor aproximado, segue a equação:

$$E_A = |A - a|,$$

onde:

A é o valor exato;

a é o valor aproximado.

7.7 Erro relativo ou erro percentual

O erro percentual de uma medida, é dado pela divisão do valor absoluto pelo valor exato. Esse é muito utilizado para saber o qual próximo ou confiável é a sua medida e é dada pela seguinte expressão.

$$E_R = \frac{E_A}{A}$$
$$E_R = \frac{|A - a|}{A}$$

Para achar o valor em porcentagem, basta multiplicar o valor encontrado por 100.

3. MATERIAIS NECESSÁRIOS

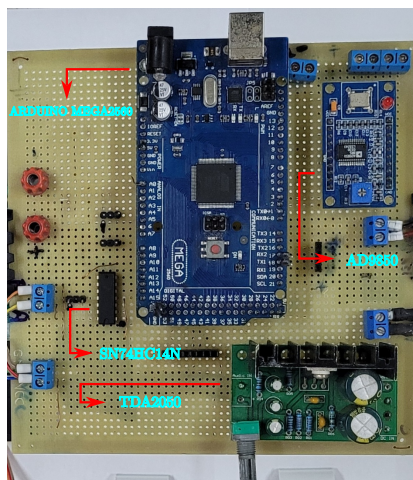
Os materiais que serão utilizados para a pratica experimental são:

- Base com suporte para barra metálica e os outros componestes;
- Barra metálica (objeto de estudo);
- Dois microfones max4466;
- Um circuito integrado SN74HC14N;
- Placa Arduino Mega 2560;
- Um amplificador de áudio TDA 2050;
- Um módulo gerador de funções AD9850;
- Um alto-falante;
- Uma moeda de 5 centavos;
- Uma régua;
- fios;
- Computador.

4. ENTENDENDO O FUNCIONAMENTO DO EXPERIMENTO E SUA MONTAGEM

A prática experimental consiste em um aparato, para determinar a velocidade do som com base no tempo de voo. Para isso, uma barra metálica é fixada em um suporte ajustável produzido por uma impressora 3D e algumas partes de metalon, e dois sensores de áudio são acoplados a ela, posicionados a uma distância conhecida. Também é composto, por um sistema de aquisição de dados com um hardware e um software que são responsáveis por fazer a medição do tempo entre os dois sensores.

Suporte, sensores de áudio e barra

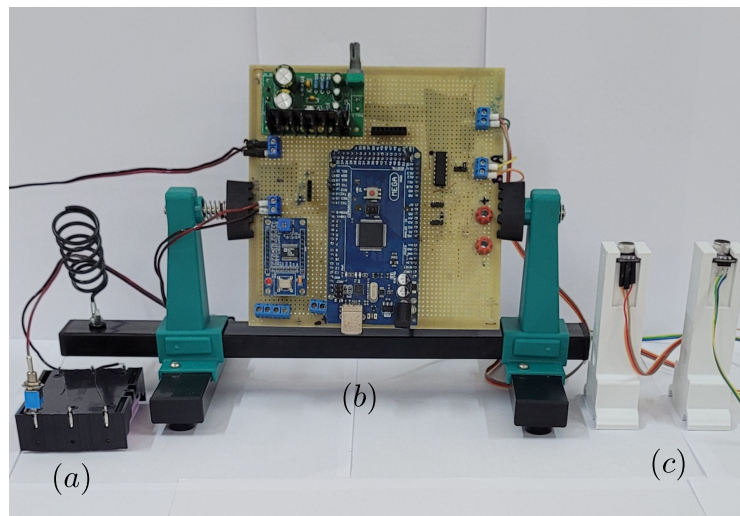


Fonte: Autoria Própria, 2025.

O aparato experimental, está equipado com um sistema de aquisição de dados, que é composto por uma placa Arduino Meca 2560, dois microfones Max4466 e um circuito integrado 74HC14. Essa plataforma será responsável por fazer as medições dos intervalos de tempo decorridos de um senso até outro. Na Figura abaixo, é possível observa a plataforma.

Na figura abaixo podemos ver os sensores de áudio conectados a placa eletrônica e uma bateria que para ligar o TDA2050.

Em (a) temos a bateria para ligar o TDA2050. (b) componentes para captura do sinal. (c) dois sensores de áudio Max4466.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

O sistema que vai ser responsável pela excitação da barra é, um alto-falante que no seu centro foi colocado uma moeda para que ele pudesse vibrar a barra com mais precisão. Na figura abaixo é possível visualizar o componente.

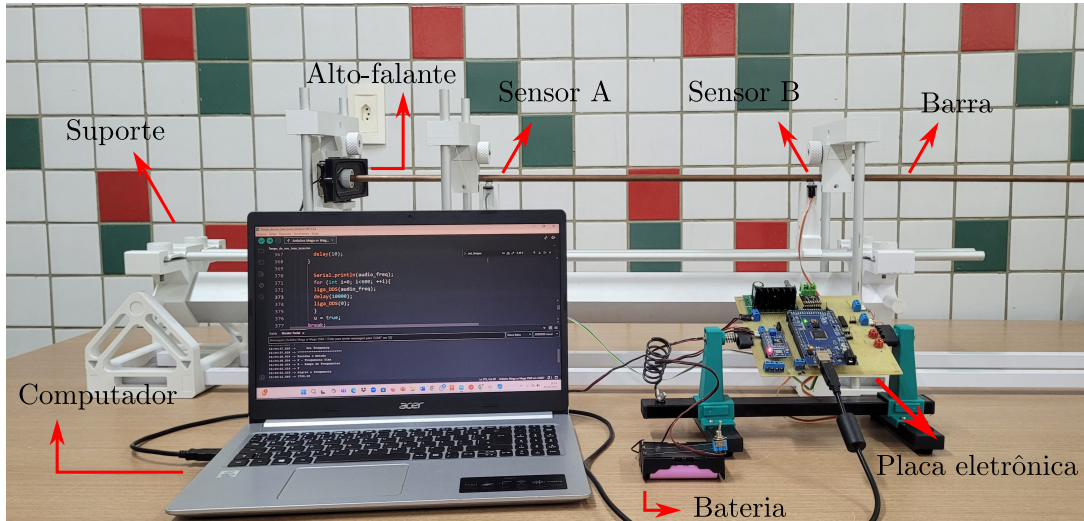
Sistema de excitação da barra.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

E finalmente, temos os experimento completo e montado com os devidos componestes no lugar.

Aparato experimental completo.



Fonte: Autoria Própria, 2025.

4.1 Link para a montagem do experimento e o seu funcionamento

Para mais informações de como funciona, montagem, realização, código e os modelos das peças para impressão 3D, seguir o link do Github.

Link: <https://github.com/JoaolucasAlmeida011/VELOCIDADE-DO-SOM-EM-METAIS-E-O-MODULO-DE-YOUNG.git>

5. ROTEIRO EXPERIMENTAL:

Uma vez que entenda o experimento e como realizar e obter os dados siga os passos a seguir:

- 1º - Insira a barra nos suportes;
- 2º - Posicione os sensores na barra;
- 3º - Determine a distância entre os sensores;
- 4º - Coloque o código na IDE do Arduino do seu computador, que irá executar a medição do tempo;
- 5º - Conecte o Arduino ao computador;
- 6º - Faça a calibração do experimento conforme os vídeos;
- 7º - Após a calibração do aparato, inicie o experimento;
- 6º - Cause uma perturbação na barra utilizando o alto-falante, com uma frequência específica;
- 7º - Anote os dados conforme apresentados no trabalho.

Plote um gráfico de tensão pelo tempo, com os dados obtidos.

Anote a distancia entre os sensores.

$$D_1 = \underline{\hspace{2cm}}$$

Anote o tempo obtido pelo Arduino, lembrando que segui a mesma forma que esta descrita no trabalho (TCC).

$$t_1 = \underline{\hspace{2cm}}$$

6. RESULTADOS

6.1 Pelo gráfico obtido, anote e analise as larguras dos pulsos das duas ondas e discuta sobre o resultado;

6.2 Com os dados obtidos da distância D e do tempo t , calcule a velocidade do som na barra em análise, utilizando a equação da velocidade média apresentada anteriormente.

6.3 Compare os seus resultados com os valores já tabelados na literatura para a velocidade do som nessa barra.

6.4 Com a velocidade do som na barra obtida, calcule o módulo de elasticidade, ou módulo de Young, utilizando a equação apresentada anteriormente.

6.5 Compare os seus resultados com os valores já tabelados na literatura do módulo de Young, para este material.

6.6 Calcule o desvio padrão de σ_D , σ_t e σ_v , e compare o quão precisa foram as suas medidas.

6.7 Calcule o erro absoluto e percentual da medida da velocidade, e veja a porcentagem de erro;

6.8 Discuta com a turma os resultados obtidos.

7. Valores de Referências

A Tabela a seguir apresenta algumas características de valores de referencia para as propriedades mecânicas de alguns metais. As incertezas são menores que 10%.

Velocidade do som, módulo de Young para diferentes metais e suas respectivas densidades.

Metal	Velocidade do Som (km/s)	Módulo de Young (10^{11} kg/m²)	Densidade (10^3 kg/m³)
Alumínio	5,10	0,70	2,70
Cobre	3,56	1,25	8,96
Ferro	5,13	2,06	7,86
Aço	5,13	2,00	7,81 – 7,90
Latão	3,30	0,90	8,44 – 8,60

Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE B – CÓDIGO UTILIZADO NA PRÁTICA EXPERIMENTAL

```

1 // O codigo apresentado realiza a captura dos tempos de deteccao de sinais
  em dois sensores conectados a um Arduino, utilizando o Timer1 para medir
    o tempo de voo da onda mecanica em uma barra metalica. Ele registra o
      instante de mudanca de estado logico de cada sensor e armazena os dados
        para analise posterior. A coleta e feita por meio de interrupcoes
          externas, garantindo maior precisao na medicao dos eventos.
2
3 // Este programa foi desenvolvido para o projeto de medicao da velocidade
  do som em metais e apresentado ao Instituto Federal de Educacao, Ciencia
    e Tecnologia do Piau (IFPI). Seu objetivo e apoiar atividades de
      ensino experimental e possibilitar, com adaptacoes, o uso em aplicacoes
        industriais.
4
5 #define MAX_SAMPLES 50 // Numero maximo de amostras coletadas para cada
  sensor
6 #define sensor_A 2      // Define o pino do sensor A
7 #define sensor_B 3      // Define o pino do sensor B
8
9 // Arrays para armazenar os timestamps das mudancas nos sensores
10 volatile uint16_t timestampsA[MAX_SAMPLES];
11 volatile uint16_t timestampsB[MAX_SAMPLES];
12
13 // Arrays para armazenar os estados logicos dos sensores (0 ou 1)
14 volatile uint16_t logic_A[MAX_SAMPLES];
15 volatile uint16_t logic_B[MAX_SAMPLES];
16
17 // Contadores de amostras para cada sensor
18 volatile uint8_t sample_countA = 0, sample_countB = 0;
19
20 // Flags para indicar que a captura foi concluida
21 volatile bool capture_doneA = false;
22 volatile bool capture_doneB = false;
23
24 void setup() {
25     Serial.begin(2000000); // Inicia a comunicacao serial com baud rate de
      2 Mbps
26     Serial.println("Iniciando...");
27
28     // Configura Timer1 para contar tempo com resolucao de 1/16MHz = 62.5ns
29     TCCR1A = 0; // Modo normal do Timer1 (sem geracao de PWM)
30     TCCR1B = (1 << CS11); // Prescaler de 8 (1 tick = 500ns)
31     TCNT1 = 0; // Zera o contador do Timer1
32
33     // Configura os pinos dos sensores como entrada com pull-up interno
34     pinMode(sensor_A, INPUT_PULLUP);

```

```
35     pinMode(sensor_B, INPUT_PULLUP);
36
37     // Configura interrupcoes externas para detectar mudancas nos sensores
38     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor_A), captureChangeA, CHANGE
39 );
40     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor_B), captureChangeB, CHANGE
41 );
42
43     Serial.println("Sistema pronto!");
44 }
45
46 // Funcao chamada por interrupcao quando ha mudanca no sensor A
47 void captureChangeA() {
48     if (sample_countA < MAX_SAMPLES) { // Se ainda ha espaco para mais
49 amostras
50         timestampsA[sample_countA] = TCNT1; // Armazena o tempo da mudanca
51         logic_A[sample_countA] = digitalRead(sensor_A); // Armazena o
52 estado logico do sensor
53         sample_countA++; // Incrementa o contador de amostras
54
55         if (sample_countA >= MAX_SAMPLES) {
56             capture_doneA = true; // Marca a captura como concluida
57         }
58
59         // Debug opcional para imprimir cada mudanca detectada
60         // Serial.print("A Mudanca Tempo: "); Serial.print(TCNT1);
61         // Serial.print(" Estado: "); Serial.println(logic_A[sample_countA
62 - 1]);
63     }
64 }
65
66 // Funcao chamada por interrupcao quando ha mudanca no sensor B
67 void captureChangeB() {
68     if (sample_countB < MAX_SAMPLES) { // Se ainda ha espaco para mais
69 amostras
70         timestampsB[sample_countB] = TCNT1; // Armazena o tempo da mudanca
71         logic_B[sample_countB] = digitalRead(sensor_B); // Armazena o
72 estado logico do sensor
73         sample_countB++; // Incrementa o contador de amostras
74
75         if (sample_countB >= MAX_SAMPLES) {
76             capture_doneB = true; // Marca a captura como concluida
77         }
78
79         // Debug opcional para imprimir cada mudanca detectada
80         // Serial.print("B Tempo: "); Serial.print(TCNT1);
```

```
74     // Serial.print(" Estado: "); Serial.println(logic_B[sample_countB
75     - 1]);
76 }
77
78 void loop() {
79     // Se a captura de ambos os sensores foi concluida, processa os dados
80     if (capture_doneA && capture_doneB) {
81         Serial.println("Captura concluida!");
82         Serial.println("Tempo A (ticks)\tEstado A\tTempo B (ticks)\tEstado
83         B");
84
85         // Define o numero minimo de amostras entre os dois sensores
86         uint8_t min_samples = min(sample_countA, sample_countB);
87
88         // Exibe os dados coletados de ambos os sensores
89         for (uint8_t i = 0; i < min_samples; i++) {
90             Serial.print(timestampsA[i]); // Tempo do sensor A
91             Serial.print("\t");
92             Serial.print(logic_A[i]); // Estado do sensor A
93             Serial.print("\t");
94             Serial.print(timestampsB[i]); // Tempo do sensor B
95             Serial.print("\t");
96             Serial.println(logic_B[i]); // Estado do sensor B
97         }
98
99         // Reinicia o contador de tempo e as variaveis de controle para a
100         proxima medicao
101         TCNT1 = 0;
102         capture_doneA = false;
103         capture_doneB = false;
104         sample_countA = 0;
105         sample_countB = 0;
106     }
107 }
```

Listing B.1 – Código para o tempo de voo