



# Velocidade do som em metais pelo método do tempo de voo

Speed of sound in metals by the time of flight method

Denilson B. de Souza Jr.<sup>1</sup>, John W. B. de Araújo<sup>\*2</sup>, Edson M. Kakuno<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, RS, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande, Instituto de Matemática, Estatística e Física, Rio Grande, RS, Brasil.

Recebido em 28 de abril de 2020. Revisado em 28 de maio de 2020. Aceito em 01 de junho de 2020.

Este trabalho propõe uma instrumentação, simples de manipular, destinado a aulas experimentais de ensino médio ou de graduação, capaz determinar a velocidade do som em barras metálicas através do tempo de voo, *i.e.*, do tempo de propagação de um pulso longitudinal. O pulso é produzido a partir de uma perturbação (choque mecânico) em uma das extremidades de uma barra, sua velocidade é obtida através da razão do espaço percorrido pelo pulso e do tempo de propagação. Encontrou-se para o aço o valor de 4,7 km/s, com 5,3% de incerteza total em relação ao valor teórico.

**Palavras-chave:** Velocidade do som, Plataforma Arduino, Ensino de física, Ondas mecânicas.

This work proposes a simple instrumentation, intended for experimental high school or undergraduate levels, capable of determining the speed of sound in metal bars through the flight time, *i.e.*, the propagation time of a longitudinal pulse through the bar. The pulse is produced from a disturbance (mechanical shock) at one end of a bar, its speed is obtained by the ratio of the space traveled by the pulse and its propagation time. For steel, the value of 4.7 km/s was found, with 5.3% of total uncertainty in relation to the theoretical value.

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

## 1. Introdução

O método proposto é conveniente para aplicações em ensino, pois permite a interação do aluno, tanto para a execução do experimento como para a obtenção da velocidade. O experimento consiste em gerar uma perturbação em um ponto de uma barra e medir o tempo para esta perturbação alcançar um outro ponto da barra, e com o modelo de propagação da onda em meio uniforme, a velocidade é obtida, pela razão da distância entre os pontos e o tempo. Trabalhos que utilizam o mesmo princípio exposto podem ser vistos em [1, 2, 3, 4].

Este trabalho apresenta uma modificação da proposta de Speziali e Veas [1], no qual um pulso longitudinal, doravante pulso, é produzido em uma das extremidades de uma barra metálica, por exemplo, permitindo que esta sofra uma queda livre sobre uma superfície metálica rígida (denominada de base) e de massa muito maior do que a massa da barra. Quando a barra colide com a base, é produzido um pulso que se propaga na barra até a outra extremidade (livre) e como há uma mudança brusca de meio, extremidade livre da barra com o ar, uma parte significativa do pulso retorna pela barra, fazendo a mesma “pular” (ação e reação).

Durante o tempo do pulso percorrer a barra (tempo de voo), ela permanece em contato com a base, e quando o pulso retorna a extremidade na qual o choque foi gerado, através das forças de ação e reação a barra se separa da base, *i.e.*, a base “empurra” a barra. Portanto medindo-se o tempo de contato da barra com a base, obtém-se o tempo para o pulso percorrer o comprimento da barra duas vezes (ida e volta) e calcula-se sua velocidade pela razão do dobro do comprimento com tempo, e esta corresponde a velocidade de propagação da onda sonora na barra. Speziali e Veas fazem uma analogia de uma perturbação se deslocando ao longo de uma mola suspensa na vertical.

O tempo de propagação do pulso na barra é pequeno e, portanto, também é pequeno o tempo de contato da barra com a base, inviabilizando sua medição de forma manual, por exemplo, com um cronômetro. Uma possibilidade nesta situação é a medida de alguma grandeza elétrica. O intervalo de tempo que se deseja medir encontra-se em torno de dezenas ou centenas de microssegundos, dependendo do comprimento da barra.

O contato entre a barra metálica e uma base, também metálica, funciona de forma análoga a uma chave do tipo liga-desliga. No trabalho de Speziali, essa “chave” é utilizada para descarregar um capacitor em um circuito série formado por um capacitor (C), um resistor (R) e a “chave”, enquanto a “chave” estiver fechada o

\*Endereço de correspondência: johnwelvins@gmail.com



e uma haste de aterramento (barra), como mostrados na Figura 2.

Para coletar o tempo de contato da barra com a base, o programa mostrado no Código 1, utiliza a função *pulseIn* [5], esta função mede a largura temporal de um pulso na entrada digital selecionada (D10), seja ele “1” (*HIGH*) ou “0” (*LOW*). A função *pulseIn* possui de dois a três parâmetros: o número do pino digital, *pin*, estado (“1” ou “0”) em que o tempo será medido e o tempo máximo de espera (*time out*), que é opcional. No programa, Código 1, a opção *time out* não é utilizada, e caso seja, é

**Código 1:** Programa para determinação do tempo de propagação de um pulso para Arduino e outras plataformas compatíveis.

```

1 /* Universidade Federal do Pampa
2 * Unipampa - Campus Bagé- 2019.
3 * D. SOUZA JR.; E.M. KAKUNO; J. W. B. ARAÚJO.
4 * Programa desenvolvido no TCC de Souza Jr.
5 * Determinação da velocidade do som em barras
6 * Metálicas através do tempo de propagação.
7 * Programa para medição da velocidade do som em uma
   barra de metal
8 * Esta rotina utiliza a função pulseIn(), cuja
   descrição pode ser
9 * obtida em
   https://www.arduino.cc/en/Reference/PulseIn.
10 *
11 * Variáveis:
12 * largura_pulso -> tempo de propagação do pulso,
   ida e volta
13 * t -> variável de controle para evitar erro de
   múltiplas detecções.
14 */
15
16 int largura_pulso, n=0;
17 double t;
18
19 void setup() {
20 // configurando comunicação serial:
21 Serial.begin(9600);
22 // configurando entrada digital 10 para detectar
   o curto elétrico.
23 pinMode(10, INPUT);
24 // configurando saída digital 12 para alimentar
   o circuito.
25 pinMode(12, OUTPUT);
26 digitalWrite(12 , HIGH);
27 }
28
29 void loop() {
30 // Medição do tempo de contato entre base e a barra.
31 largura_pulso = pulseIn(10, HIGH);
32
33 // Filtro da detecção do tempo de curto e de
   múltipla detecção.
34 if (largura_pulso > 100 && largura_pulso < 1000
   && (micros()-t)>1000000){
35 t = micros();
36 n = n+1;
37 Serial.print(n);
38 Serial.print("\t");
39 Serial.println(largura_pulso);
40 }
41 }

```

recomendável confirmar o tempo de espera executado pela função, pois em testes prévios verificou-se uma divergência entre o valor programado e o valor executado pela função.

O filtro digital está programado para realizar duas funções durante o processo de medidas, primeira, selecionar pulsos dentro do intervalo de 100 s a 1000 s, que foi escolhido em função do menor e do maior tempo esperado durante a coleta de dados com as barras, sendo para menor, 050 cm, da ordem de 200 s e para a maior, 200 cm, da ordem de 800 s.

A segunda finalidade do filtro digital é selecionar apenas o primeiro ponto, correspondendo ao primeiro curto, contato da barra com a base, assim descartando os demais pulsos que ocorrerem no intervalo de um segundo. Ela foi implementada, pois a partir da execução do experimento percebeu-se que somente o primeiro contato fornece pontos sistemáticos.

O programa começa com a declaração das variáveis utilizadas, a “largura\_pulso” que armazena o tempo medido, “n” que armazena o número de coletas, e “t” a variável de controle para evitar erro de múltiplas detecções. A função “*void setup(){...}*” é o espaço destinado a configurações, nela é iniciado a comunicação serial entre o Arduino e o computador, “*Serial.begin(9600)*” e em seguida são configurados os pinos digitais utilizados, o D10 como entrada digital, “*pinMode(10, INPUT)*”, o D12 como saída digital, “*pinMode(12, OUTPUT)*”, que ainda é configurado para estado alto, “*digitalWrite(12 , HIGH)*”.

A função “*void loop(){...}*” é executada pelo Arduino de forma cíclica, nela chama-se a função *pulseIn* e salva o valor retornado na variável, “*largura\_pulso = pulseIn(10, HIGH)*”. No filtro, “*if (largura\_pulso >100 &&...)*”, o valor salvo na variável “largura\_pulso” é comparado com os limites inferior e superior, de 100 e 1000 microssegundos respectivamente. Também é verificado quanto tempo se passou desde do último valor validado pelo filtro, eliminando pulsos subsequentes em até um segundo. Se esses critérios não forem atendidos, o programa volta para a função *pulseIn*; caso contrário, o valor é válido, e assim atualiza-se o valor da variável de controle temporal, “*t = micros()*” e são publicados na serial, “*Serial.print()*”, o número da medida “n”, e o valor medido, “largura\_pulso”.

### 3. Resultados

Durante os testes foram realizados uma série de medidas com uso parcial do filtro, sem habilitar a verificação dos limites de tempo, relacionados aos comprimentos das barras, visto que o intuito foi de qualificar o instrumento. Durante os testes foram utilizadas barras de aço com revestimento em cobre, hastes de aterramento comercial para fins de aterramento elétrico, com comprimento de 050, 100, 150 e 200 cm e diâmetro de 1,0 cm, uma base

de aço que corresponde a um segmento de trilho de trem com massa de 15,6 kg.

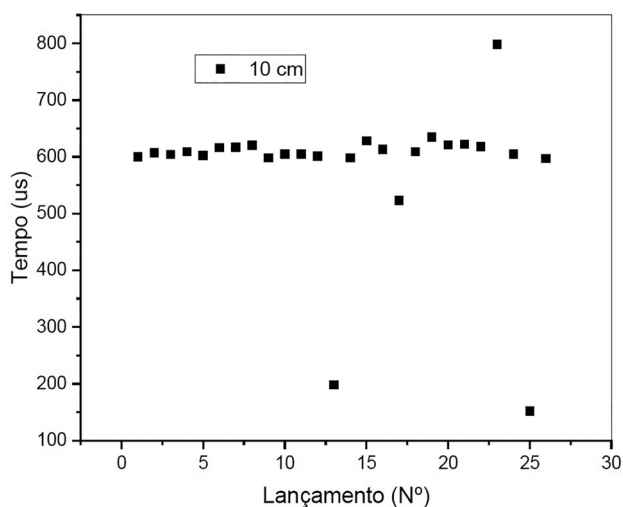
As barras foram sistematicamente abandonadas (em direção a base) em queda livre, normal à base, às distâncias de 05, 10, 15, 20, 25 e 30 cm. Um conjunto representativo de dados coletados é mostrado na Figura 3, que correspondem a 26 lançamentos da barra de 150 cm a uma altura de 10 cm.

Observa-se que o intervalo de tempo do pulso se propagar duas vezes na barra (ida e volta) é na ordem de 600 s. Os autores atribuem os três pontos mais dispersos da Figura 3 a erros de execução, como por exemplo a colisão ter ocorrido em uma região não homogênea da base (irregularidade da superfície e/ou oxidação), ou a barra não ter colidido com a base na proximidade de 90 graus. Também o resultado da Figura 3 propicia a discussão junto aos alunos quanto à utilidade de ferramentas estatísticas e de tratamento de dados.

Um quadro com um sumário dos resultados é mostrado na Tabela 1. Detalhes destes testes, inclusive com outros metais (tubo de alumínio e tubo de cobre) estão disponíveis no trabalho de Souza Jr. [6].

Na tabela 1 encontram-se os valores médios e suas incertezas (expressas em dois desvios padrões), calculados para a velocidade do som na barra, através da razão dos comprimentos pelos respectivos tempos médios medidos nas diversas alturas de lançamento. Na periferia da tabela pode-se averiguar os valores médios da velocidade de propagação do pulso e seus respectivos desvios.

Considerando todo o espectro de medidas realizado, barras de 50 cm a 200 cm e alturas entre 05 cm a 30 cm, o resultado médio da velocidade do som da barra foi de 4,7(2) km/s, com uma incerteza de 4,3%. Speziali e Veas reportam para o ferro, material mais próximo ao aço, o valor de 5,3(5) km/s, que corresponde a uma incerteza de 9,4%. As incertezas são da mesma ordem de grandezas,



**Figura 3:** Tempo correspondente da onda sonora propagar em uma barra de aço de 150 cm de comprimento no trajeto de ida e volta.

pois a técnica proposta é a mesma (lançamento da barra sobre um bloco rígido), diferindo somente na forma de medição do tempo.

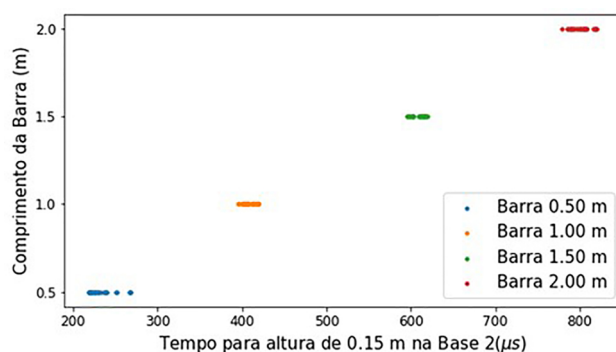
O objetivo de realizar diversas medidas com diferentes tamanhos de um mesmo material é o de analisar a melhor condição de se reproduzir o experimento, com maior precisão e acurácia. Indica-se uma haste de 100 cm a 200 cm e lançamentos entre as alturas de 10 cm a 25 cm, visto que os dados para estas condições apresentam menores dispersões.

Uma forma de validar o processo de medição é analisar a linearidade do tempo medido em função do comprimento da barra, pois assumindo que a velocidade é constante, modelo de onda em meio homogêneo, espera-se uma relação linear entre o tempo de propagação e o comprimento da barra. A Figura 4 apresenta os resultados de medições dos tempos para as diferentes barras de aço, foram feitos 26 lançamentos com cada barra a altura de 15 cm.

Cada barra gerou no gráfico da Figura 4, um conjunto de pontos na horizontal (no tempo), a largura do conjunto, corresponde a sua dispersão temporal total e cada cor corresponde a um comprimento de barra. Esta mesma análise fora realizada com as demais alturas, e observou-se o mesmo comportamento. Nota-se uma linearidade entre o tempo de propagação e o comprimento da barra, dentro da dispersão, isso dá indício de que o método é adequado para a determinação da velocidade do som, para fins didáticos.

Verificou-se ainda a confiabilidade do Arduino na medida do intervalo de tempo, conectando-se um osciloscópio no resistor R1 para observar o pulso elétrico no pino D10, Figura 1. Com a barra de 150 cm, em um lançamento de 15 cm de altura, encontrou-se 640 s no osciloscópio e 632 s no Arduino, na Figura 5 tem-se a representação do resultado do osciloscópio, portanto a medição do tempo com Arduino mostra-se confiável.

Foi realizado um arranjo alternativo em que a barra de 200 cm foi suspensa, na horizontal, em uma de suas extremidades foi instalado uma pastilha (transdutor) piezoelétrico, esta foi conectada na entrada de um osci-



**Figura 4:** Linearidade dos tempos de propagação em função do comprimento das barras de aço para altura de 15 cm.



**Tabela 1:** Velocidade do som e desvios padrões (km/s) para barras de aço de diferentes comprimentos, soltas de diferentes alturas (cm).

Altura	Barra 0,5 m	Barra 1,0 m	Barra 1,5 m	Barra 2,0 m	Méd.
5	4,2(4)	4,4(3)	4,7(2)	4,7(2)	4,5(3)
10	4,2(6)	4,6(1)	4,9(1)	4,9(2)	4,6(2)
15	4,3(5)	4,7(2)	4,9(1)	5,0(1)	4,7(2)
20	4,3(3)	4,7(1)	5,0(1)	5,0(1)	4,7(1)
25	4,3(4)	4,8(2)	4,9(2)	5,0(1)	4,7(2)
30	4,3(4)	4,8(2)	5,0(3)	5,0(1)	4,8(2)
Méd.	4,3(4)	4,7(2)	4,9(2)	4,9(1)	4,7(2)



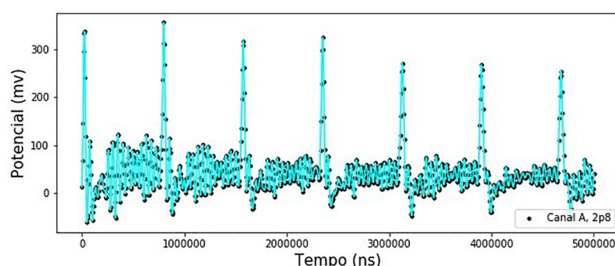
**Figura 5:** Captura de tela (*Trigger*) do lançamento da barra de 1,5 m na base, mostrando o tempo de contato.

loscópio, e gerou-se um pulso na barra batendo em sua outra extremidade com um martelo, Figura 6.

Identifica-se o intervalo entre os picos, com amplitude acima de 200 mV, como o tempo de propagação do pulso na barra (ida e volta), e a amplitude quase constante, dos pulsos, mostra que o tempo de amortecimento é longo, ou seja, pouca energia é “perdida” em reflexões nas extremidades da barra. O intervalo de tempo medido é compatível com o determinado pelo Arduino, da ordem de 800 s para a barra de 200 cm.

O modelo teórico utilizado para obter a velocidade ( $v$ ) da onda relaciona o módulo de Young ( $Y$ ), inverso da elasticidade, com a densidade do material ( $\rho$ ), conforme Hessel [7].

$$v = (Y/\rho)^{1/2} \tag{1}$$



**Figura 6:** Imagem dos pulsos gerados na haste pelo cristal piezoelétrico.

O tipo de material empregado na barra de aterramento é normalmente o aço 1020 ou 1010 com revestimento de cobre, conforme os fabricantes de hastes de aterramento. E as propriedades dos aços 1020 e 1010 foram obtidas no portal MatWeb [8], o aço 1020 é normalmente constituído por ferro (99,08 - 99,53 %), carbono (0,17 - 0,23 %), e outras impurezas em menor quantidade, possui densidade volumétrica de  $7,87 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e módulo de Young de 186 GPa. O aço 1010 é normalmente constituído por ferro (99,18 - 99,62 %), carbono (0,08 - 0,13 %), e outras impurezas em menor quantidade, possui densidade volumétrica de  $7,87 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e seu módulo de Young varia de 200 a 205 GPa. As respectivas velocidades teóricas são de 4.861 m/s e entre 5.041 m/s e 5.104 m/s, os resultados obtidos concordam dentro de 3,3 % em relação ao esperado pelo aço 1020, e associando, em quadratura, esta incerteza com a incerteza aleatória (4,7 %), obtido através da dispersão das medidas, obtém-se uma incerteza total de 5,3 %.

### 4. Conclusão

Considerando todo o espectro de medidas realizado, barras de 50 cm a 200 cm e alturas entre 05 cm a 30 cm, o resultado médio da velocidade do som da barra foi de 4,7(2) km/s, próximo ao valor teórico de 4,861 km/s para o aço 1020. Os resultados mostraram ainda que barras de aterramento com comprimento entre 100 e 200 cm, e lançamentos com alturas entre 10 e 25 cm, resultam em condições mais adequadas de reprodução do experimento. Verificou-se a linearidade do tempo de vôo em função do comprimento das barras, a medição do tempo de vôo pelo Arduino com um osciloscópio, a propagação do pulso na barra com um transdutor piezoelétrico com um osciloscópio, e os resultados indicam que a instrumentação proposta é adequada para a determinação da velocidade do som em barras metálicas. Esta instrumentação foi aplicada em uma turma de terceiro ano do ensino médio e se mostrou robusta, uma descrição desta aplicação e seu roteiro encontram-se em Souza Jr. [6]. O autor D. B. S. Jr. agradece ao Programa Residência Pedagógica da Unipampa, subprojeto Física-Química. Portaria CAPES nº 175, Agosto de 2018.

## Referências

- [1] N.L. Speziali e F.O. Veas, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **8**, 3 (1986).
- [2] E. Huggins, *The Physics Teacher* **46**, 13 (2008).
- [3] T. Key, R. Smidrovskis e M. From, *The Physics Teacher* **38**, 76 (2000).
- [4] M. Se-yuen, N. Yee-kong e W. Kam-wah, *Physics Education* **35**, 439 (2000).
- [5] <https://www.arduino.cc/en/Reference.PulseIn>, acessado em 13/04/2020.
- [6] D.B. Souza Jr., E.M. Kakuno e J.W.B. Araújo, *Um experimento para determinação da velocidade do som em barras metálicas*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa, Bagé (2019).
- [7] R. Hessel, A.A. Freschi, E.C. Rosado e L.A. Barreiro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, e2309 (2016).
- [8] <http://www.matweb.com/>, acessado em 13/04/2020.