REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS LONGITUDINAIS NO ALUMÍNIO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS TEÓRICOS E MEDIÇÃO EXPERIMENTAL

PROPAGATION VELOCITY OF LONGITUDINAL ULTRASONIC WAVES IN ALUMINUM: A COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THEORETICAL MODELS AND EXPERIMENTAL MEASUREMENT

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS LONGITUDINALES EN EL ALUMINIO: UN ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MODELOS TEÓRICOS Y MEDICIÓN EXPERIMENTAL

Ana Caroline Nery Munoz Carvalho
Mestrado em Modelagem Computacional e Sistemas
Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
E-mail: carolinenmunoz@gmail.com

Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
E-mail: alvaro.junior@unimontes.br

Maurílio José Inácio
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
E-mail: maurilio.inacio@unimontes.br

Adalto Soares da Fonseca Júnior
Mestrado em Modelagem Computacional e Sistemas
Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
E-mail: adalto.junior@unimontes.br

Sandy Caroline Soares Gomes
Mestranda em Modelagem Computacional e Sistemas
Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
E-mail: sandycarol2406@gmail.com

Hivana Prates Duarte
Mestranda em Modelagem Computacional e Sistemas
Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
E-mail: arquihivanaprates@gmail.com

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre três métodos de determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais em um tarugo de alumínio. O primeiro método utilizou uma formulação que relaciona a raiz quadrada da razão entre o módulo de elasticidade e a densidade do material, válida para a propagação de ondas extensionais em barras finas e livres para se deformar lateralmente, comumente apresentada em livros didáticos de física geral. O segundo método incorporou o coeficiente de Poisson à formulação teórica, representando a velocidade longitudinal volumétrica em um sólido confinado lateralmente. O terceiro método consistiu na medição experimental direta, por meio de ensaio de ultrassom. Os resultados mostraram que o modelo de barra livre, que desconsidera o coeficiente de Poisson, apresentou uma diferença de 19% em relação ao valor de referência relatado na literatura, enquanto o modelo de meio confinado e a medição experimental apresentaram diferenças inferiores a 2%. A mesma tendência foi observada na estimativa do módulo de elasticidade dinâmico e da impedância acústica do alumínio, grandezas derivadas das velocidades ultrassônicas obtidas. Os resultados evidenciam que a formulação de barra livre, apesar de sua ampla utilização didática, é adequada apenas quando as dimensões da amostra são pequenas em relação ao comprimento de onda ultrassônico, não sendo representativa das condições do ensaio realizado neste estudo. O estudo reforça a importância de discutir, em aulas de laboratório, os limites de validade das equações teóricas com apoio de dados experimentais, contribuindo para uma compreensão mais crítica dos estudantes sobre a caracterização de propriedades elásticas dos materiais sólidos por métodos ultrassônicos.

Palavras-chave: Velocidade de Onda Ultrassônica; Constantes Elásticas; Ligas de Alumínio; Ensaios Não Destrutivos; Ensino de Física Experimental.

Abstract

This study presents a comparative analysis of three methods for determining the propagation velocity of longitudinal ultrasonic waves in aluminum. The first method used a formulation relating the square root of the ratio between the elastic modulus and the material's density, valid for extensional wave propagation in thin bars free to deform laterally, commonly presented in general physics textbooks. The second method incorporated Poisson's ratio into the theoretical formulation, representing the bulk longitudinal velocity in a laterally confined solid. The third method consisted of direct experimental measurement using an ultrasonic test. The results showed that the free-bar model, which disregards Poisson's ratio, presented a difference of 19% compared to the reference value reported in the literature, while the confined-medium model and the experimental measurement showed differences below 2%. The same trend was observed in the estimation of the dynamic elastic modulus and acoustic impedance of aluminum; quantities derived from the ultrasonic velocities obtained. These results demonstrate that the free-bar formulation, despite its widespread educational use, is only suitable when the sample dimensions are small relative to the ultrasonic wavelength, and was not

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

representative of the conditions of the test performed in this study. This study reinforces the importance of discussing, in laboratory classes, the validity limits of theoretical equations supported by experimental data, contributing to a more critical understanding among students regarding the characterization of elastic properties of solid materials through ultrasonic methods.
Keywords: Ultrasonic Wave Velocity; Elastic Constants; Aluminum Alloys; Nondestructive Testing; Physics Laboratory Education.

Resumen

Este trabajo presenta un análisis comparativo entre tres métodos para determinar la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas longitudinales en un tarugo de aluminio. El primer método utilizó una formulación que relaciona la raíz cuadrada de la razón entre el módulo de elasticidad y la densidad del material, válida para la propagación de ondas extensionales en barras delgadas y libres para deformarse lateralmente, comúnmente presentada en libros de texto de física general. El segundo método incorporó el coeficiente de Poisson a la formulación teórica, representando la velocidad longitudinal volumétrica en un sólido confinado lateralmente. El tercer método consistió en la medición experimental directa, mediante ensayo de ultrasonido. Los resultados mostraron que el modelo de barra libre, que no considera el coeficiente de Poisson, presentó una diferencia de aproximadamente el 19% con relación al valor de referencia reportado en la literatura, mientras que el modelo de medio confinado y la medición experimental presentaron diferencias inferiores al 2%. La misma tendencia se observó en la estimación del módulo de elasticidad dinámico y la impedancia acústica del aluminio, magnitudes derivadas de las velocidades ultrasónicas obtenidas. Estos resultados evidencian que la formulación de barra libre, a pesar de su amplio uso didáctico, es adecuada solo cuando las dimensiones de la muestra son pequeñas en relación con la longitud de onda ultrasónica, no siendo representativa de las condiciones del ensayo realizado en este estudio. El estudio refuerza la importancia de discutir, en clases de laboratorio, los límites de validez de las ecuaciones teóricas con apoyo de datos experimentales, contribuyendo a una comprensión más crítica de los estudiantes sobre la caracterización de propiedades elásticas de materiales sólidos mediante métodos ultrasónicos.
Palabras clave: Velocidad de Onda Ultrasónica; Constantes Elásticas; Aleaciones de Aluminio; Ensayos No Destructivos; Enseñanza de Física en Laboratorio.

1. Introdução

Na física clássica, a propagação de ondas mecânicas em um meio sólido ocorre pela transmissão de vibrações entre as partículas que constituem esse sólido, sem que haja transporte líquido de matéria. Cada partícula oscila em torno

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

de sua posição de equilíbrio, transferindo energia às partículas vizinhas. Nesse caso, a direção da oscilação das partículas em relação à direção de propagação da onda define seu tipo.

Quando a vibração ocorre de forma paralela à direção de propagação, a onda é chamada de longitudinal. As ondas sonoras são o exemplo mais comum desse tipo de onda. Por outro lado, quando a vibração ocorre de forma perpendicular à direção de propagação, a onda é chamada de transversal. Diferentemente das ondas longitudinais, que se propagam em sólidos, líquidos e gases, as ondas transversais só se propagam em meios sólidos, uma vez que dependem da existência de forças de cisalhamento entre as partículas (KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER, 1990; YOUNG; FREEDMAN, 2015).

Além das ondas longitudinal e transversal, existem outras formas de propagação, como as ondas superficiais de Lamb, Love e Rayleigh (KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER, 1990). Entretanto, são as ondas do tipo longitudinal e transversal que mais se destacam por se relacionarem diretamente com propriedades elásticas dos materiais sólidos, sendo por isso amplamente utilizadas em estudos de ciência e engenharia dos materiais (MEYERS; CHAWLA, 2008; ASTM E494-20, 2025).

A velocidade de propagação da onda sonora é fortemente dependente da elasticidade e da inércia do material analisado, uma vez que a elasticidade favorece o surgimento de forças restauradoras, enquanto a inércia determina como o material responderá a essas forças (YOUNG; FREEDMAN, 2015; JEWETT JR.; SERWAY, 2017).

Alguns autores descrevem a velocidade das ondas sonoras em materiais sólidos como a raiz quadrada da razão entre o módulo de elasticidade e a densidade (TIPLER; LLEWELLYN, 2014; YOUNG; FREEDMAN, 2015; JEWETT JR.; SERWAY, 2017). Essa formulação corresponde à propagação de ondas extensionais em barras finas, livres para se deformar lateralmente enquanto a onda se propaga, condição em que o efeito do coeficiente de Poisson sobre a velocidade é desprezível. Entretanto, em meios sólidos com dimensões laterais suficientes para restringir essa deformação, a restrição lateral passa a influenciar a velocidade

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

real de propagação, tornando necessário considerar o coeficiente de Poisson do material para descrever adequadamente a velocidade longitudinal volumétrica (KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER, 1990; SANTIN, 2003).

Por utilizar um número menor de parâmetros e por não exigir o conhecimento prévio do coeficiente de Poisson, a formulação de barra livre costuma aparecer nos livros didáticos utilizados nas disciplinas introdutórias de física geral. Isso significa que grande parte dos estudantes tem contato exclusivamente com essa versão da equação, sem uma discussão explícita sobre as condições em que ela é válida ou sobre os limites de sua aplicação.

Do ponto de vista pedagógico, esse recorte é problemático. Ao apresentar a velocidade do som em sólidos apenas como raiz quadrada do módulo de elasticidade sobre a densidade, sem mencionar a hipótese subjacente de barra fina e livre deformação lateral, corre-se o risco de transmitir a falsa impressão de que essa expressão matemática é universal, válida para qualquer geometria e qualquer material sólido. Ressalta-se ainda que a limitação dessa formulação, quando aplicada fora de sua condição de validade, não decorre de um erro matemático em relação a uma expressão mais "correta", mas do uso de um modelo físico, válido para barras finas e livres, em uma condição de contorno diferente daquela para a qual ele foi formulado.

Discutir os limites de validade dessa formulação em aulas de laboratório, com dados experimentais concretos, pode contribuir para uma compreensão mais crítica e menos mecânica das equações da física, aproximando os acadêmicos da prática real de caracterização de materiais. Assim, alguns estudos reforçam a importância de métodos ultrassônicos mais robustos para a caracterização de constantes elásticas, ainda que abordando o problema por caminhos distintos.

Por exemplo, Tumsys e Mazeika (2023) propuseram um método ultrassônico baseado nas velocidades de fase dos modos fundamentais de ondas de Lamb para determinar simultaneamente o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson em placas isotrópicas de alumínio e de aço, obtendo erros relativos inferiores a 0,5% e 2%, respectivamente.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

Farahmand, Soorgee e Monazzah (2021) utilizaram a técnica ultrassônica de pulso-eco, a partir das velocidades longitudinal e transversal, para estimar as propriedades elásticas de materiais à base de alumínio, validando o método como ferramenta não destrutiva confiável. Mais tarde, Demir, Atas e Oral (2025) aplicaram a mesma técnica de pulso-eco em uma liga de alumínio, mostrando que pequenas variações na composição e na estrutura do material provocam alterações mensuráveis nas velocidades ultrassônicas e, consequentemente, nas propriedades elásticas calculadas.

Os estudos relatados acima confirmam que a velocidade longitudinal é sensível às constantes elásticas dos materiais sólidos e que sua determinação precisa depende do coeficiente de Poisson, e não apenas do módulo de elasticidade e da densidade, como ocorre na formulação de barra livre mais difundida nos livros de física clássica. Apesar disso, poucos estudos comparam diretamente, para um mesmo material, o impacto de desconsiderar o coeficiente de Poisson nas equações teóricas frente a uma medição experimental direta da velocidade longitudinal.

Com base nos aspectos abordados, este estudo teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre diferentes métodos de determinação da velocidade ultrassônica longitudinal propagada no alumínio, identificando as divergências entre os métodos e suas implicações tanto para a caracterização não destrutiva das propriedades elásticas desse material quanto para o ensino de física, ao evidenciar, com dados experimentais, os limites de validade da formulação de barra livre tradicionalmente apresentada em sala de aula, cuja adequação depende das condições geométricas e de contorno da amostra, e não de uma hierarquia entre uma equação simplificada e uma equação correta.

2. Metodologia

Para a realização deste estudo foi utilizado um tarugo de liga de alumínio 6061 (têmpera não especificada pelo fornecedor), adquirido comercialmente, com massa de aproximadamente 0,102 kg, aferida em balança digital com resolução de 1 g. As

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

dimensões do tarugo, aferidas com paquímetro digital de resolução 0,01 mm, foram de 40 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. Logo, o volume cilíndrico do tarugo foi de aproximadamente $3{,}770\times10^{-5}$ m³. A partir da razão entre massa e volume, a densidade do tarugo foi estimada em ρ = 2706 ± 13 kg/m³. Este valor é procedente da incerteza combinada (0,49%), obtida pela soma em quadratura das incertezas-padrão associadas à resolução dos instrumentos (metade da menor divisão: 0,5 g para a balança e 0,005 mm para o paquímetro digital), sendo a contribuição da massa (0,49%) muito superior à das dimensões lineares (0,03%), o que justifica a densidade calculada como dominada pela incerteza de pesagem.

Neste estudo, três métodos foram utilizados para determinar a velocidade de propagação da onda longitudinal (V_L) através do tarugo. No primeiro método, V_L foi calculado com a Equação 1, que relaciona a raiz quadrada da razão entre o módulo de elasticidade (E) e a densidade (ρ) do material (JEWETT JR.; SERWAY, 2017). Essa expressão corresponde à velocidade de propagação de uma onda extensional em uma barra, condição em que a deformação lateral do material não é restringida.

No segundo método, o valor de V_L foi calculado por meio da Equação 2, que utiliza na expressão matemática, além dos valores do módulo E e densidade ρ, o coeficiente de Poisson (v) do material investigado (SANTIN, 2003). Essa formulação representa a velocidade longitudinal volumétrica em um sólido isotrópico, na qual a restrição à deformação lateral é incorporada ao modelo. Assim, as Equações 1 e 2 não representam uma versão simplificada e uma versão exata de um mesmo fenômeno, mas sim dois modelos associados a condições físicas distintas de propagação de ondas.

No terceiro método, o valor de V_L foi determinado experimentalmente por meio do ensaio de ultrassom, utilizando a Equação 3. Essa equação consiste na razão entre o comprimento do tarugo (C) e o tempo de propagação da onda ultrassônica longitudinal através dele (t) (KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER, 1990). As expressões matemáticas utilizadas para o cálculo da velocidade longitudinal estão apresentadas na Tabela 1.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

Tabela 1 – Expressões matemáticas para o cálculo da velocidade longitudinal

Expressão	Equação	Referência
$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	(1)	JEWETT JR.; SERWAY (2017)
$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{(1-v)}{(1+v)(1-2v)}}$	(2)	SANTIN (2003)
$V_L = \frac{C}{t}$	(3)	KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER (1990)

Fonte: autores (2026)

Nas Equações 1 e 2 são adotados os seguintes valores de referência para o alumínio (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012): E = 70×10^9 N/m² e v = 0,33. Para calcular o valor de V_L com a Equação 3, foi medido o tempo de propagação com um sistema eletrônico emissor e detector de ultrassom. No ensaio, dois transdutores piezoelétricos foram posicionados nas faces opostas do tarugo de alumínio, utilizando mel de abelha como acoplante, caracterizando assim um método de ensaio de ultrassom por transmissão direta (AYDIN, 2013; GINZEL; TURNBULL, 2016). Neste método, um dos transdutores é responsável por gerar e o outro por receber pulsos de ondas ultrassônicas longitudinais que atravessaram o tarugo ao longo do comprimento.

A camada de acoplante foi utilizada para assegurar o contato acústico entre os transdutores e as extremidades do tarugo. Reconhece-se que o acoplante possui velocidade de propagação finita e, portanto, sua presença pode contribuir para o tempo de percurso medido. Entretanto, a espessura da camada de acoplante não foi determinada experimentalmente, uma vez que esta foi aplicada manualmente e mantida tão fina quanto possível.

Os transdutores emissor e receptor utilizados neste estudo são de baixo custo e o fabricante não fornece dados com informações que permitam determinar seu atraso característico. Essa característica foi, portanto, estimada por comparação com transdutores semelhantes de outros fabricantes, admitindo-se que o atraso associado aos transdutores utilizados é desprezível frente ao tempo total de percurso da onda ultrassônica. Além disso, por ser praticamente constante ao longo das

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

medições, esse atraso introduz apenas um erro sistemático fixo, que não afeta significativamente a análise das variações do tempo de propagação entre as repetições de medida.

O método de medição do tempo de percurso utilizado neste estudo foi baseado na observação simultânea, por meio de um osciloscópio digital, do pulso gerado pelo transdutor emissor e do pulso detectado pelo transdutor receptor. Para isso, a ponta de prova do canal 1 foi conectada diretamente à saída do circuito emissor, enquanto a ponta de prova do canal 2 foi conectada à saída do circuito receptor, de modo que eventuais atrasos introduzidos pelos circuitos eletrônicos de emissão e recepção são desconsiderados, por apresentarem contribuição considerada desprezível para a medição do tempo de percurso.

O tempo de propagação da onda ultrassônica foi determinado diretamente a partir dos sinais registrados no osciloscópio digital. Foram realizadas três medições independentes, com retirada e reposicionamento dos transdutores entre cada repetição. Embora a contribuição individual da camada de acoplante não possa ser determinada diretamente devido à impossibilidade de medir sua espessura durante o ensaio, reconhece-se que ela constitui uma fonte potencial de incerteza na determinação do tempo, de modo que o tempo de percurso deve ser interpretado como o valor experimentalmente determinado pelo sistema, não sendo atribuído exclusivamente à propagação no alumínio.

Em equipamentos industriais de ultrassom, é comum a realização de procedimentos de calibração destinados a compensar atrasos inerentes ao sistema e aumentar a exatidão absoluta das medições (CORREIA, 2008). Entretanto, neste estudo, tais procedimentos não foram realizados, uma vez que o objetivo principal consistiu na determinação do tempo de percurso da onda ultrassônica por meio da observação direta dos sinais de emissão e recepção. Cabe ressaltar, contudo, que, antes da realização das medições, as pontas de prova e os canais do osciloscópio foram ajustados e calibrados de acordo com as recomendações do fabricante, a fim de assegurar a observação dos sinais. Não foi utilizado corpo de prova de referência com velocidade ultrassônica previamente conhecida para calibração do sistema, uma vez que a abordagem adotada foi baseada na observação direta dos instantes

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

de emissão e recepção do sinal, e não em um procedimento de calibração comparativa.

Assim como a calibração, o ajuste do tempo zero (*Zero Offset*) é um procedimento realizado em equipamentos industriais de ultrassom destinados à obtenção de medições diretas absolutas de elevada exatidão (CORREIA, 2008). Este procedimento não foi considerado necessário para esse estudo, uma vez que a técnica utilizada permitiu a observação direta do instante de emissão e do instante de recepção dos sinais, possibilitando a determinação do tempo de percurso a partir da diferença temporal entre esses eventos.

Além disso, como os transdutores e as condições de medição foram mantidos inalterados durante todos os ensaios, os atrasos associados ao tempo zero permaneceram essencialmente constantes, restringindo sua influência à introdução de um deslocamento temporal fixo nos resultados, sem afetar significativamente a avaliação das variações relativas do tempo de propagação, que constituem o foco principal deste estudo.

Os circuitos emissor e receptor foram alimentados com fontes simétricas, da marca Minipa, com tensão de 30 V e 12 V, respectivamente. O circuito emissor produziu pulsos com amplitude de 60 V e duração de 400 ns, em intervalos de tempo de 5 ms. Estes pulsos foram produzidos com um transdutor piezoelétrico de ondas longitudinais, modelo AW1905, com 2 cm de diâmetro e frequência igual a 2 MHz. Outro transdutor do mesmo modelo foi utilizado para captar o sinal pulsado no circuito receptor. Na Figura 1 estão apresentados os circuitos eletrônicos emissor e receptor utilizados para propagar as ondas ultrassônicas longitudinais.

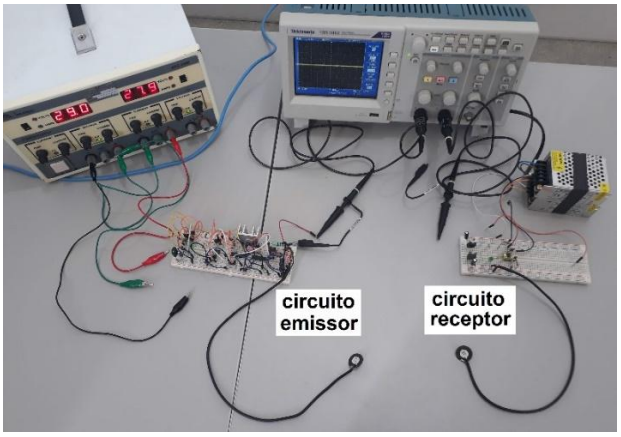
O sinal captado pelo transdutor receptor foi fornecido na saída do circuito para medição com um osciloscópio como instrumento externo. As medidas dos sinais foram feitas com um osciloscópio digital da marca Tektronix, modelo TBS1062. O osciloscópio foi conectado a um computador para exportação dos dados, por meio do *software* OpenChoice Desktop, que auxilia na determinação da diferença entre o tempo da onda ultrassônica emitida e recebida através do tarugo de alumínio.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

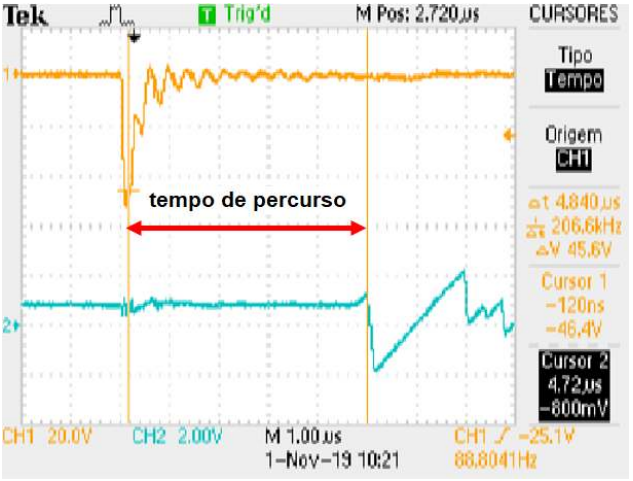
Figura 1 - Circuitos eletrônicos emissor e receptor de ondas ultrassônicas



Fonte: autores (2026)

Utilizando os cursores de tempo do osciloscópio digital, o tempo de percurso foi determinado posicionando-se o Cursor 1 no instante correspondente ao final do pulso de excitação, registrado pela linha amarela no canal 1 (sinal emitido), e o Cursor 2 no instante correspondente ao início do trem de pulsos do sinal recebido, registrado no canal 2 pela linha azul, conforme ilustrado na Figura 2. Portanto, a Figura 2 representa a determinação do tempo de percurso da onda ultrassônica para uma das repetições realizadas.

Figura 2 – Determinação do tempo de percurso da onda ultrassônica



Fonte: autores (2026)

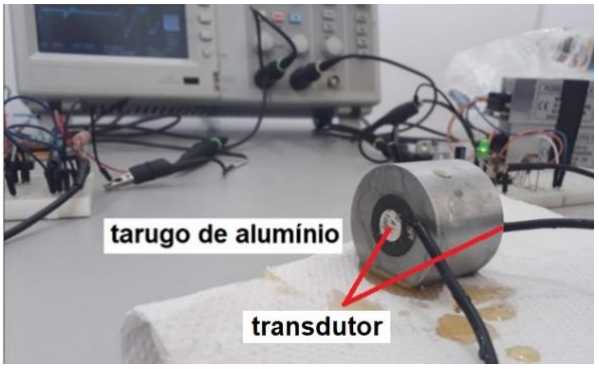
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

Uma imagem ilustrativa dos transdutores piezelétricos posicionados nas extremidades do tarugo de alumínio, com o acoplante aplicado entre as superfícies de contato, está apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Imagem ilustrativa das medidas ultrassônicas



Fonte: autores (2026)

A medida do tempo de percurso da onda longitudinal foi avaliada três vezes consecutivas com a remoção e o reposicionamento dos transdutores. Assim, com o tempo médio de percurso e o comprimento do tarugo, o valor médio de V_L foi calculado com a Equação 3. A velocidade da onda ultrassônica transversal (V_T) foi estimada por meio das relações existentes entre V_T e V_L para o alumínio e suas ligas, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Velocidades ultrassônicas para o alumínio e suas ligas

V_L (*m/s*)	V_T (*m/s*)	V_T / V_L	Referência
6375	3150	0,494	GINZEL; TURNBULL (2016)
6320	3130	0,495	KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER (1990)
6300	3130	0,497	ASTM E494-20 (2025)
Média ± Desvio Padrão		0,495 ± 0,002	

Fonte: autores (2026)

A estimativa do valor de V_T a partir de V_L também foi um artifício matemático utilizado por Waag, Hoff e Norli (2012). Esses autores investigaram com o método da transmissão direta as velocidades ultrassônicas longitudinal e transversal

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

propagadas em chapas de aço inox com diferentes espessuras. Portanto, no presente estudo o valor médio de V_T foi calculado utilizando a Equação 4, sendo tratado, ao longo deste estudo, como uma grandeza estimada indiretamente, e não como resultado de medição experimental direta.

$$V_T = 0{,}495\, V_L \tag{4}$$

Por fim, para verificar a influência dos valores encontrados de V_L e V_T na determinação do módulo E e da impedância acústica (Z) do alumínio, foram utilizadas as Equações 5 e 6, respectivamente (ASTM-E494-20, 2025).

$$E = \frac{\rho {V_T}^2 (3V_L^2 - 4V_T^2)}{(V_L^2 - V_T^2)} \tag{5}$$

$$Z = \rho V_L \tag{6}$$

Os resultados encontrados foram comparados com os valores de referência relatados na literatura para o módulo de elasticidade e impedância acústica do alumínio e suas ligas.

3. Resultados e Discussão

A densidade calculada para o tarugo de alumínio foi de aproximadamente 2706 ± 13 kg/m³, estando de acordo com o valor de referência de 2700 kg/m³, encontrado na literatura para o alumínio e suas ligas (CHEN, 2009; CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012). Conforme comentado anteriormente, o valor de referência adotado para o módulo E do alumínio é de $70{\times}10^9$ N/m^2 (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012). Autores como Tipler e Llewellyn (2014), Young e Freedman (2015) e Jewett Jr. e Serway (2017), utilizam a Equação 1 para a determinação de V_L em barras finas, livres de deformação lateral enquanto a onda se propaga. Nesta

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

condição, a influência do coeficiente v sobre V_L é desprezível. Logo, utilizando esse primeiro procedimento obteve-se o seguinte resultado:

$Equação\ 1$:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{70x10^9 N/m^2}{2706\ kg/m^3}} = \sqrt{\frac{70x10^9 kg.m/s^2/m^2}{2706\ kg/m^3}} = 5086\ m/s$$

Considerando na Equação 2 o valor adotado de v = 0,33 para o alumínio, nota-se uma divergência entre os resultados calculados. Assim, admitindo a influência do coeficiente v no cálculo de V_L encontra-se o seguinte resultado:

$Equação\ 2$:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{(1-v)}{(1+v)(1-2v)}} = \sqrt{\frac{70x10^9 kg.m/s^2/m^2}{2706\ kg/m^3}\frac{(1-0{,}33)}{(1+0{,}33)(1-2x0{,}33)}} = 6191\ m/s$$

Comparando os resultados obtidos com as Equações 1 e 2, verifica-se um aumento de aproximadamente 22% no valor de V_L, que passou de 5086 m/s para 6191 m/s. Essa divergência não representa um erro calculado, mas sim uma consequência direta das diferentes condições assumidas em cada expressão teórica. A Equação 1 corresponde à velocidade de propagação de uma onda extensional em uma barra fina, onde as superfícies laterais da amostra estão livres para se deformar (estado de tensão uniaxial). Nessa condição, o coeficiente v não influencia significativamente a velocidade de propagação, uma vez que a expansão ou contração transversal do material ocorre sem restrição.

Por outro lado, a Equação 2 descreve a velocidade longitudinal volumétrica em um sólido isotrópico, condição em que o material adjacente restringe a deformação lateral do elemento percorrido pela onda (estado de deformação confinada). Essa restrição lateral, imposta pelo coeficiente v, aumenta a rigidez efetiva do meio frente à propagação da onda, resultando em uma maior velocidade

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

de propagação (TIPLER; LLEWELLYN, 2014, YOUNG; FREEDMAN, 2015; JEWETT JR; SERWAY, 2017).

Assim, a escolha da expressão teórica adequada não deve ser entendida como a substituição de uma equação simplificada por uma equação correta, mas como a seleção do modelo físico compatível com a geometria e as condições de contorno da amostra ensaiada. Isso é particularmente relevante em ensaios ultrassônicos de caracterização de materiais, nos quais o procedimento usual é inverso ao adotado neste trabalho, ou seja, determina-se experimentalmente o valor de V_L e, a partir desse valor, calcula-se o módulo E do material.

Ressalta-se ainda que a aplicação da Equação 1 (condição de barra livre) a uma amostra cujo comportamento se aproxima de um meio confinado, ou vice-versa, resulta em um valor de módulo E incorretamente estimado, uma vez que o fator de correção associado ao coeficiente v não corresponde à condição real de propagação da onda no material. Como demonstrado pelos resultados calculados, a escolha inadequada da equação pode gerar divergências superiores a 20% no valor de V_L e, consequentemente, erros ainda mais expressivos na estimativa do módulo E.

A predominância do comportamento volumétrico observado experimentalmente pode ser justificada com base na relação entre o comprimento de onda ultrassônico e as dimensões da amostra (tarugo). Considerando a frequência do transdutor piezoelétrico utilizado (f = 2 MHz) e a velocidade longitudinal calculada (V_L ≈ 6198 m/s), o comprimento de onda (λ) correspondente é de aproximadamente 3,1 mm. Como o tarugo possui 40 mm de diâmetro, a dimensão lateral corresponde a aproximadamente 13 comprimentos de onda (40/3,1 ≈ 13λ).

Quando as dimensões laterais do meio são muito superiores ao comprimento de onda, o efeito das bordas livres da amostra sobre a propagação da onda longitudinal torna-se desprezível, e o meio se comporta de forma semelhante a um meio infinito, condição na qual a Equação 2 é aplicável. Esse critério geométrico-dimensional oferece uma justificativa física mais rigorosa para a maior proximidade dos resultados experimentais com o modelo de meio confinado (Equação 2), em comparação com a hipótese de barra fina e livre (Equação 1), adequada apenas quando as dimensões laterais são pequenas frente ao comprimento de onda.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

No ensaio de ultrassom, o tempo médio de propagação da onda longitudinal medido através do tarugo foi de t = (4,84 ± 0,04)×10^{-6} s. Como o tarugo possui um comprimento aproximado de C = 0,03 m, o valor de V_L obtido na Equação 3 foi de:

$Equação\ 3$:

$$V_L = \frac{C}{t} = \frac{0{,}03\ m}{4{,}84x10^{-6}s} \approx 6198\ m/s$$

É importante destacar que durante a realização do ensaio ultrassônico os transdutores foram removidos e reposicionados três vezes para verificar a repetibilidade das medidas, conforme apresentado na Tabela 3. Os resultados obtidos com os três métodos e a diferença encontrada em relação ao valor de referência para a velocidade longitudinal estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 3 – Tempos de percurso e valores calculados de V_L

Repetição	Tempo de percurso (10^{-6} s)	V_L (m/s)
1	4,80	6250,00
2	4,88	6147,50
3	4,84	6198,30
Média ± Desvio padrão	4,84 ± 0,04	6198,60 ± 51,20

Fonte: autores (2026)

Tabela 4 – Resultados calculados de V_L e a diferença em relação ao valor de referência

Equação	V_L (m/s)	Valor de referência	Diferença (%)	Referência
1	5086	6300 m/s	19,27	ASTM-E494-20 (2025)
2	6191		1,73	
3	6198 ± 51		1,62	

Fonte: autores (2026)

De acordo com a norma ASTM E494-20 (2025), o valor de V_L medido no alumínio com instrumentos industriais de ultrassom é de 6300 m/s. Cabe ressaltar que esse valor é obtido pela norma por meio do método comparativo pulso-eco, com material de referência de velocidade conhecida, enquanto o presente estudo utilizou o método de transmissão direta com dois transdutores. A comparação feita é,

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

portanto, com o valor de referência da literatura, e não uma verificação de conformidade normativa direta com o método empregado. Isto indica que a estimativa de V_L = 5086 m/s, realizada com a Equação 1, está muito distante do valor de referência, apresentando uma diferença de 1214 m/s, correspondente a 19,27%. Entretanto, a diferença diminui consideravelmente quando a estimativa do valor de V_L considera a influência do coeficiente v, como mostrado na Equação 2. Neste caso, o valor calculado de V_L = 6191 m/s representa apenas uma diferença de 1,73% em relação ao valor de referência relatado na literatura.

O resultado obtido com a Equação 2 também está próximo daquele observado com o ensaio por ultrassom e utilização da Equação 3. Neste caso, o valor médio calculado de V_L foi 6198 m/s ± 51 m/s, correspondendo a uma diferença em torno de 1,62% em relação ao valor de referência.

Considerando a Equação 4 para a estimativa do valor de V_T a partir de V_L, é possível observar os seguintes resultados na Tabela 5. Ressalta-se que os valores de V_T apresentados correspondem a uma estimativa indireta, obtida a partir de V_L, e da razão V_T/V_L, adotada da literatura, e não a uma medição experimental direta dessa grandeza. De maneira semelhante ao constatado nos resultados de V_L, o valor estimado de V_T também apresentou uma menor diferença em relação ao valor de referência quando utilizado o método ultrassônico proposto pela Equação 3.

Tabela 5 – Resultados calculados de V_T e a diferença em relação ao valor de referência

Equação	V_L (m/s)	V_T (m/s)	Valor de referência	Diferença (%)	Referência
1	5086	2518	3130 m/s	19,55	ASTM-E494-20 (2025)
2	6191	3065		2,09	
3	6198 ± 51	3068 ± 25		1,98	

Fonte: autores (2026)

Para verificar a influência do resultado de V_L na determinação do módulo de elasticidade e impedância acústica do alumínio, foram utilizadas como forma de análise as Equações 5 e 6, respectivamente. Nos materiais com tendências isotrópicas como aço, alumínio e vidro, os valores do módulo E e da impedância Z

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

podem ser descritos em função de função de V_L, V_T e ρ (MEYERS; CHAWLA, 2008; ASTM-E494-20; 2025).

Cabe destacar, no entanto, que o módulo E e a impedância Z calculados neste estudo não constituem validações experimentais independentes de V_L. Isso porque Z depende diretamente de V_L (Equação 6), enquanto E depende tanto de V_L quanto de V_T, sendo este último estimado, e não medido, a partir de V_L. Assim, a proximidade entre os valores calculados e os de referência deve ser interpretada como consistência do conjunto de relações adotado da literatura, e não como uma confirmação experimental independente de cada grandeza.

Para a impedância acústica Z do alumínio, Krautkramer e Krautkramer (1990) relatam um valor de 17×10⁶ kg/m².s. Portanto, uma forma de avaliar os resultados obtidos com as Equações 1, 2 e 3 consiste na aplicação do método inverso, ou seja, aplicar os resultados calculados de V_L e V_T estimados nas Equações 5 e 6, com o intuito de verificar a proximidade dos resultados com os respectivos valores de referência para o módulo E e da impedância Z. Os resultados deste procedimento estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores calculados do módulo de elasticidade e impedância acústica

Equação	V_L (m/s)	V_T (m/s)	ρ (kg/m^3)	E (10^9 N/m^2)	Z (10^6 kg/m^2.s)
1	5086	2518		45,90	13,76
2	6191	3065	2706 ± 13	67,99	16,75
3	6198 ± 51	3068 ± 25		68,10 ± 1,47	16,77 ± 0,16
Valor de Referência				70,00	17,00

Fonte: autores (2026)

A partir de V_L calculado com a Equação 1, nota-se que o resultado para o módulo E foi de 45,9×10⁹ N/m². Isto representa uma diferença de 34,43% em relação ao valor de referência (E = 70×10⁹ N/m²). Cabe observar que o valor de referência adotado corresponde ao módulo de elasticidade estático, tabelado, enquanto o módulo obtido por ondas ultrassônicas corresponde a uma constante elástica dinâmica. Embora ambos sejam comumente comparados na literatura por apresentarem valores próximos para metais como o alumínio, tratam-se de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

grandezas conceitualmente distintas. Para a impedância Z, o resultado calculado foi de 13,76×10⁶ kg/m².s, representando uma diferença de 19,06% em relação ao valor de referência Z = 17×10⁶ kg/m².s.

Utilizando o resultado de V_L obtido com a Equação 2, percebe-se que a diferença entre os valores calculados para o módulo E = 67,99×10⁹ N/m² e impedância Z = 16,75×10⁶ kg/m².s diminui de forma significativa em relação aos valores de referência relatados na literatura, passando a 2,87% e 1,45%, respectivamente. Por fim, com o uso da Equação 3 no ensaio por ultrassom, foram calculados os resultados de E = 68,10×10⁹ N/m² e impedância Z = 16,77×10⁶ kg/m².s. Neste caso, a diferença em relação aos valores de referência foi de 2,71% para o módulo E e de apenas 1,35% para a impedância Z.

Segundo Ginzel e Turnbull (2016), o módulo E calculado com ondas ultrassônicas para a alumínio e suas ligas pode variar entre 62 e 68×10⁹ N/m². Para a liga de alumínio 6061 especificamente, esses autores relatam o valor de Z = 16,76×10⁶ kg/m².s. Os resultados calculados no presente estudo, por meio do ensaio ultrassônico com a Equação 3, mostraram-se consistentes com esses valores de referência. Ressalta-se, entretanto, que essa consistência reflete o conjunto de relações V_T / V_L e equações de E e Z adotadas da literatura, uma vez que V_T não foi medido de forma independente. Portanto, os resultados do presente estudo são interpretados como evidência da viabilidade do método ultrassônico utilizado para a determinação de V_L, mais do que como uma validação experimental plenamente independente das propriedades elásticas derivadas.

4. Conclusão

Os resultados deste estudo indicam a importância de esclarecer aos acadêmicos e pesquisadores da área de física e resistência dos materiais os diferentes métodos para a estimativa do valor das ondas longitudinais, bem como suas finalidades e consequências para a determinação das propriedades mecânicas que estejam descritas em função das velocidades de propagação de ondas sonoras e do valor da densidade.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

Por meio de uma análise comparativa entre os resultados, ficou evidente que a estimativa da velocidade longitudinal no alumínio com o módulo de elasticidade e a densidade pode fornecer uma ideia sobre sua ordem de grandeza, porém, com uma diferença percentual maior do que 19% em relação ao valor de referência relatado na literatura. Entretanto, considerando a influência do coeficiente de Poisson, a diferença percentual pode ser inferior a 2%. Este valor percentual também se aproxima do resultado encontrado com o experimento de ondas ultrassônicas realizado nesta pesquisa, cujo valor da velocidade da onda longitudinal apresentou maior proximidade com o valor de referência adotado por meio da razão entre o tempo de propagação da onda ultrassônica e o comprimento da amostra investigada.

Essa divergência entre os modelos teóricos não deve ser interpretada como um erro de uma formulação simplificada frente a uma formulação correta, mas como reflexo de duas condições físicas distintas de propagação, barra livre e meio confinado, cuja adequação depende da relação entre as dimensões da amostra e o comprimento de onda ultrassônico empregado.

Contudo, essa análise deve considerar as incertezas associadas ao tempo de percurso medido, às condições de acoplamento entre os transdutores e o corpo de prova, bem como o fato de que a velocidade transversal utilizada na estimativa das propriedades elásticas foi obtida indiretamente a partir de relações reportadas na literatura, e não por meio de medição experimental direta.

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico e da impedância acústica aqui apresentados devem ser interpretados como estimativas consistentes com o conjunto de relações adotado, e não como validações experimentais independentes dessas propriedades. Ainda assim, os resultados obtidos reforçam a relevância de se distinguir, tanto na pesquisa quanto no ensino de física, os diferentes modelos teóricos aplicáveis à propagação de ondas ultrassônicas em sólidos, evidenciando que a escolha da formulação adequada depende das condições geométricas e de contorno da amostra investigada.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

Referências

ASTM International. *ASTM E494-20: Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials by Comparative Pulse-Echo Method.* ASTM International, 2025.

Aydin, A. “Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique.” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 47, no. 1, 2013, pp. 255-259.

Callister Jr., William D., and David G. Rethwisch. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.* 9th ed., LTC, 2012.

Carvalho, A. C. N. M. *Estimativa das Propriedades Elásticas de Ligas Metálicas Não Ferrosas por Meio do Método Ultrassônico da Transparência.* 2020. Universidade Estadual de Montes Claros, Dissertação de Mestrado.

Chen, Y. J. "Relationship between Ultrasonic Characteristics and Relative Porosity in Al and Al-XSi Alloys." *Materials Transactions*, vol. 50, no. 9, 2009, pp. 2308-2313.

Correia, Carlos. "Ultrasonic Calibration Details." e-Journal of Nondestructive Testing, Oct. 2008.

Demir, H., et al. "Investigation of the Effects of Gamma Radiation and Y2O3 on the Elastic Properties of Al2024 Composites by Ultrasonic Method." *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 226, 2025, p. 112257.

Farahmand, S., et al. "Evaluating the Elastic Properties of Al2O3–Al FGMs by Longitudinal and Transverse Ultrasonic Bulk Waves Velocity Features." *Ceramics International*, 2021.

Ginzel, E., and B. Turnbull. "Determining Approximate Acoustic Properties of Materials." *e-Journal of Nondestructive Testing*, vol. 21, no. 12, 2016.

Jewett, John, and Raymond Serway. *Física para Cientistas e Engenheiros — Volume 2: Oscilações, Ondas e Termodinâmica.* 9th ed., vol. 2, Cengage Learning, 2017, pp. 159-170.

Krautkramer, Josef, and Herbert Krautkramer. *Ultrasonic Testing of Materials.* 4th ed., Springer-Verlag, 1990.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 18/08/2026 - **Accepted:** 20/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/cxt5ts96
Pages: 1-22

Meyers, Marc A., and Krishan K. Chawla. *Mechanical Behavior of Materials.* 2nd ed., Cambridge University Press, 2008.

Santin, L. S. *Ultrasson: Técnica e Aplicação.* Vol. 2, Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.

Tipler, Paul A., and Ralph A. Llewellyn. *Física Moderna.* 6th ed., LTC, 2014.

Tumsys, O., and L. Mazeika. "Determining the Elastic Constants of Isotropic Materials by Measuring the Phase Velocities of the A0 and S0 Modes of Lamb Waves." *Sensors*, vol. 23, no. 15, 2023, p. 6678.

Waag, G., et al. "Model for Thickness Measurements of Steel Plates Using Half-Wave Resonances." *Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2012.

Young, Hugh D., and Roger A. Freedman. *Física II, Sears e Zemansky: Termodinâmica e Ondas.* 14th ed., Pearson Education do Brasil, 2015.

CC BY