



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MONTES CLAROS

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - CCET

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas
(PPGMCS/UNIMONTES)

APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO TÉCNICO DE PESQUISA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA
ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE LIGAS
METÁLICAS COM O MÉTODO ULTRASSÔNICO DA
TRANSPARÊNCIA**

AUTORES:

Prof. Dr. Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior

Prof. Dr. Maurílio José Inácio

**Montes Claros - MG
2020**

Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior

Maurílio José Inácio

APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO TÉCNICO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA
ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE LIGAS
METÁLICAS COM O MÉTODO ULTRASSÔNICO DA
TRANSPARÊNCIA**

Relatório apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual de Montes Claros, como Produção Técnico-Científica.

RESUMO

Em determinadas aplicações industriais é importante medir as propriedades dos metais de forma rápida e com menor custo possível. Geralmente, as propriedades mecânicas das ligas metálicas são determinadas por ensaios destrutivos, demandando maior tempo e custo com a preparação de amostras que serão destruídas. Entre os ensaios não destrutivos o ensaio por ultrassom tem se apresentado como uma alternativa rápida e precisa para a investigação das propriedades elásticas das ligas metálicas. Nesse relatório técnico, será apresentada uma proposta de estimativa das propriedades elásticas de ligas metálicas por meio do método ultrassônico da transparência, usado com sucesso neste estudo para a investigação das ligas de alumínio, magnésio e aço. Os resultados encontrados foram analisados e comparados com àqueles relatados na literatura para as ligas investigadas, mostrando a viabilidade do método proposto.

palavras-chave: ensaios, ultrassom, metais, propriedades

ABSTRACT

In certain industrial applications, it is important to measure quickly and effectively cost the mechanical properties of metals. These measurements are usually performed by destructive testing, that take time and the sample is destroyed. Ultrasonic nondestructive testing is an alternative method that can be used for measuring the mechanical properties of metals with quickly and relative precisely. In this technical report, the transparence ultrasonic method is used for measuring the elastic properties of metal alloys of aluminum, magnesium and steel. The results obtained was compared with reference values published by literature attesting the viability of the proposed method.

keywords: test, ultrasonic, metals, properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Determinação das propriedades físicas da liga de alumínio 6061: (a) aferição da massa com balança digital, (b) medida do comprimento e (c) medida do diâmetro com auxílio de paquímetro.....	17
Figura 2 - Determinação das propriedades físicas da liga de magnésio AZ31: (a) aferição da massa com balança digital, (b) medida do comprimento e (c) medida do diâmetro com auxílio de paquímetro.....	17
Figura 3 - Determinação das propriedades físicas da liga de alumínio 6061: (a) aferição da massa com balança digital, (b) medida do comprimento e (c) medida do diâmetro com auxílio de paquímetro.....	18
Figura 4 - Circuitos eletrônicos para emissão e recepção das ondas ultrassônicas.....	19
Figura 5 - Esquema do circuito eletrônico para emissão de ondas ultrassônicas.....	20
Figura 6 - Esquema do circuito eletrônico para recepção de ondas ultrassônicas.....	20
Figura 7 - Equipamentos para medidas ultrassônicas: (a) montagem do sistema eletrônico e (b) detalhe da emissão e detecção da onda através da amostra.....	21
Figura 8 - Tempo de percurso da onda ultrassônica medido com osciloscópio.....	22
Figura 9 - Diagrama em blocos do sistema eletrônico desenvolvido.....	22
Figura 10 - Superfície polida das amostras de alumínio 6061, magnésio AZ31 e alumínio reciclado.....	25
Figura 11 - Uso de diferentes acoplantes: (a) vaselina para a liga de magnésio, (b) glicerina para o alumínio reciclado, (c) mel para o alumínio 6061 e (d) vaselina em pasta para o aço 1020.....	25
Figura 12 - Materiais acoplantes.....	26
Figura 13 - Valores médios das velocidades ultrassônicas para a liga de alumínio 6061 em função dos acoplantes: (a) velocidade longitudinal e (b) transversal.....	29
Figura 14 - Valores médios das velocidades ultrassônicas para a liga de magnésio AZ31 em função dos acoplantes: (a) velocidade longitudinal e (b) transversal.....	31
Figura 15 - Valores médios das velocidades ultrassônicas para a amostra de alumínio reciclado em função dos acoplantes: (a) velocidade longitudinal e (b) transversal.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas das amostras de ligas metálicas.....	18
Tabela 2 - Custo médio para sistemas de medidas ultrassônicas no setor industrial.....	23
Tabela 3 - Relações para estimativa da velocidade transversal.....	24
Tabela 4 - Características dos acoplantes utilizados nesse estudo.....	26
Tabela 5 - Valores das velocidades ultrassônicas para a liga de alumínio 6061.....	28
Tabela 6 - Valores das velocidades ultrassônicas para a liga de magnésio AZ31.....	30
Tabela 7 - Valores das velocidades ultrassônicas para a liga de aço 1020.....	32
Tabela 8 - Valores das velocidades ultrassônicas para o alumínio reciclado.....	32
Tabela 9 - Valores calculados de densidade e impedância acústica nas amostras (Z_I).....	34
Tabela 10 - Valores de energia acústica transmitida (T) e refletida (R) pelas amostras.....	35
Tabela 11 - Propriedades elásticas para as ligas não ferrosas.....	37

LISTA DE SÍMBOLOS

m = massa (kg)

V = volume (m^3)

ρ = densidade (kg/m^3)

d = diâmetro (mm)

c = comprimento (mm)

V = tensão (Volts)

t = tempo (ms)

ms = milissegundos

V_L = velocidade longitudinal

V_T = velocidade transversal

E = módulo de elasticidade

G = módulo cisalhamento

B = módulo de compressibilidade

ν = coeficiente de Poisson

A_o = fator de anisotropia

Z = impedância acústica

T = coeficiente de energia transmitida

R = coeficiente de energia refletida

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO PARA JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	13
1.1 Objetivos.....	15
2. TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS UTILIZADAS NA PESQUISA.....	16
2.1 Aquisição das amostras para testes.....	16
2.2 Medidas de densidade das amostras.....	16
2.3 Geração das ondas ultrassônicas.....	18
2.4 Comparação de custos com outros sistemas.....	22
2.5 Medidas das velocidades ultrassônicas.....	24
2.6 Materiais acoplantes.....	24
2.7 Estimativa das propriedades elásticas das ligas metálicas.....	27
3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS.....	28
3.1 Medidas das velocidades ultrassônicas na amostra de alumínio 6061.....	28
3.2 Velocidades ultrassônicas para a liga de magnésio AZ31.....	29
3.3 Velocidades ultrassônicas para a amostra de aço 1020.....	31
3.4 Velocidades ultrassônicas para a amostra de alumínio reciclado.....	32
3.5 Análise dos acoplantes utilizados.....	34
3.6 Propriedades elásticas das amostras.....	36
3.7 Desenvolvimento de programa de computador.....	38
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O RESULTADOS.....	38
AGRADECIMENTOS.....	39
REFERÊNCIAS.....	39

I. INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE O RELATÓRIO DE PESQUISA

a) Descrição da finalidade do projeto:

Esse projeto teve como finalidade desenvolver um sistema eletrônico para geração e detecção de ondas ultrassônicas utilizadas para caracterização de materiais metálicos.

b) Avanços tecnológicos/grau de novidade:

Produção com médio teor inovativo desenvolvido com a combinação de conhecimentos pré-estabelecidos

c) Procedência do projeto:

Esse projeto é resultado do trabalho realizado pelo Programa de Pós-Graduação (PPGMCS/Unimontes), por meio da parceria entre dois professores áreas distintas do conhecimento.

d) Docentes Autores:

Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior, Professor Permanente, (CPF: 986.656.004-00)

Maurílio José Inácio, Professor Permanente, (CPF: 769.519.286-49)

e) Conexão com a pesquisa:

- Projeto de pesquisa vinculado às dissertações de mestrado no PPGMCS:

Título - Caracterização e detecção de falhas em materiais metálicos por meio de ondas acústicas. (Início:2019). Ana Caroline Nery Munoz Carvalho;

Título - Construção de transdutores piezelétricos para caracterização não destrutiva de ligas metálicas. (Início: 2019). Mikaella Pricila Alves dias;

Título - Aplicação de ondas ultrassônicas para a caracterização das propriedades mecânicas de barras de aço CA-50. (Início: 2020). Maria Helena Teles Lopes.

- Linha de pesquisa vinculada às dissertações de mestrado no PPGMCS:

Título - Inteligência computacional aplicada no estudo de ondas mecânicas propagadas em diferentes tipos de madeira. (Início: 2019). Stéphanie Oliveira Nina Rocha.

e) Aplicabilidade da produção tecnológica:

- **Descrição da abrangência realizada:** o sistema eletrônico abrange aplicações em pequenas empresas metalúrgicas, bem como desperta o interesse da comunidade científica que trabalha na caracterização não destrutiva de materiais metálicos. Também é passível de uso por docentes dos cursos de engenharias Civil, Mecânica e de Produção.

- **Descrição da abrangência potencial:** o sistema eletrônico pode ser aprimorado para caracterização não destrutiva de materiais não metálicos, tais como polímeros e madeiras.

- **Descrição da replicabilidade:** o sistema eletrônico pode ser facilmente reproduzido para o uso na pesquisa ou em pequenas empresas do ramo metalúrgico etc, pois os dispositivos eletrônicos utilizados são de fácil aquisição e sua montagem necessita apenas de conhecimentos básicos de eletrônica.

f) Recursos e vínculos da produção tecnológica:

Data início: 25/02/2019

Data término: 30/08/2019

Total investido: R\$ 4.919,00 reais

Fonte do Financiamento: R\$ 1.300,00 reais de recursos dos próprios autores e R\$ 3.619,00 reais de equipamentos pertencente à Universidade Estadual de Montes Claros - MG.

g) Sobre os autores do relatório:

Autor 1: Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior

Possui Pós-doutorado PNPd em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Possui também mestrado e doutorado em Engenharia Mecânica pela UFPE. Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). Atua como professor do curso de Engenharia Civil, no Departamento de Ciências Exatas da Universidade Estadual de Montes Claros - UNIMONTES. Professor do Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Sistemas – PPGMCS, com experiência nas áreas de ensaios não destrutivos, termoluminescência de minerais, resistência de materiais, materiais de construção e análise de estruturas.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8173038964255120>

Autor 2: Maurílio José Inácio

Possui mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, graduação em Engenharia de Computação pela Faculdade de Ciência e Tecnologia de Montes Claros – FACIT e curso técnico em Eletrônica pela mesma instituição. Atua como professor do Departamento de Ciências da Computação - DCC, do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - CCET, da Universidade Estadual de Montes Claros - UNIMONTES, nos cursos de Sistemas de Informação, Engenharia de Sistemas. Professor do Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Sistemas – PPGMCS, com experiência nas áreas de Elétrica, Eletrônica e Computação, com ênfase em circuitos elétricos e eletrônicos, sistemas digitais, lógica programável, microprocessadores, sistemas embarcados, arquitetura de computadores, programação e inteligência computacional.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0404285515651967>

h) Área de concentração do projeto: Interdisciplinar

i) Local de desenvolvimento: Universidade Estadual de Montes Claros - MG, Brasil

J) Situação atual do sistema desenvolvido: em uso

II. RESUMO DO SISTEMA ELETRÔNICO E SUAS FINALIDADES

Esse relatório técnico consiste em uma proposta de construção de um dispositivo eletrônico capaz de emitir e receber sinais de ondas ultrassônicas. Para isso, foram confeccionados dois circuitos elétricos para emissão e recepção dos sinais gerados com transdutores piezoelétricos. A montagem do dispositivo foi realizada pelos idealizadores dessa pesquisa científica, os quais são professores da Universidade Estadual de Montes Claros, vinculados ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas. O sistema eletrônico foi montado com recursos dos próprios dos autores, não havendo custos com mão de obra externa. Os demais acessórios utilizados para a montagem do experimento, tais como, fontes de alimentação, osciloscópio e multímetros, pertencem aos Laboratório de Eletrônica do Departamento de Ciências da Computação, vinculado ao curso de Engenharia de Sistemas da Unimontes.

A proposta de medir a velocidade das ondas ultrassônicas nos materiais metálicos foi motivada pela possibilidade de relacionar essas grandezas físicas com as propriedades mecânicas dos materiais, tendo em vista os relatos prévios da literatura, que descrevem diversas propriedades em função das velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais. Com a possibilidade de êxito da pesquisa, pequenas empresas do ramo metalúrgico ou de outros setores industriais, poderão caracterizar diversas ligas metálicas sem a necessidade da realização de ensaios destrutivos, que demandam tempo e maior custo com diferentes maquinários e preparação de amostras. A metodologia proposta pode estimar as propriedades mecânicas dos materiais metálicos com um único ensaio, o que não seria possível por meio de um único método destrutivo.

A pesquisa também pode contribuir de forma significativa com as aulas ministradas nos cursos de graduação em Engenharia de Sistemas e Engenharia Civil da Unimontes, cujos conteúdos abordados envolvem sistemas eletrônicos e resistências dos materiais, respectivamente. Além disso, a experiência adquirida com o experimento desenvolvido também pode ser compartilhada com outras Instituições de Ensino Superior (IES).

1. CONTEXTUALIZAÇÃO PARA JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

De maneira geral, as ligas metálicas são misturas compostas por dois ou mais elementos, sendo um deles um metal (Callister e Rethwisch, 2012). O aço produzido nas siderúrgicas está entre as ligas metálicas mais conhecidas e utilizadas no dia a dia. Sua composição química é basicamente composta por ferro, carbono, silício, manganês, enxofre e fósforo. Além do aço, outras ligas metálicas são bastante utilizadas no cotidiano, como por exemplo, as ligas de bronze com estanho, indicadas quando se deseja boa resistência ao desgaste. Não menos importante, o latão, que é uma liga de cobre e zinco, se destaca por possuir uma alta flexibilidade.

Assim como o bronze e o latão, as ligas de alumínio representam um grupo de materiais metálicos não ferrosos com inúmeras aplicações. Suas propriedades mecânicas, baixo peso específico e elevada resistência à corrosão atmosférica, também possibilitam o uso dessas ligas como elemento estrutural (Motta e Mendes, 2011).

As ligas de magnésio apresentam características mecânicas interessantes para um material com baixo valor de densidade, apresentando também boa usinabilidade. Entre as ligas de magnésio, as mais utilizadas para a obtenção de produtos forjados são as que utilizam alumínio e zinco como elementos da liga. Entretanto, os procedimentos utilizados na fundição, forja e extrusão, podem introduzir falhas internas ou alterar as propriedades mecânicas do produto final (Andreucci, 2014). Nesse caso, a realização de ensaios mecânicos para investigação da resistência à tração, compressão, cisalhamento, torção e flexão, é um requisito indispensável.

A maioria dos ensaios mecânicos são considerados como destrutivos (ED's), tendo em vista que eles danificam ou inutilizam o material ensaiado. Por outro lado, os ensaios não destrutivos (END's) são técnicas capazes de inspecionar um material sem a necessidade de destruí-lo ou danificá-lo (Garcia *et al.*, 2014). Esse fato sugere que os END's podem ser utilizados para verificar de forma rápida se o material ou componente examinado está adequado para atender ao desempenho desejado.

Outra vantagem no uso dos END's consiste na investigação de falhas ou defeitos internos, que podem ser caracterizados em relação à sua localização dentro da peça, onde é possível determinar tamanhos, orientações e formas. Normalmente, esses são os parâmetros investigados para aceitação de uso do material em um projeto (Krautkramer e Krautkramer, 1990).

Os END's também são bastante utilizados no estudo das propriedades elásticas dos materiais metálicos, sendo o ensaio por ultrassom uma das técnicas mais conhecidas (Krautkramer e Krautkramer, 1990; Garcia *et al.*, 2014). Esse fato está associado a possibilidade de relacionar medidas de densidade e velocidades de propagação das ondas ultrassônicas, com algumas propriedades mecânicas e físicas, tais como, coeficiente de Poisson, dureza, impedância acústica, anisotropia, e os módulos de elasticidade, cisalhamento e compressibilidade (Krautkramer e Krautkramer, 1990; Rodriguez-Sastre & Calleja, 2006; Yamagishi *et al.*, 2010; Ginzel e Turnbull, 2016).

Nas ligas de magnésio, o ensaio por ultrassom é utilizado de forma eficiente para verificar as mudanças na microestrutura e as alterações nas propriedades elásticas decorrentes das elevadas temperaturas de trabalho (Janovská *et al.*, 2018; Garlea, Radovic e Lia, 2019). Entretanto, os investimentos com equipamentos e a falta de experiência técnica por parte dos operadores, contribuem para que o ensaio por ultrassom não seja utilizado em larga escala pelas pequenas empresas do setor industrial.

Com os avanços no conhecimento da instrumentação eletrônica, os custos com equipamentos sofisticados para a realização do ensaio por ultrassom podem ser minimizados. Isso porque existe a possibilidade de desenvolver dispositivos eletrônicos de menor custo, capazes de monitorar com precisão a existência de falhas internas presentes nas ligas metálicas (Assef *et al.*, 2009). Entretanto, apesar dessa possibilidade, ainda haveria a necessidade de grande conhecimento teórico e experiência por parte do operador, no que se refere a interpretação de sinais e a correlação com as falhas. Por outro lado, essa dificuldade não seria encontrada para a determinação das propriedades elásticas, tendo em vista as relações existentes entre essas propriedades e as medidas de velocidades das ondas ultrassônicas que se propagam de modo longitudinal e transversal (Assef *et al.*, 2009; Lorenzi, Zorzi e Perottoni, 2014).

Entre os métodos de ensaio por ultrassom, os mais conhecidos para a investigação das propriedades elásticas são o método de pulso-eco e o método da transparência (Krautkramer & Krautkramer, 1990). No método de pulso-eco, um transdutor, gerador e receptor de ondas ultrassônicas, é acoplado em um dos lados do material a ser investigado. Dessa forma, as velocidades das ondas ultrassônicas são determinadas por meio do sinal emitido e recebido de volta no transdutor. O método da transparência utiliza dois transdutores separados, posicionados nas faces opostas do material, sendo um deles com a função de emitir e o outro de receber as ondas ultrassônicas que atravessam o material investigado (Assef *et al.*, 2009). Os métodos de pulso-eco e da transparência consistem

em ensaios não destrutivos muito simples, quando utilizados apenas com a finalidade de determinar as velocidades ultrassônicas nos materiais.

Com base nos aspectos abordados acima, essa pesquisa buscou desenvolver uma metodologia capaz de caracterizar as ligas metálicas por meio de sistema eletrônico emissor e receptor ondas ultrassônicas. O sistema eletrônico desenvolvido foi testado com diferentes materiais metálicos, apresentando resultados bastantes favoráveis para estimativa rápida de várias propriedades mecânicas, entre elas, os módulos de elasticidade, cisalhamento e compressibilidade, além do coeficiente de Poisson, fator de anisotropia e impedância acústica. Os valores das propriedades mecânicas medidas foram comparados com os valores disponíveis na literatura para as ligas metálicas investigadas, sendo constatado uma variação inferior a 2% nos resultados obtidos.

1.1 Objetivos

- Investigar as propriedades elásticas de ligas metálicas com um dispositivo eletrônico emissor e receptor de ondas ultrassônicas;

- Disponibilizar uma metodologia não destrutiva mais acessível para a investigação das ligas metálicas;

- Difundir o conhecimento científico sobre as técnicas ultrassônicas para a comunidade acadêmica e para o público não especializado ligado ao setor industrial.

- Aplicar o experimento eletrônico desenvolvido nas aulas de graduação e pós-graduação, onde os conteúdos abordados tenham a finalidade de caracterização dos materiais metálicos.

2. TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS UTILIZADAS NA PESQUISA

Nesse item serão apresentadas as etapas desenvolvidas para a caracterização das ligas metálicas por meio do sistema eletrônico desenvolvido. Os procedimentos realizados a construção do experimento, bem como para a estimativa das velocidades de ondas ultrassônicas e das propriedades elásticas serão descritas a seguir.

2.1 Aquisição das amostras para testes

Para a realização dessa pesquisa foram inicialmente investigadas três amostras de ligas metálicas adquiridas comercialmente, que são frequentemente utilizadas em aplicações industriais, sendo duas delas ligas não ferrosas.

A primeira amostra não ferrosa investigada foi uma liga de alumínio 6061 (1% de Mg e 0,6% de Si), que foi escolhida por possuir uma variedade de aplicações na construção naval, na indústria automotiva e moveleira.

A segunda amostra não ferrosa consiste em uma liga de magnésio AZ31 (3% de Al, 1% de Zn, 0,3% de Mn), escolhida por ser bastante utilizada nos setores industriais do transporte ferroviário, automotivo e aeroespacial, devido à sua baixa densidade, boa usinabilidade e seu potencial de reciclagem (Liu, 2010)

Para verificar se a metodologia proposta também se aplica às ligas metálicas ferrosas foi investigada uma barra de aço 1020. A liga de aço 1020 foi selecionada para esse estudo por ser um dos principais insumos utilizados na indústria mecânica.

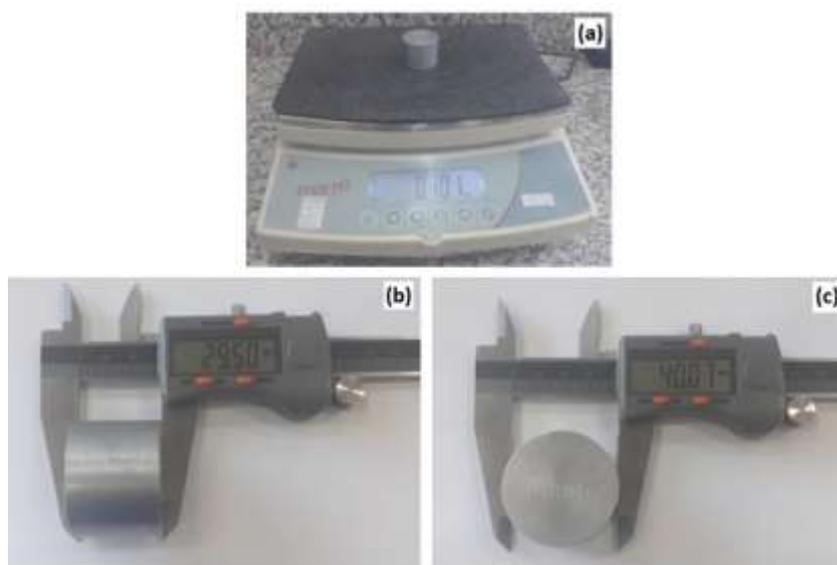
Depois de caracterizar as propriedades elásticas das ligas de alumínio, magnésio e aço, o procedimento de análise foi aplicado em uma liga de alumínio reciclado, fornecida pela empresa Fundição Efort, situada na cidade de Montes Claros - MG. Essa amostra é resultado da fundição de materiais reciclados de alumínio coletados na cidade.

2.2 Medidas de densidade das amostras

Para as medidas de densidade foram utilizados os valores da massa e volume das amostras. A massa das amostras foi aferida com o auxílio de uma balança digital, da marca Marte, modelo MS 30K1, com resolução de 0,01 g. Nessa etapa, as amostras foram posicionadas, removidas e reposicionadas sobre a balança três vezes consecutivas. Esse procedimento foi realizado para verificar o zeramento automático da balança. Depois disso, as dimensões das amostras foram medidas com um paquímetro digital, da marca

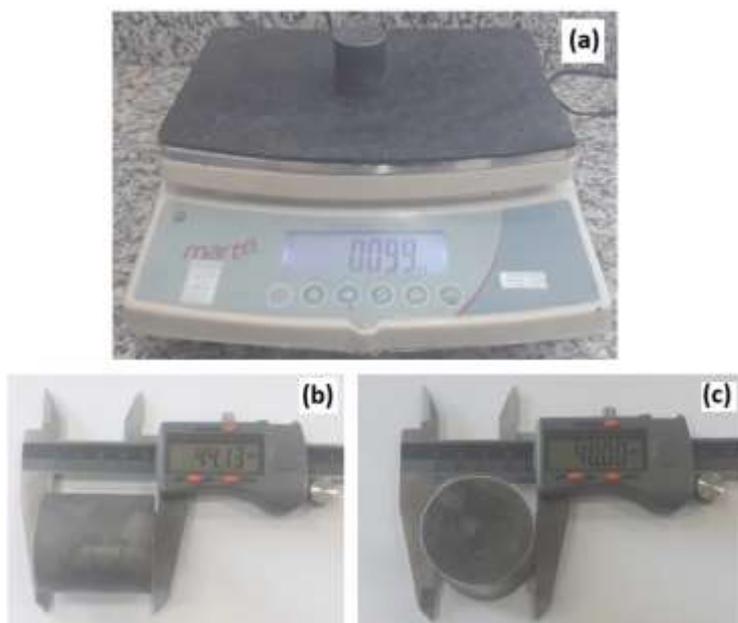
Digimess, com resolução de 0,005 mm. As Figuras de 1 a 3 ilustram as etapas realizadas para a determinação da massa e do volume das ligas investigadas.

Figura 1 - Determinação das propriedades físicas da liga de alumínio 6061: (a) aferição da massa com balança digital, (b) medida do comprimento e (c) medida do diâmetro com auxílio de paquímetro.



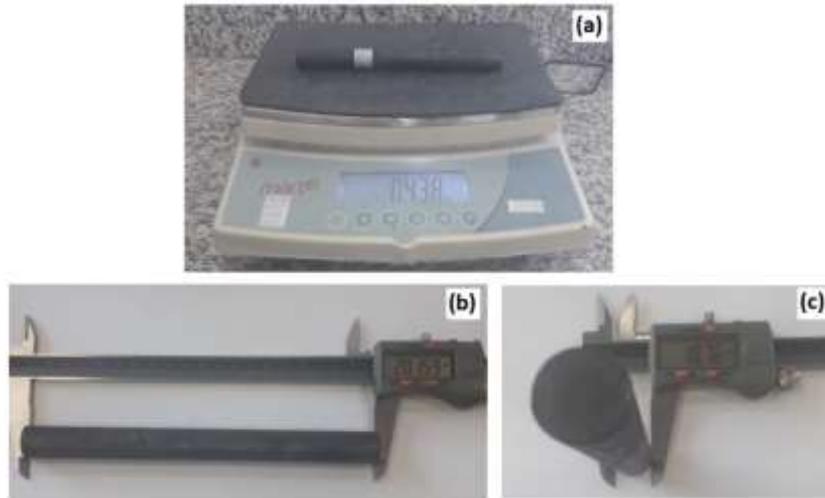
Fonte: metodologia da pesquisa

Figura 2 - Determinação das propriedades físicas da liga de magnésio AZ31: (a) aferição da massa com balança digital, (b) medida do comprimento e (c) medida do diâmetro com auxílio de paquímetro.



Fonte: metodologia da pesquisa

Figura 3 - Determinação das propriedades físicas da liga de aço 1020: (a) aferição da massa com balança digital, (b) medida do comprimento e (c) medida do diâmetro com auxílio de paquímetro



Fonte: metodologia da pesquisa

Depois de aferir a massa e as dimensões das amostras, o valor da densidade (ρ) foi obtido pela razão entre a massa (m) e o volume (V), conforme mostra a Equação 1. Na Tabela 1 encontram-se as características físicas e os valores das densidades das amostras.

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Tabela 1 - Características físicas das amostras de ligas metálicas

Amostra	*Dimensões (cm)	m (kg)	V (10^{-5}m^3)	ρ (kg/m^3)
Alumino 6061	d = 4,007 c = 2,950	0,101	3,720	2715,053
Magnésio AZ31	d = 4,000 c = 4,500	0,099	5,655	1750,706
Aço 1020	d = 1,876 c = 20,159	0,438	5,572	7860,73
Alumínio reciclado	d = 3,800 c = 5,400	0,165	6,124	2694,317

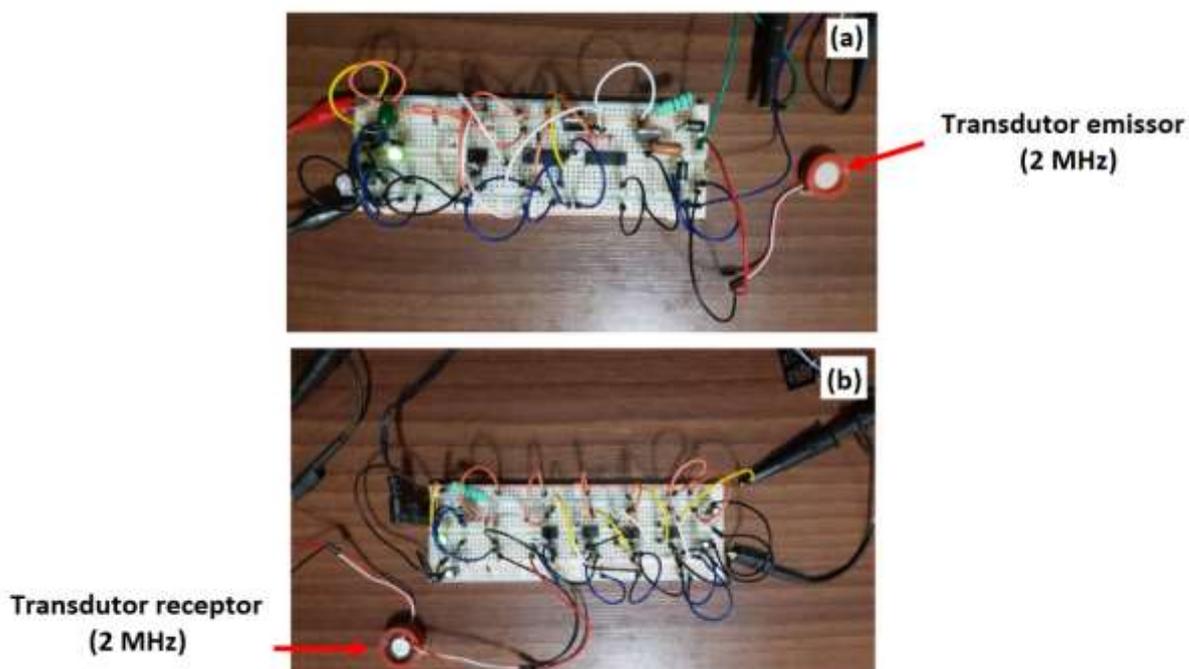
* d = diâmetro, c = comprimento

2.3 Geração das ondas ultrassônicas

As medidas de velocidades de ondas ultrassônicas longitudinais foram obtidas com o método da transparência. Para isso, foram desenvolvidos dois circuitos eletrônicos, um

emissor e outro receptor de ultrassom, conforme mostra a Figura 4. O circuito emissor, apresentado na Figura 4(a), produziu pulsos com amplitude de 60 V e duração de 400 ns, em intervalos de tempo iguais a 5 ms. Os pulsos gerados foram produzidos com um transdutor piezoelétrico de ondas longitudinais, modelo AW1905, de frequência igual a 2 MHz e 2 cm de diâmetro. O circuito receptor, mostrado na Figura 4(b), amplifica e filtra o sinal captado pelo transdutor piezoelétrico do mesmo modelo, utilizado no circuito emissor. Os circuitos emissor e receptor foram alimentados por fontes simétricas, da marca Minipa, de 30 V e 12 V, respectivamente. As Figuras 5 e 6 mostram em detalhes os esquemas dos circuitos apresentados nas Figuras (a) e (b).

Figura 4 - Circuitos eletrônicos para emissão e recepção das ondas ultrassônicas.



Fonte: metodologia da pesquisa

Figura 5 – Esquema do circuito eletrônico para emissão de ondas ultrassônicas.

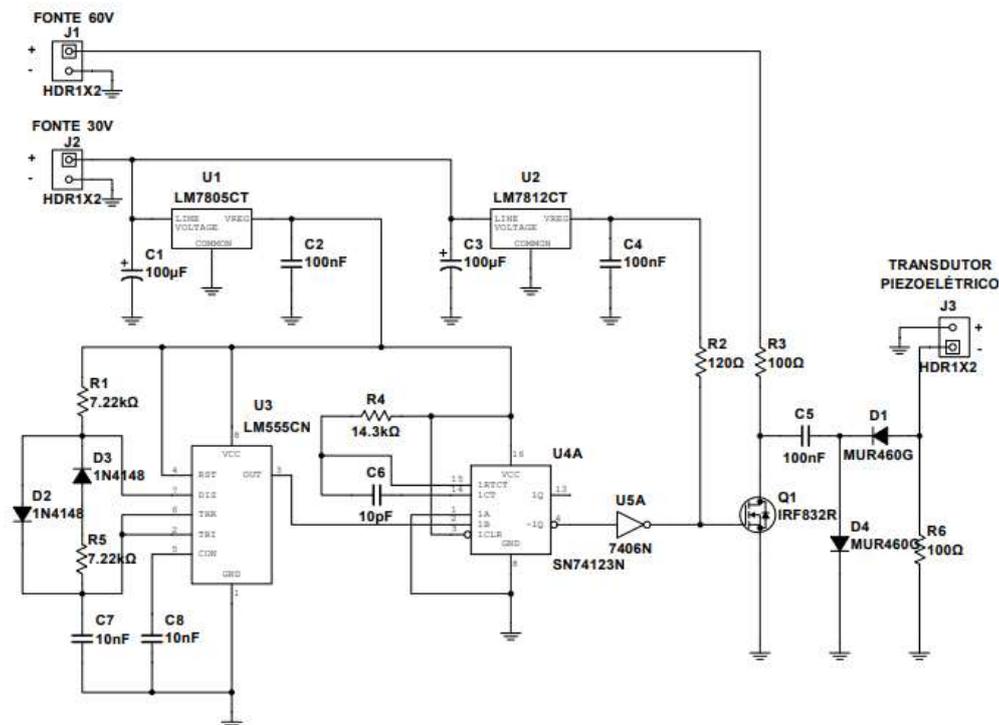
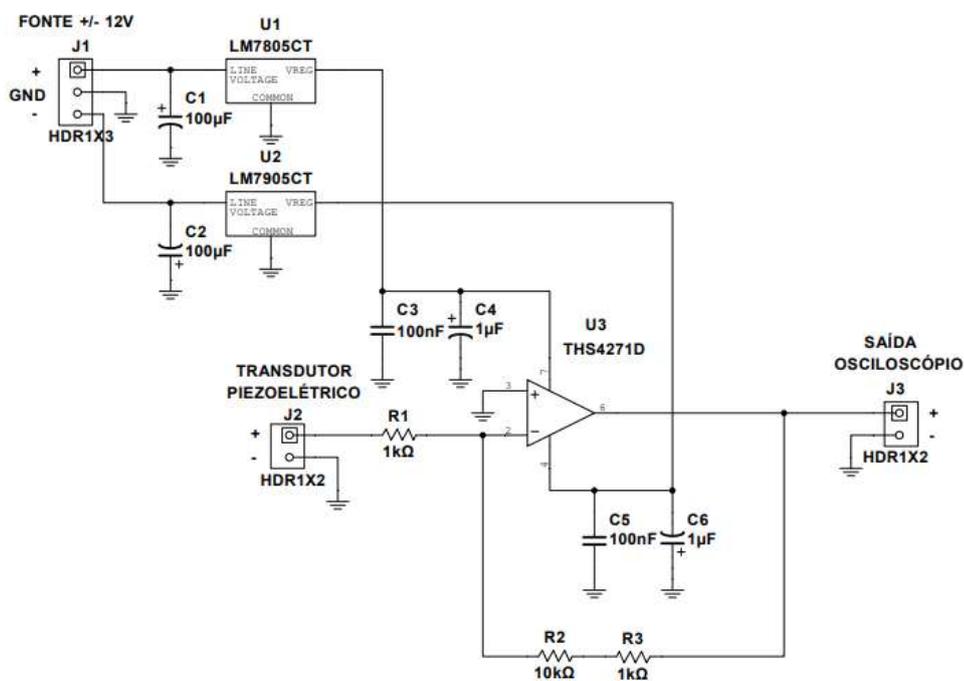
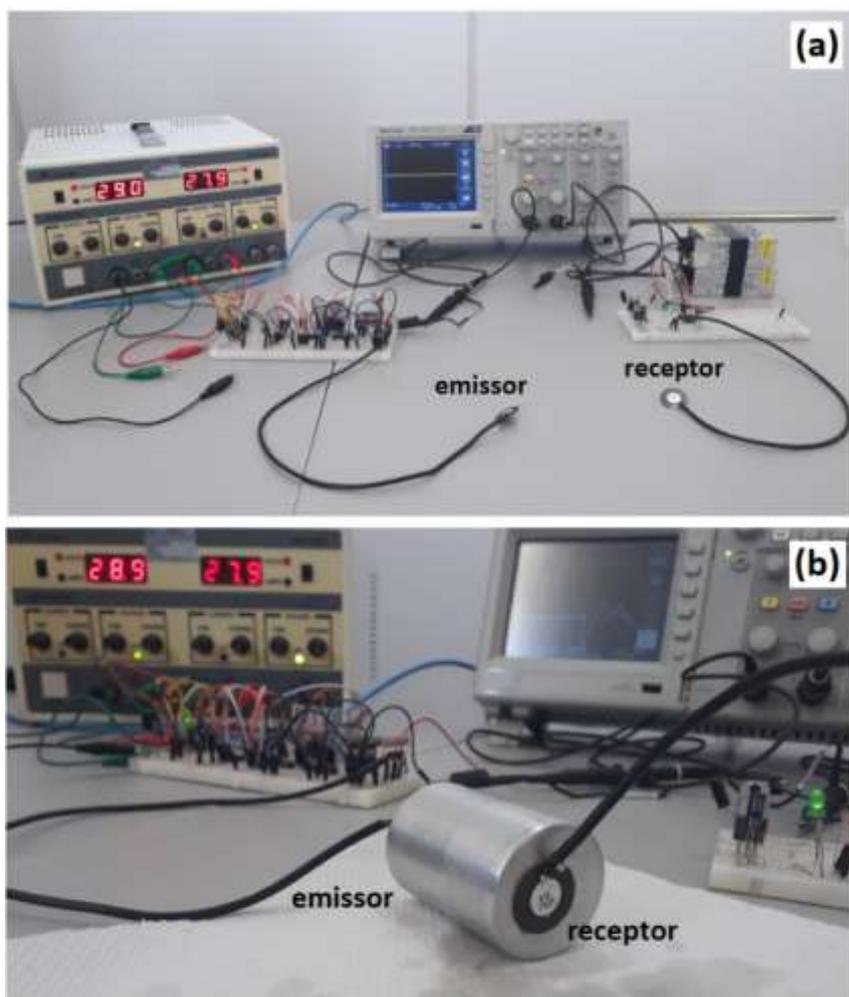


Figura 6 – Esquema do circuito eletrônico para recepção de ondas ultrassônicas.



O sinal captado pelo transdutor receptor é fornecido na saída do circuito para medição com um osciloscópio como instrumento externo. Nos experimentos realizados 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 programa *OpenChoice Desktop*, que auxilia na determinação da diferença entre o tempo da onda ultrassônica emitida e recebida através da amostra. A Figura 7 mostra a montagem do experimento para as medidas das velocidades de ondas ultrassônicas longitudinais obtidas com o método da transparência. A Figura 7(a) apresenta os equipamentos montados sobre a bancada, enquanto, a emissão e detecção da onda ultrassônica através da amostra está apresentada no detalhe da Figura 7(b).

Figura 7 - Equipamentos para medidas ultrassônicas: (a) montagem do sistema eletrônico e (b) detalhe da emissão e detecção da onda através da amostra.



Fonte: metodologia da pesquisa

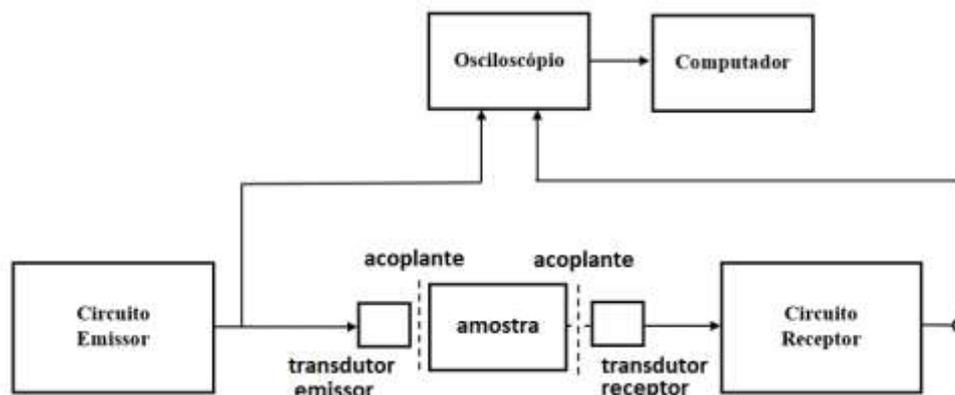
As medidas ultrassônicas foram realizadas com os transdutores alinhados nas extremidades das amostras. Entretanto, também foram realizadas medidas com os tradutores apresentado pouco alinhamento, não sendo constatadas mudanças nos valores das medidas. A medida de tempo em milissegundos (ms) entre a onda ultrassônica emitida e recebida foi determinada na tela do osciloscópio como mostra a Figura 8. Para uma compreensão geral do experimento um diagrama em blocos do sistema eletrônico está apresentado na Figura 9.

Figura 8 - Tempo de percurso da onda ultrassônica medido com osciloscópio



Fonte: metodologia da pesquisa

Figura 9 - Diagrama em blocos do sistema eletrônico desenvolvido.



Fonte: metodologia da pesquisa

2.4 Comparação de custos com outros sistemas

O sistema de medidas das ondas ultrassônicas foi idealizado e construído pelos professores autores dessa pesquisa. Todas as medidas ultrassônicas foram realizadas nas

dependências do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas da Universidade Estadual de Montes Claros - MG (PPGMCS/UNIMONTES). Para efeito comparativo, a Tabela 2 apresenta os equipamentos industriais utilizados em outros estudos e os custos médios em relação ao sistema desenvolvido nessa pesquisa.

Tabela 2 - Custo médio para sistemas de medidas ultrassônicas no setor industrial.

Equipamentos do estudo 1	Custo (R\$)	Referência
Pulsador/ receptor ultrassônico Panametrics 5072PR, Olympus NDT	16.671,00	Franco, Meza e Buiochi (2010)
Transdutores - Panametrics V382, Olympus NDT	1.470,00	
Osciloscópio - Infinium 54820A, Agilent Technologies	1.196,00	
Total	19.337,00	
Equipamentos do estudo 2	Custo (R\$)	Referência
Receptor de pulso - Panametrics 5077PR	15.000,00	Carvajal et al (2017)
Osciloscópio - TiePie Scope HS805	6.180,00	
Transdutores onda longitudinal e de cisalhamento – Panametrics	1.000,00	
Total	22.180,00	
Equipamentos do estudo 3	Custo (R\$)	Referência
Osciloscópio Tektronix	2.390,00	Presente Estudo
Fontes de alimentação Minipa	1.229,00	
Transdutor piezoelétrico, modelo AW1905	200,00	
Mão de obra estimada para uma montagem terceirizada	500,00	
Componentes eletrônicos adquiridos	600,00	
Total	4.919,00	

Os valores apresentados na tabela mostram que o sistema de medidas desenvolvido apresenta um custo bem inferior aos outros sistemas comumente utilizados na indústria. Ressaltamos que os custos com os componentes eletrônicos e com a aquisição dos transdutores foram arcados pelos autores da pesquisa. O osciloscópio e as fontes de alimentação pertencem ao Laboratório de Eletrônica do Departamento de Ciências da Computação da Unimontes, sendo seus valores orçados no site do Mercado Livre Brasil. Todas as medidas ultrassônicas foram realizadas nas dependências do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas da Unimontes.

2.5 Medidas das velocidades ultrassônicas

O valor médio da velocidade longitudinal foi calculado a partir de três medidas obtidas com o reposicionamento dos transdutores nas extremidades das amostras. A Equação 2 apresenta a expressão utilizada para a estimativa da velocidade média de propagação de onda longitudinal (V_L):

$$V_L = \frac{c}{t} \text{ (m/s)} \quad (2)$$

onde: V_L = velocidade longitudinal (m/s);

c = comprimento da amostra (m);

t = tempo (s).

Depois de calcular a velocidade média da onda longitudinal (V_L), a velocidade média da onda transversal (V_T) foi estimada por meio das relações apresentadas por outros autores. Geralmente, a velocidade da onda ultrassônica transversal é metade do valor da onda ultrassônica longitudinal. A Tabela 3 mostra as relações existentes entre V_L e V_T para as ligas metálicas estudadas.

Tabela 3 - Relações para estimativa da velocidade transversal.

Amostra	Velocidade Transversal (V_T)
Alumínio 6061	0,470. V_L
Magnésio AZ31	0,545. V_L
Aço 1020	0,531. V_L
Alumínio reciclado	0,495. V_L

Fonte: Krautkramer e Krautkramer (1990); Rodriguez-Sastre e Calleja (2006); Yamagishi *et al.*, (2010); Ginzel e Turnbull (2016).

2.6 Materiais acoplantes

Nesse estudo foram utilizados três diferentes materiais acoplantes com o intuito de verificar a influência desses materiais nos valores calculados das velocidades ultrassônicas. Os materiais utilizados como acoplantes foram a vaselina em pasta, a glicerina líquida e o mel de abelha. Esses materiais foram aplicados nas extremidades das

amostras para a realização do ensaio. Antes de iniciar as medidas as extremidades das amostras foram previamente polidas com lã de aço e detergente. Entre o uso de um acoplante e outro, as amostras foram limpas com álcool 70% e secas com papel toalha. A Figura 10 apresenta a superfície polida de algumas amostras, enquanto a Figura 11 ilustra o uso dos acoplantes entre os transdutores as amostras das ligas metálicas.

Figura 10 – Superfície polida das amostras de alumínio 6061, magnésio AZ31 e alumínio reciclado.



Fonte: metodologia da pesquisa

Figura 11 - Uso de diferentes acoplantes: (a) vaselina para a liga de magnésio, (b) glicerina para o alumínio reciclado, (c) mel para o alumínio 6061 e (d) vaselina em pasta para o aço 1020.



A Figura 12 ilustra os acoplantes utilizados no experimento e a Tabela 4 apresenta suas características físicas. Esses materiais foram fornecidos pelos autores do projeto.

Figura 12 - Materiais acoplantes



Fonte: metodologia da pesquisa

Tabela 4 - Características dos acoplantes utilizados nesse estudo

Acoplante	Densidade ρ (kg/m ³)	Impedância acústica Z (10 ⁶ kg/m ² .s)
Vaselina	905	1,50
Glicerina	1260	2,50
Mel de abelha	1360	2,89

A influência dos acoplantes nos valores calculados das velocidades ultrassônicas foi avaliada por meio dos valores de referência das velocidades relatadas na literatura e pelos valores da energia transmitida e refletida pela interface das amostras. Nesse caso, para o cálculo da energia transmitida e refletida foram utilizadas as Equações 3 e 4, relatadas por Krautkramer e Krautkramer (1990). O valor da impedância utilizado no cálculo da energia transmitida foi obtido por meio da Equação 5.

$$T = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

onde: T = coeficiente de energia transmitida (%);

R = coeficiente de energia refletida (%);

Z_1 = impedância acústica do material investigado (kg/m².s);

Z_2 = impedância acústica do acoplante (kg/m².s).

$$Z = \rho \cdot V \quad (5)$$

onde: Z = impedância acústica ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$);

ρ = densidade (kg/m^3);

V = velocidade (m/s).

2.7 Estimativa das propriedades elásticas das ligas metálicas

Muitas propriedades elásticas podem ser descritas em função da densidade (ρ) e das velocidades de ondas ultrassônicas de modo longitudinal (V_L) e transversal (V_T). Para a estimativa do módulo de elasticidade (E) das amostras foi utilizada a Equação 6 proposta por Hamidnia & Honarvar, (2012).

$$E = \rho V_T^2 \left(\frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \right) \quad (6)$$

Outros autores também relatam que o módulo de cisalhamento (G), o módulo de compressibilidade (B) e o coeficiente de Poisson (ν), também podem ser descritos em função das medidas de densidade e de velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, conforme mostram as Equações 7, 8 e 9 (Hamidnia & Honarvar, 2012; Ginzler & Turnbull, 2016):

$$G = \rho V_T^2 \quad (7)$$

$$B = \rho \left(V_L^2 - \frac{4V_T^2}{3} \right) \quad (8)$$

$$\nu = \frac{1 - 2(V_T/V_L)^2}{2(1 - (V_T/V_L)^2)} \quad (9)$$

Para a avaliação do fator de anisotropia (A_o) foi usada a Equação 10, descrita por Wiskel *et al.* (2015).

$$A_o = 3^{1/2} \left(\frac{V_T^2}{V_L^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Para análise preliminar dos resultados as Equações de 3 a 10 foram inseridas do editor de planilhas Microsoft Excel, onde os resultados calculados foram comparados com valores de referência disponíveis na literatura.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS

3.1 Medidas das velocidades ultrassônicas na amostra de alumínio 6061

A Tabela 5 apresenta os valores calculados das velocidades ultrassônicas para a liga de alumínio 6061. De acordo com Ginzler e Turnbull (2016), os valores de V_L para a liga de alumínio 6061 podem variar entre 6200 e 6375 m/s e os valores de V_T podem variar entre 2916 e 3150 m/s. Esses autores determinaram essas velocidades com diferentes equipamentos de ultrassom industrial, utilizando o método da transparência com a amostra imersa em água (técnica da imersão).

Tabela 5 - Valores das velocidades ultrassônicas para a liga de alumínio 6061.

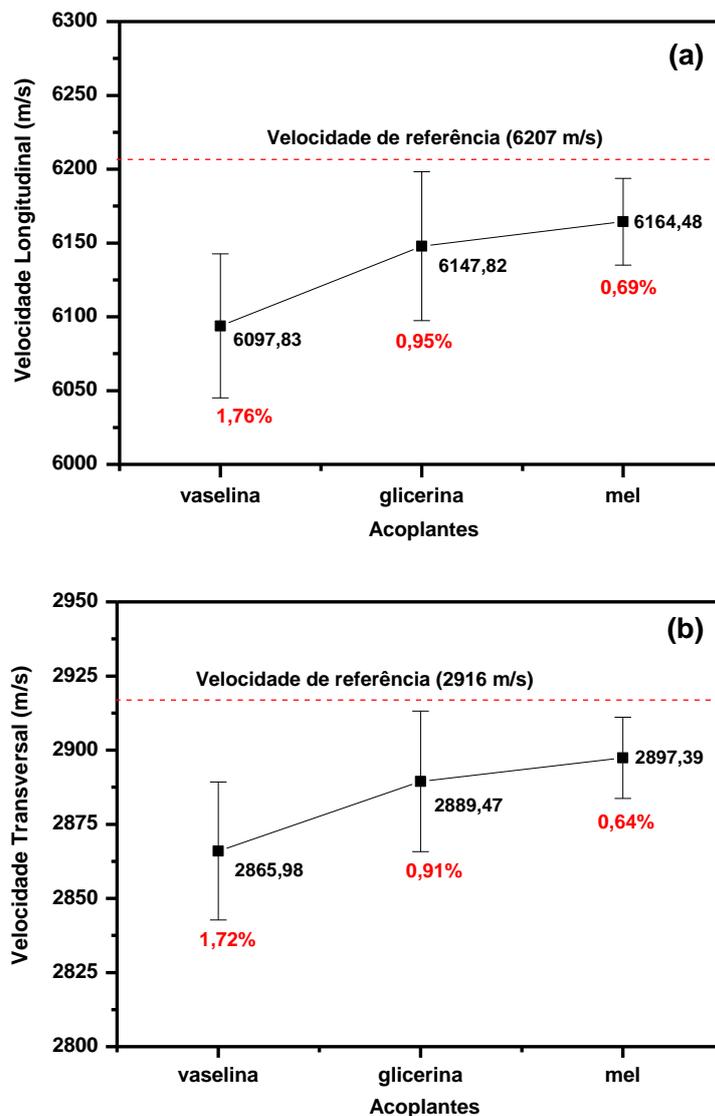
Amostra Al (6061): comprimento = 0,030 m			
Acoplante: mel de abelha ($Z = 2,89 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)			
Medidas	Tempo (10^{-6} s)	$V_L \text{ (m/s)}$	$V_T = 0,470 \cdot V_L \text{ (m/s)}$
1	4,88	6147,54	2889,47
2	4,88	6147,54	2889,47
3	4,84	6198,35	2913,22
Média	4,87	6164,48	2897,39
Desvio	0,02	29,34	13,71

Fonte: resultado da pesquisa

Para melhor visualização da influência do acoplante nos valores das velocidades ultrassônicas da liga de alumínio 6061, os dados coletados foram plotados com o *software* Orgin7.0 e apresentados na Figura 13. O valor médio das velocidades longitudinal e transversal foi mais próximo daqueles relatados por Ginzler e Turnbull (2016), quando o mel é utilizado como acoplante. Além disso, o uso do mel favoreceu os menores valores de desvio padrão. Para a velocidade da onda longitudinal, representada na Figura 13(a), o valor médio foi em torno de 0,69% do valor de referência. Comportamento semelhante

também pode ser observado para a velocidade da onda transversal na Figura 13(b), cujo valor médio foi de aproximadamente 0,64% em relação ao valor de referência.

Figura 13 - Valores médios das velocidades ultrassônicas para a liga de alumínio 6061 em função dos acoplantes: (a) velocidade longitudinal e (b) transversal.



Fonte: resultado da pesquisa

3.2 Velocidades ultrassônicas para a liga de magnésio AZ31

A Tabela 6 apresenta os valores calculados das velocidades ultrassônicas para a liga de magnésio AZ31. Os resultados confirmam a influência do acoplante nos valores calculados das velocidades. Segundo Yamagishi, Fukuhara e Chiba (2010), os valores de

V_L e V_T para a liga de magnésio com alta pureza são 5585 e 3132 m/s, respectivamente. De maneira geral, os valores médios encontrados para V_L e V_T nas ligas de magnésio estão em torno de 5770 e 3050 m/s (Krautkramer e Krautkramer (1990)). Entretanto, utilizando os valores de densidade e das constantes elásticas calculadas pelo método de ressonância ultrassônica por Garlea, Radovic e Lia (2019), encontram-se os valores aproximados de $V_L = 5710$ m/s e $V_T = 3018$ m/s para a liga de magnésio AZ31.

Tabela 6 - Valores das velocidades ultrassônicas para a liga de magnésio AZ31.

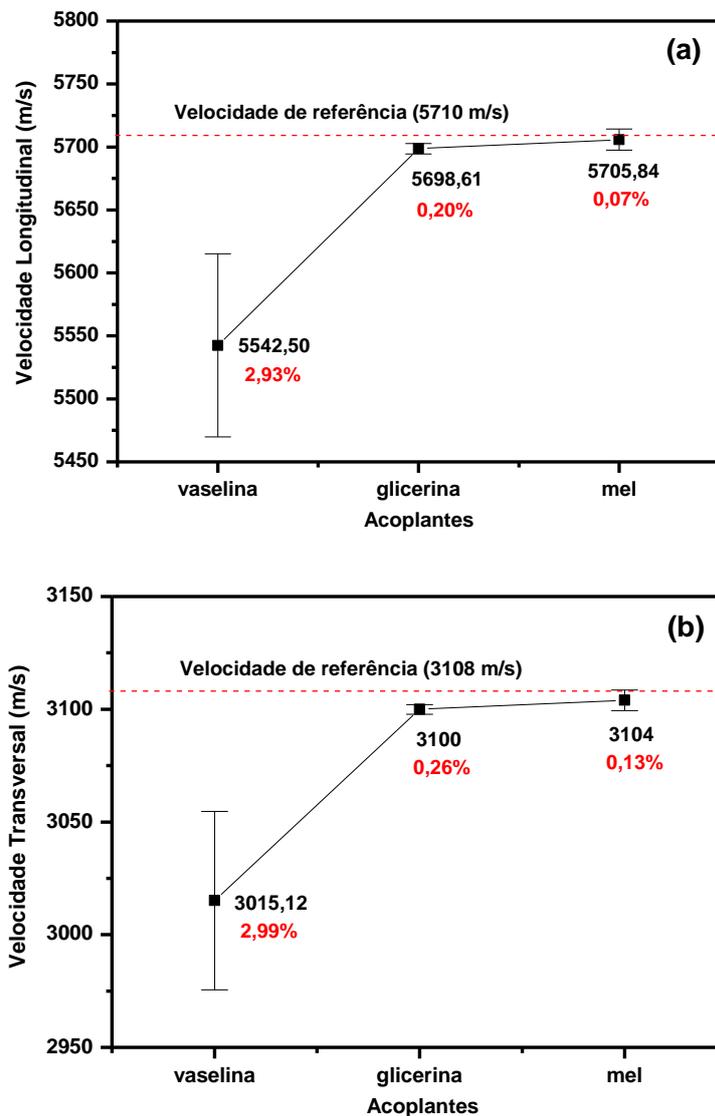
Amostra Mg (AZ31): comprimento = 0,045 m			
Acoplante: mel de abelha ($Z = 2,89 \times 10^6$ kg/m²s)			
Medidas	Tempo (10^{-6} s)	V_L (m/s)	$V_T = 0,544 \cdot V_L$ (m/s)
1	7,88	5710,66	3106,60
2	7,88	5710,66	3106,60
3	7,90	5696,20	3098,73
Média	7,89	5705,84	3104,00
Desvio	0,01	8,35	4,54

Fonte: resultado da pesquisa

A Figura 14 apresenta o comportamento das velocidades ultrassônicas para a liga de magnésio AZ31 em função dos diferentes acoplantes. De forma semelhante ao observado para na amostra de alumínio 6061, o valor médio das velocidades longitudinal e transversal foi mais próximo daqueles relatados na literatura, quando o mel foi utilizado como acoplante. Com o mel o valor médio da velocidade longitudinal na Figura 14(a), foi praticamente o mesmo valor da referência, apresentando apenas uma pequena diferença de 0,07%. Esse resultado também foi observado para o valor médio da velocidade transversal apresentado na Figura 14(b), onde a diferença foi de 0,13%.

Os resultados apresentados também sugerem o uso da glicerina para o cálculo das velocidades ultrassônicas na liga AZ31, sendo as diferenças encontradas para as velocidades longitudinal e transversal inferiores a 0,3%. O uso da glicerina também favoreceu um menor desvio padrão.

Figura 14 - Valores médios das velocidades ultrassônicas para a liga de magnésio AZ31 em função dos acoplantes: (a) velocidade longitudinal e (b) transversal.



Fonte: resultado da pesquisa

3.3 Velocidades ultrassônicas para a amostra de aço 1020

Não foi possível investigar a barra de aço 1020 com o uso dos acoplantes de glicerina e mel. Esse fato ocorreu tendo em vista que a barra possuía o mesmo diâmetro do transdutor e os acoplantes de glicerina e mel não apresentaram viscosidade suficiente para permanecerem estáticos nas extremidades da amostra. Portanto, os resultados apresentados na Tabela 7 foram obtidos apenas com o uso da vaselina em pasta.

Tabela 7 - Valores das velocidades ultrassônicas para a liga de aço 1020.

Amostra aço (1020): comprimento = 0,200 m			
Acoplante: vaselina em pasta ($Z = 1,50 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)			
Medidas	Tempo (10^{-5} s)	$V_L \text{ (m/s)}$	$V_T = 0,531.V_L \text{ (m/s)}$
1	3,400	5882,00	3123,34
2	3,460	5847,95	3105,26
3	3,440	5813,95	3087,21
Média	3,433	5847,33	3105,27
Desvio	0,12	34,20	18,16

Fonte: resultado da pesquisa

Segundo Ginzler e Turnbull (2016), os valores de V_L e V_T para a liga de aço 1020 são 5841 e 3104 m/s, respectivamente. De maneira geral, os valores médios encontrados para V_L e V_T foram praticamente os mesmos relatados na literatura de referência. Esses resultados também estão associados a excelente qualidade do acabamento superficial das extremidades da amostra, onde foram posicionados os transdutores ultrassônicos.

3.4 Velocidades ultrassônicas para a amostra de alumínio reciclado

Depois de verificar a viabilidade do cálculo das velocidades ultrassônicas nas ligas de alumínio 6061, magnésio AZ31 e aço 1020, a metodologia foi aplicada na amostra de alumínio reciclado obtida por meio de fundição. Os resultados encontrados para essa amostra estão apresentados Tabela 8.

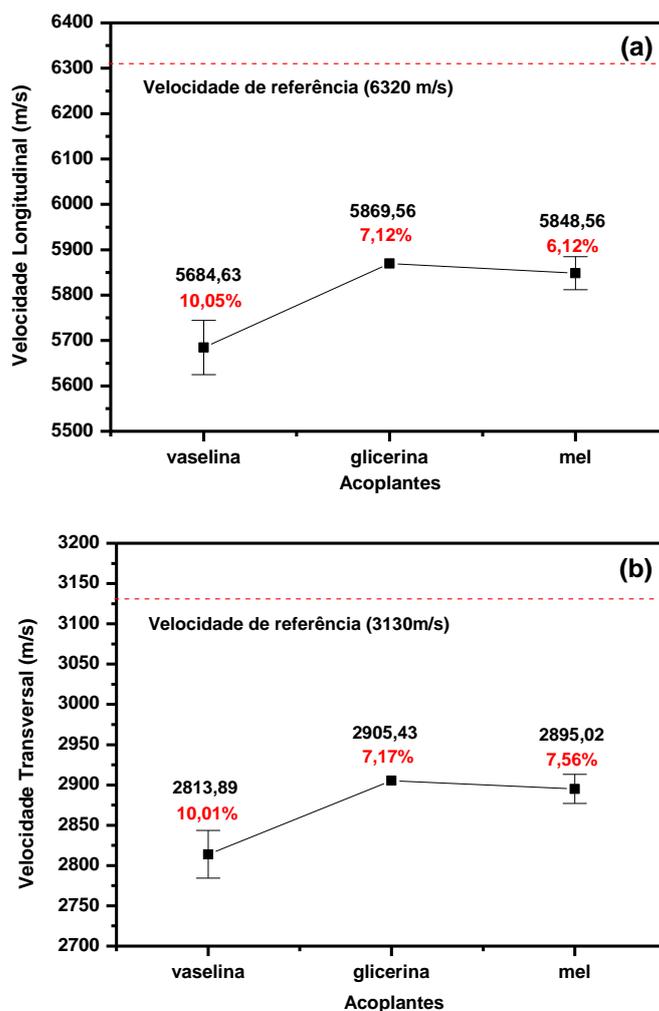
Tabela 8 - Valores das velocidades ultrassônicas para o alumínio reciclado.

Amostra alumínio (REC): comprimento = 0,054 m			
Acoplante: mel de abelha ($Z = 2,89 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)			
Medidas	Tempo (10^{-6} s)	$V_L \text{ (m/s)}$	$V_T = 0,495.V_L \text{ (m/s)}$
1	9,20	5869,56	2905,43
2	9,30	5806,45	2874,19
3	9,20	5869,56	2905,43
Média	9,23	5848,56	2895,02
Desvio	0,06	36,44	18,04

Fonte: resultado da pesquisa

A Figura 15 apresenta o comportamento das velocidades ultrassônicas para o alumínio reciclado. Para Krautkramer e Krautkramer (1990) as ligas de alumínio apresentam valores médios aproximados de $V_L = 6320$ m/s e $V_T = 3130$ m/s. De acordo com os resultados é possível observar que os valores médios das velocidades longitudinal e transversal apresentaram-se muito diferentes do valor de referência para as ligas de alumínio. Esse fato pode estar associado à presença de outros metais na composição química da amostra, tendo em vista o processo de fundição utilizado na obtenção de amostras recicladas. Nesse caso, os valores de referência adotados para a velocidade ultrassônicas podem não ideais para comparação de resultados.

Figura 15 - Valores médios das velocidades ultrassônicas para a amostra de alumínio reciclado em função dos acoplantes: (a) velocidade longitudinal e (b) transversal.



Fonte: resultado da pesquisa

Embora os resultados obtidos com os acoplantes não estejam próximos dos valores de referência adotados, com o uso da glicerina houve três medidas reprodutíveis. Os resultados mostram que não são observadas mudanças significativas com o uso da glicerina ou mel, quando levado em consideração os valores de desvio padrão.

3.5 Análise dos acoplantes utilizados

Sabe-se que valor da impedância dos acoplantes e o acabamento superficial das amostras estão diretamente ligados ao valor da energia acústica transmitida para o material investigado. Nesse sentido, tentou-se explicar a variação nos valores das velocidades por meio da quantidade de energia acústica transmitida e refletida, conforme apresentado previamente pelas Equações 3 e 4. Os valores calculados das impedâncias acústicas por meio da Equação 5 foram próximos dos valores de referência. Esses valores foram obtidos por meio do produto entre a velocidade longitudinal (V_L) mais próxima da referência e o valor da densidade medida (ρ). A Tabela 9 compara os valores calculados de impedância com os valores relatados na literatura.

Tabela 9 - Valores calculados de densidade e impedância acústica nas amostras (Z_I).

Amostra	V_L (m/s)	ρ (kg/m ³)	Z_I (10 ⁶ kg/m ² .s)	*Valor de referência Z (10 ⁶ kg/m ² .s)
Al (6061)	6164,48	2715,05	16,74	17
Mg (AZ31)	5705,84	1750,71	9,99	10
Aço (1020)	5791,55	7860,73	45,52	46
Al (reciclado)	5869,56	2694,32	15,81	17

*Valor de referência: Krautkramer e Krautkramer (1990); Rodriguez-Sastre e Calleja (2006); Yamagishi *et al.*, (2010); Ginzel e Turnbull (2016).

Embora exista uma incerteza sobre a composição química da amostra de alumínio reciclado, ou seja, que a amostra é de fato proveniente apenas da fundição de alumínio, o valor calculado da densidade ($\rho = 2694 \text{ kg/m}^3$) está de acordo com o valor de referência para o alumínio e suas ligas, cujo valor está em torno de 2700 kg/m^3 .

Depois de calcular os valores das impedâncias acústicas (Z_I) das amostras, foram calculados os valores da energia acústica transmitida e refletida, os quais estão apresentados na Tabela 10. Analisando os dados da tabela nota-se que os valores da

energia acústica refletida pela interface acoplante-amostra foram maiores do que os valores da energia transmitida. Esse comportamento está de acordo com o esperado para os ensaios de ultrassom, que utilizam transdutores com o contato direto sobre a superfície da amostra (Krautkramer e Krautkramer, 1990). Um destaque deve ser ressaltado para a amostra de magnésio AZ31, onde percebe-se um maior percentual de energia transmitida para todos os acoplantes utilizados. Esse fato pode estar associado ao melhor acabamento superficial nas extremidades da amostra. Além disso, essa amostra também apresentou os valores de velocidades ultrassônicas mais próximos dos valores de referência, quando investigada com glicerina ou mel. Esses resultados reforçam a importância do acabamento superficial, que favorece uma melhor transmissão de energia e, conseqüentemente, melhores valores de velocidades ultrassônicas. No caso dos valores da energia acústica transmitida, com a glicerina foi de 40% e com o mel foi de 44,87%.

Tabela 10 – Valores de energia acústica transmitida (T) e refletida (R) pelas amostras

Amostra	Z_1 (10^6 kg/m².s)	Z_2 (10^6 kg/m².s)	T (%)	R (%)	Acoplante
Al (6061)	16,74	1,50	16,45	83,55	vaselina
		2,50	25,99	74,01	glicerina
		2,89	29,44	70,56	mel
Amostra	Z_1 (10^6 kg/m².s)	Z_2 (10^6 kg/m².s)	T (%)	R (%)	Acoplante
Mg (AZ31)	9,99	1,50	26,11	73,89	vaselina
		2,50	40,00	60,00	glicerina
		2,89	44,87	55,13	mel
Amostra	Z_1 (10^6 kg/m².s)	Z_2 (10^6 kg/m².s)	T (%)	R (%)	Acoplante
Al (REC)	15,81	1,50	17,33	82,67	vaselina
		2,50	27,30	72,70	glicerina
		2,89	30,90	69,10	mel

* Z_1 = impedância acústica da amostra, Z_2 = impedância acústica do acoplante.

Com valores de energia acústica transmitida acima de 25% as diferenças encontradas nas velocidades são pequenas em relação aos valores de referência. Entretanto, com valores de energia transmitida na ordem de 40% os valores de velocidade calculados são praticamente iguais aos de referência. No caso da amostra de alumínio

reciclado, as energias transmitidas com o uso da glicerina e do mel foram superiores a 25%, mas as diferenças encontradas nos valores das velocidades ultrassônicas foram em torno de 7%. Entretanto, não se pode afirmar com certeza que os valores das velocidades ultrassônicas estão distantes dos valores de referência, tendo em vista que a amostra pode ter sido contaminada com outros metais reciclados, tais como latão, magnésio ou cobre, durante sua fundição na empresa Efort. Por outro lado, os valores apresentados de densidade, impedância acústica e de energia acústica transmitida obtidos para todos os acoplantes, sugerem fortemente que essa amostra é essencialmente composta por alumínio.

A vaselina em pasta foi escolhida por apresentar uma boa aderência e viscosidade, contribuindo para uma melhor fixação entre o transdutor e a amostra. Contudo, acredita-se que os resultados mais distantes observados com o uso desse acoplante esteja associado ao seu baixo valor de impedância acústica e ao acabamento superficial das amostras. Esse fato pode ser constatado pelos baixos valores de energia acústica transmitida, que foram em torno de 17% para as amostras de alumínio 6061 e de alumínio reciclado, que apresentam acabamento superficial inferior (superfície mais rugosa). O maior percentual para a liga de magnésio, em torno de 26%, supostamente foi devido ao melhor acabamento superficial (superfície mais lisa).

3.6 Propriedades elásticas das amostras

A Tabela 11 apresenta esses resultados obtidos para as propriedades elásticas das amostras estudadas. Esses resultados foram calculados por meio dos valores de densidade e das velocidades ultrassônicas, os quais foram substituídos nas Equações 6, 7, 8, 9 e 10, inseridas em planilhas de Excel.

Sabe-se que os materiais metálicos, quando tracionados, apresentam proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação axial. Portanto, o módulo de elasticidade (E) representa a constante de proporcionalidade entre a tensão e a deformação, sendo a propriedade mecânica que fornece informações sobre a rigidez do material à deformação elástica.

Tabela 11 – Propriedades elásticas calculadas para as ligas não ferrosas.

Amostra	<i>E</i> (GPa)	<i>G</i> (GPa)	<i>B</i> (GPa)	<i>A₀</i>	<i>ν</i>
Al (6061)	61,82	22,76	72,68	0,81	0,36
Valor de referência	62-68	22-25	72,80	0,56-0,83	0,32-0,35
Mg (AZ31)	43,47	16,85	34,48	0,94	0,29
Valor de referência	44,70	16,00	34,90	0,90	0,29
Aço (1020)	190,90	74,36	164,54	0,92	0,30
Valor de referência	196,00	75,00	167,77	1,00	0,30
Al (REC)	60,46	22,60	62,09	0,85	0,34
Valor de referência	70,00	24-28	64-78	0,60	0,34

*Valor de referência: Rodriguez-Sastre e Calleja (2006); Yamagishi *et al.*, (2010); Callister e Rethwisch, (2012); Garcia *et al.* (2014); Ginzel e Turnbull (2016).

O módulo de cisalhamento (G) é um importante parâmetro físico para investigar o comportamento elástico do material, quando solicitado mecanicamente pela seção transversal.

O módulo de compressibilidade (B) descreve a elasticidade volumétrica do material. Ele representa a tendência de deformação de todas as dimensões da amostra, quando submetida à um carregamento uniforme.

Os materiais anisotrópicos não apresentam boa capacidade para estampagem de chapas, tendo em vista que, a deformação provocada pela solicitação mecânica pode acarretar falhas na direção da espessura da chapa. Quando o fator de anisotropia (A_0) tende a 1, isso indica que o material investigado apresenta características isotrópicas, ou seja, as mesmas propriedades independentemente das direções investigadas.

O coeficiente de Poisson (ν) representa a relação existente entre a deformação transversal e a longitudinal, sendo esse parâmetro utilizado para o dimensionamento das dimensões de barras sob ação de tração ou compressão.

Como pode ser observado, todos os resultados calculados para as propriedades elásticas das ligas metálicas estão próximos dos valores relatados na literatura. No caso da amostra de alumínio reciclado, os valores calculados para E , G e B sugerem que as propriedades mecânicas foram alteradas pelo processo de fundição ou pela contaminação com outros metais durante o processo de reciclagem.

3.7 Desenvolvimento de programa de computador

Os resultados apresentados da Tabela 11 mostraram a viabilidade do método ultrassônico proposto, possibilitando o desenvolvimento de um Website, que consiste em um programa de computador de acesso gratuito. Neste programa de computador o usuário pode estimar de forma rápida as propriedades elásticas de diferentes ligas metálicas utilizando apenas as relações existentes entre as velocidades ultrassônicas e o valor da densidade. O programa de computador foi registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), sob o número de registro BR512020002371-1, estando disponível na página do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas (PPGMCS/UNIMONTES) em:

<https://matter.ppgmcs.com.br/>

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O RESULTADOS

Os resultados preliminares dessa pesquisa mostraram que o sistema eletrônico desenvolvido foi eficiente para medir a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais, tendo em vista os valores de referência relatados na literatura.

Os valores calculados para os módulos de elasticidade, compressibilidade, anisotropia, impedância acústica e coeficiente de Poisson, também apresentaram valores próximos daqueles relatados por outros autores por meio de técnicas destrutivas e pelo ensaio ultrassônico.

A rapidez na aquisição dos dados, à simplicidade da técnica e o menor custo com instrumentação, corroboram a viabilidade de utilização de ondas ultrassônicas para a caracterização de ligas metálicas ferrosas e não ferrosas. Entretanto, os resultados podem ainda ser melhorados com aperfeiçoamentos no sistema eletrônico e com estudos de outros materiais acoplantes mais adequados aos tipos de superfície das amostras.

Os dados obtidos para a amostra de alumínio reciclado sugerem uma perda nas propriedades mecânicas do alumínio, sendo esse fato informado a empresa de fundição Efort.

O sistema eletrônico desenvolvido mostrou-se capaz de caracterizar ligas metálicas ferrosas e não ferrosas, sendo um importante instrumento para a estimativa rápida das propriedades elásticas dos metais utilizados pelas empresas metalúrgicas. Além disso, o

sistema pode ser utilizado por docentes e discentes nas aulas de Resistência dos Materiais, ministradas no curso de Engenharia Civil da Unimontes.

Atualmente o sistema encontra-se em teste com a construção de novos circuitos e transdutores, visando a investigação de materiais não metálicos, como por exemplo, madeiras e cerâmicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse projeto agradecem ao coordenador do curso de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas (PPGMCS/Unimontes), Prof. Renê Rodrigues Veloso, pelo incentivo e ajuda com à pesquisa. Eles também agradecem a empresa Efort da cidade de Montes Claros - MG, pelo fornecimento da amostra de alumínio reciclado.

REFERÊNCIAS

- Andreucci, R. (2014), *Aplicação Industrial: Ensaio por Ultrassom*, Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos, ABENDE, São Paulo.
- Assef, A.A.; Gewehr, P.M.; Costa, E.T; Maia, J.M.; Gamba, H.R.; Button, V.L.S.N. (2009), Sistema para Geração, Aquisição e Processamento de Sinais de Ultra-Som. *Revista Controle e Automação*, 20, 145-155.
- Callister Jr., W. D.; Rethwisch, D. G. (2012), “*Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução*”. LTC, 8ª Edição.
- Carvajal, L.; Artigas, A.; Monsalvea, A.; Arevaloa, E. (2017), Monitoring heat treatments in steels by a non destructive ultrasonic method. *Materials Research.*, 20, 347-352.
- Franco, E.E.; Meza, J.M.; Buiochi, F. (2011), Measurement of elastic properties os materials by the ultrasonic through-transmission technique. *Dyna rev.fac.nac.minas*, 49-64.
- Garcia, A; Spim, J. A.; Santos, C.A. (2014), “*Ensaio dos Materiais*”. LTC, 2ª Edição.
- Garlea, E.; Radovic, M.; Liaw, P.K. (2019), High-temperature dependency of elastic mechanical behavior of two wrought magnesium alloys AZ31B and ZK60A studied by resonant ultrasound spectroscopy. *Materials Science and Engineering A.*, 758, 86-95.
- Ginzl, E.; Turnbull, B. (2016), Determining approximate acoustic properties of materials. *e-Journal of Nondestructive Testing (NDT)*, 12, 1-10.
- Hamidnia, M.; Honarvar. F. (2012), Measurement of elastic properties of AISI 52100 alloy steel by ultrasonic nondestructive methods. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 7, 951-961.

- Janovská, M.; Minárik, P.; Sedlák, P.; Seiner, H.; Knapek, M.; Chmelík, F., Janecek, M.; Landa, M. (2018), Elasticity and internal friction of magnesium alloys at room and elevated temperatures. *J. Mater Sci.*, 53, 8545-8553.
- Krautkramer, J.; Krautkramer, H. (1990), “*Ultrasonic Testing of Materials*”. Springer-Verlag, 4^o Edição.
- Liu, L. (2010), “*Welding and joining of magnesium alloys*”. Elsevier Science and Technology, 1^o Edição.
- Lorenzi, R.F.L.; Zorzi, J.E.; Perottoni, C.A. (2014), Instrumentação para espectroscopia de ressonância de ultrassom. *Cerâmica*, 60, 332-339.
- Motta, J.N.M.; Mendes, L.C. (2011), Análise do emprego de estruturas de alumínio em suporte de cargas. *Engenharia, Estudo e Pesquisa*, 11, 47-55.
- Rodriguez-Sastre, M.A.; Calleja, L. (2006), The determination of elastic modulus of slates from ultrasonic velocity measurements. *The Geological Society of London, London*, 1-11.
- Wiskel, J.B.; Kennedy, J.; Ivey, D.G.; Henein H. (2015), Ultrasonic velocity evaluation of three grades of heat treated steel. *Journal Canadian Inst. NDE Conf.*
- Yamagishi, H.; Fukuhara, M.; Chiba, A. (2010), Determination of the mechanical properties of extruded pure magnesium during tension-tension low-cycle fatigue using ultrasonic testing. *Materials Transactions*, 51, 2025-2032.