

## Utilização de ondas acústicas para a caracterização de propriedades físicas e mecânicas das madeiras

### Use of acoustic waves to characterize the physical and mechanical properties of wood

#### **Samuel Soares Cruz**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2234-084X>

Universidade Estadual de Montes Claros, Brazil

E-mail: samuelmouramoura18@hotmail.com

#### **Adalto Soares da Fonseca Júnior**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1614-8892>

Universidade Estadual de Montes Claros, Brazil

E-mail: adalto.junior@unimontes.br

#### **Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2158-2153>

Universidade Estadual de Montes Claros, Brazil

E-mail: alvaro.junior@unimontes.br

#### **Maurílio José Inácio**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0744-0845>

Universidade Estadual de Montes Claros, Brazil

E-mail: maurilio.inacio@unimontes.com

#### **Thiago de Castro Guimarães**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-3572>

Universidade Estadual de Montes Claros, Brazil

E-mail: thiagoeng.castro@gmail.com

#### **Maria Helena Teles Lopes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-8355>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil

E-mail: mariahelenat123@gmail.com

#### **Guilherme Rocha Zuba Parrela**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5511-1457>

Universidade Estadual de Montes Claros, Brazil

E-mail: guirochazu@gmail.com

### RESUMO

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo utilizar um ensaio de ondas acústicas por impacto e análise computacional para caracterizar as propriedades mecânicas de três espécies de madeira. Amostras de Cedro, Ipê e Cumarú, no formato de ripas, foram adquiridas comercialmente. Para determinar a deflexão elástica e o módulo de elasticidade, as amostras foram submetidas a um ensaio de flexão em três pontos e, em seguida, investigadas com o ensaio de ondas acústicas por impacto. Este ensaio utilizou a energia potencial gravitacional de uma esfera de aço em queda livre, capturando o sinal acústico com um computador e software livre. Dois programas computacionais foram usados para análise: GeoGebra5.0, para ajuste de curva por regressão polinomial, e MATLAB, para a Transformada de Fourier. Resultados, aliados a imagens por microscopia óptica, revelaram que os espectros de frequências de vibração estão relacionados com as propriedades mecânicas das madeiras. O método não destrutivo utilizado oferece rapidez, praticidade e menor custo, em comparação com ensaios mecânicos destrutivos convencionais.

**Palavras-chave:** Ensaio; Ondas Acústicas; Madeiras; Propriedades

## ABSTRACT

The aim of this study was to use impact acoustic wave testing with computer analysis to characterize the mechanical properties of three wood species. Samples of Cedro, Ipê, and Cumaru wood in slat form were purchased commercially. To determine the elastic deflection and modulus of elasticity, the samples underwent a three-point bending test. They were then investigated using acoustic wave impact testing. This test used the gravitational potential energy from the impact of a free-falling steel ball on the samples, capturing the acoustic signal with a computer and free software. Two programs were used for analysis: GeoGebra5.0 for polynomial regression curve fitting, and MATLAB for Fourier Transform. The results, along with optical microscopy images, showed that the vibration frequency spectra are related to the wood's mechanical properties. This non-destructive method offers speed, practicality, and lower costs compared to conventional destructive mechanical tests.

**Keywords:** Testing; Acoustic Waves; Wood; Properties.

---

## INTRODUÇÃO

Sabe-se que a madeira é um dos materiais naturais mais antigos utilizados pela humanidade, sendo aplicada desde a fabricação de pequenos objetos até estruturas de grande porte. A madeira sempre esteve ao alcance do homem primitivo, que com imaginação e criatividade foi capaz de construir abrigos confortáveis e seguros. Isso foi possível devido à versatilidade e as características físicas e mecânicas desse material.

Em alguns países, onde a cultura é aliada à tecnologia e aos fatores ambientais, a madeira é aplicada com sucesso em diversos projetos de edificações. Entretanto, nos países da América Latina, sobretudo no Brasil, a madeira possui um menor destaque em relação ao concreto armado. Acredita-se que o preconceito e a falta de conhecimento sobre suas propriedades tenham classificado a madeira ao longo dos anos como material de construção secundário, cuja aplicação fica restrita, na maioria das vezes, aos telhados, às estruturas provisórias ou aos detalhes de construção (MELLO, 2007).

Aplicar adequadamente a madeira requer um conhecimento prévio sobre suas propriedades físicas e mecânicas. Isso porque suas propriedades podem sofrer variações de acordo com a espécie, influenciando no dimensionamento dos elementos estruturais como vigas e pilares. A NBR 7190 (1997) relata os procedimentos para a caracterização das espécies de madeira por meio da realização de ensaios mecânicos. Estes ensaios possibilitam a determinação de algumas propriedades importantes para o desempenho eficiente das peças de madeira, dentre as quais destaca-se: módulo de elasticidade, resistência à tração, compressão, cisalhamento, fendilhamento, flexão e dureza (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Conhecer as características da madeira também permite a padronização de um determinado produto, bem como o desenvolvimento de novas técnicas de fabricação, manutenção e tratamentos. Assim, os ensaios mecânicos são utilizados não apenas para verificar a resistência da madeira, mas em muitos casos, para a investigação da integridade da peça a ser utilizada. Contudo, uma das principais desvantagens no uso destes ensaios é o caráter destrutivo, onde não existe a possibilidade de repetição de medidas na amostra.

Garcia, Spim e Santos (2012) relatam algumas vantagens no uso de ensaios não destrutivos. Estes ensaios podem ser utilizados na investigação dos materiais sem a necessidade de destruir ou danificar a amostra. Entre os ensaios não destrutivos os mais conhecidos são: raios X; gamagrafia; líquidos penetrantes; partículas magnéticas e

ultrassom. Este último, que consiste em uma técnica de ondas acústicas com frequência acima de 20 kHz, tem se destacado em relação aos outros ensaios pelos seguintes motivos: não necessita de equipamentos para proteção radiológica; pode ser utilizado não apenas em metais, mas em peças de madeira antes e após o uso, bem como durante toda a vida útil; possui um menor custo de realização comparado com os ensaios destrutivos; possibilita a inspeção da madeira *in loco* com equipamentos portáteis; os resultados são obtidos com maior rapidez.

A utilização de técnicas de ondas acústicas para a inspeção das madeiras pode trazer muitos benefícios para a construção civil. Por exemplo, o comportamento distinto das propriedades da madeira está associado às suas características anisotrópicas, e neste caso, investigar amostras de madeira com ensaios destrutivos convencionais, ao invés de investigar a própria peça, pode diminuir a precisão dos resultados. Costa (2005) ressalta que as peças de madeira são provenientes do crescimento de um organismo vivo, onde existe uma troca de umidade com o ambiente externo durante toda a vida útil da peça. Portanto, a higroscopia das madeiras deverá interferir diretamente nos valores das propriedades físicas e mecânicas em função da direção investigada na amostra.

Recentemente, Rocha (2021) utilizou com sucesso a propagação de ondas acústicas de impacto para a caracterização de diferentes espécies de madeira, entre elas: jatobá, peroba-rosa e pinus-eliote. No estudo, o comportamento do sinal acústico observado nas amostras foi utilizado para diferenciar as espécies e verificar a influência do envernizamento nas propriedades mecânicas. Entretanto, após a conclusão da pesquisa, foi destacada a importância de realização de novos estudos que relacionem os espectros acústicos com as propriedades mecânicas das madeiras.

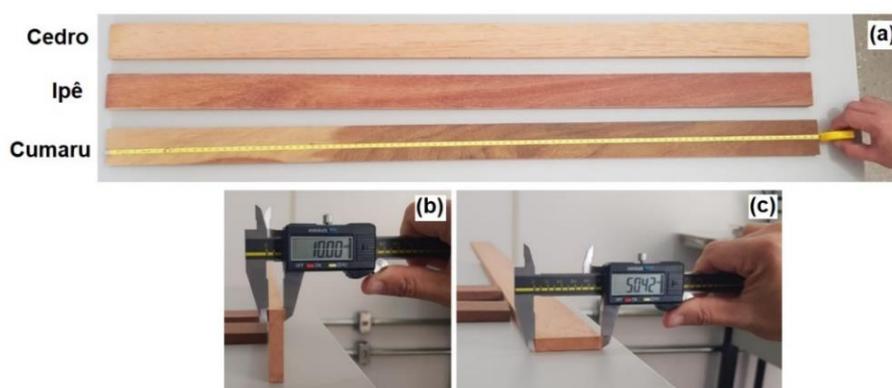
Um número reduzido de estudos que utilizam ondas acústicas de impacto e análise computacional para a caracterização de diferentes espécies de madeiras estão entre os principais motivadores desta pesquisa, cujo objetivo principal foi caracterizar propriedades físicas e mecânicas de três espécies de madeira com uma metodologia não destrutiva e de baixo custo em comparação com os ensaios destrutivos convencionais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foram adquiridas três amostras de madeira de diferentes espécies, sendo uma delas de Ipê, uma de Cedro e a outra de Cumaru. As amostras tratam-se de peças secas, com teor de umidade em torno de 12%, cujas dimensões nomais são de 100 cm de comprimento, 5 cm de largura e 1 cm espessura. As dimensões efetivas da seção transversal foram medidas com um paquímetro digital de resolução de 0,01 mm. Na Figura 1 estão apresentados os procedimentos para aferição das dimensões efetivas das amostras de madeira.

Na Tabela 1 encontram-se as características físicas das amostras. Para as medidas de massa foi utilizada uma balança digital com resolução de 1 g. Depois disso, a densidade aparente das amostras foi calculada por meio da razão entre massa e volume, conforme representado na Equação 1.

**Figura 1** – Medidas das dimensões: (a) comprimento; (b) espessura e (c) largura



Fonte: autores (2024)

**Tabela 1** – Dimensões efetivas da seção transversal, volume e massa das amostras

Madeira	$L$ (m)	$e$ (m)	Volume x $10^{-4}$ (m <sup>3</sup> )	Massa (kg)
Cedro	0,05042	0,01000	5,042	0,258
Ipê	0,04910	0,00990	4,861	0,482
Cumaru	0,04856	0,01000	4,856	0,494

Nota:  $L$  = largura,  $e$  = espessura

Fonte: autores (2024)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Em que:

$\rho$  = densidade aparente da amostra ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$m$  = massa da amostra a 12% de umidade (kg);

$V$  = volume da amostra a 12% de umidade ( $\text{m}^3$ ).

A partir das dimensões da seção transversal foi calculado o valor do momento de inércia das amostras. Para isso, foi utilizada a Equação 2 para peças com seção transversal retangular. É importante ressaltar que na Equação 2, a base ( $B$ ) e a altura da seção transversal ( $H$ ) correspondem, respectivamente, aos valores de largura ( $L$ ) e espessura ( $e$ ).

$$I = \frac{B \cdot H^3}{12} \quad (2)$$

Em que:

$I$  = momento de inércia da peça ( $\text{mm}^4$ );

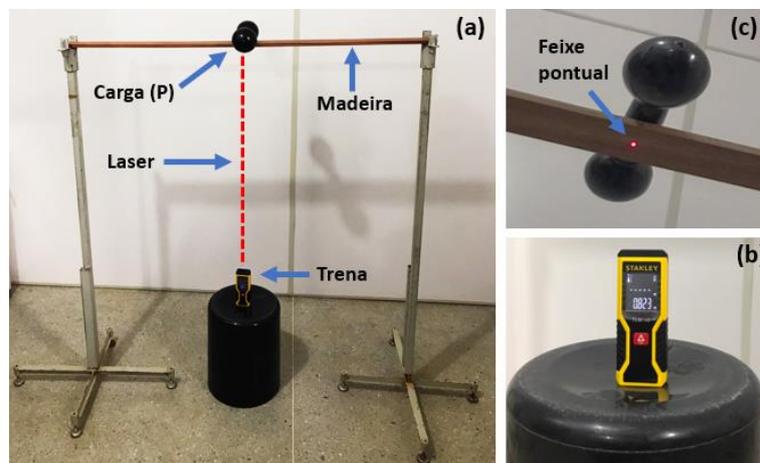
$B$  = base da seção transversal (mm);

$H$  = altura da seção transversal (mm).

## DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS MADEIRAS

Para a determinação do módulo de elasticidade foi realizada uma adaptação do ensaio de flexão em três pontos, conforme ilustrado na Figura 2. Neste caso, o ensaio foi realizado com base nos procedimentos descritos por Garcia, Spim e Santos (2012).

**Figura 2** – Esquema representativo do ensaio de flexão em três pontos



Fonte: autores (2024)

Um esquema geral do experimento pode ser observado na Figura 2(a), onde uma trena a laser está posicionada no centro da amostra para a medida da flecha. A flecha, por sua vez, foi provocada por um haltere de massa igual a 2,027 kg (19,86 N). O comprimento útil entre os apoios verticais foi de 900 mm.

A medida da flecha corresponde a diferença entre os valores observados na trena a laser, antes e após o posicionamento do haltere no centro do comprimento útil. Uma ampliação da trena a laser utilizada para a medida da flecha e o feixe pontual no centro do comprimento útil, podem ser observadas nas Figuras 2(b) e (c), respectivamente. A temperatura ambiente ( $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e a umidade relativa do ar ( $58\% \pm 5\%$ ) foram aferidas com um termo-higrômetro digital no momento das medidas.

A partir da substituição da Equação 2 na Equação 3, o valor do módulo de elasticidade ( $E$ ) das amostras foi calculado por meio da Equação 4, a qual foi relatada por Garcia, Spim e Santos (2012) para o ensaio de flexão em três pontos.

$$v = \frac{P.L^3}{48.E.I} \quad (3)$$

$$E = \frac{P.L^3}{48.I.v} \quad (4)$$

Em que:

$v$  = flecha no ensaio de flexão para amostra na condição biapoiada (mm);

$P$  = carga proveniente da massa do haltere (N);

$L$  = distância entre os apoios (mm);

$I$  = momento de inércia da seção transversal ( $\text{mm}^4$ );

$E$  = módulo de elasticidade na flexão (MPa).

## GERAÇÃO E CAPTURA DOS SINAIS ACÚSTICOS

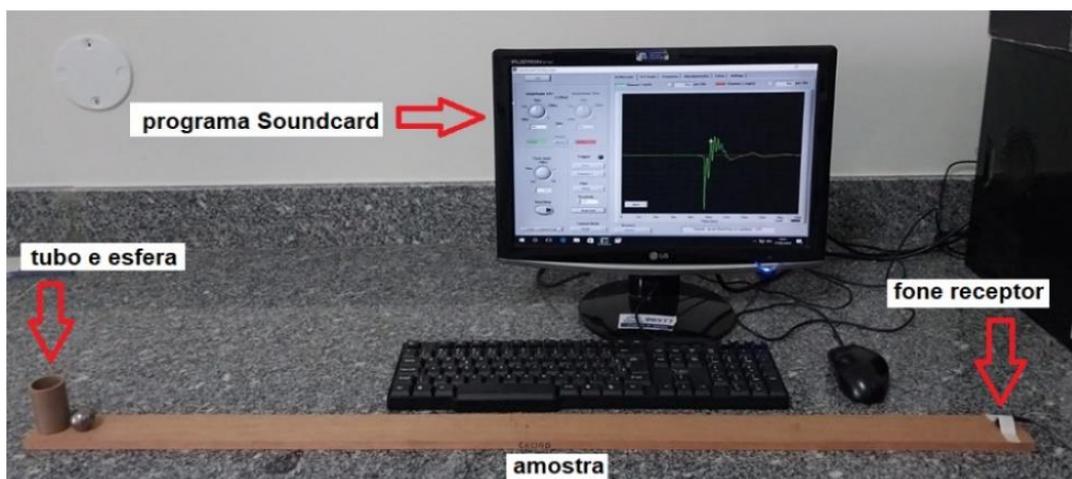
Para analisar a propagação das ondas acústicas nas amostras foi utilizado uma adaptação do experimento realizado por Silva (2009). A proposta do experimento realizado nesta pesquisa consiste no impacto de uma esfera de aço em queda livre sobre a superfície das amostras, onde as vibrações acústicas são capturadas com o auxílio de um programa computacional que simula um osciloscópio digital. A esfera de aço utilizada

para este estudo possui diâmetro de 2,4 cm e massa igual a 54,9 g. A altura de queda livre da esfera sobre a superfície das amostras foi de 4 cm. Para manter a posição idêntica de queda livre foi utilizado um tubo de PVC com 4 cm de altura, onde a esfera foi posicionada na borda do tudo e, em seguida, abandonada para o impacto. O diâmetro do tubo foi de 2,54 cm, que é um pouco maior do que o diâmetro da esfera. A medida da altura de queda livre foi escolhida de modo a não provocar o quique da esfera na superfície das amostras, sendo cada sinal acústico obtido com um único impacto.

Os sinais das ondas acústicas gerados com o impacto da esfera foram capturados com o programa Soundcard Oscilloscope, que consiste em um osciloscópio digital com interface visual semelhante a um osciloscópio convencional. O programa Soundcard Oscilloscope foi disponibilizado por Silva (2009), que utilizou uma metodologia semelhante para a determinação da velocidade do som em amostras de tubos metálicos.

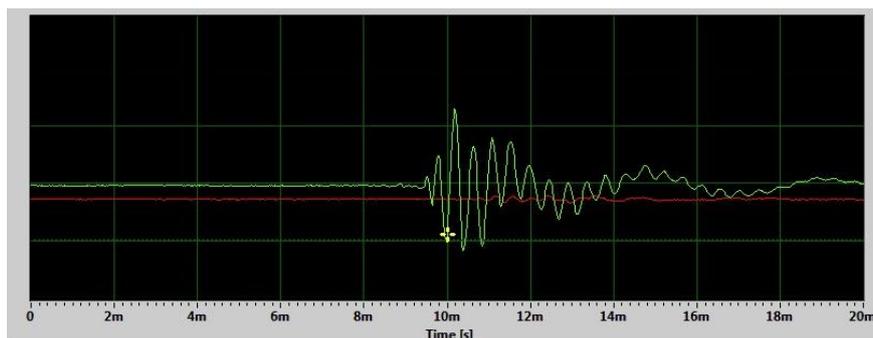
A amplitude dos sinais foi avaliada em função do tempo de percurso da onda acústica ao longo do comprimento das amostras. A faixa de tempo analisada está compreendida entre 0 e 20 milissegundos (ms). Como receptor dos sinais acústicos foi utilizado um fone de ouvido estéreo, Plug P2. O fone foi fixado em uma das extremidades das amostras, enquanto que na outra extremidade foi realizado o impacto com a esfera. Na Figura 3 encontra-se ilustrado a montagem do experimento para medidas. Um exemplo no sinal acústico capturado na tela do computador com o programa Soundcard Oscilloscope está apresentado na Figura 4.

**Figura 3** – Montagem do experimento para captura do sinal acústico nas madeiras



Fonte: autores (2024)

**Figura 4** – Exemplo do sinal acústico capturado na superfície das madeiras

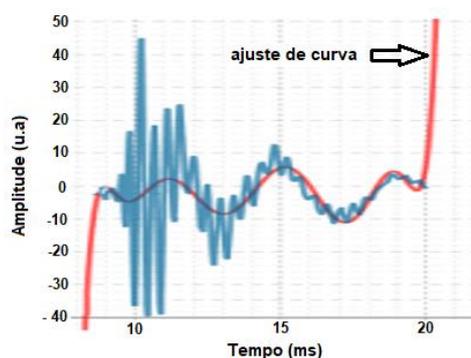


Fonte: autores (2024)

A descrição da metodologia utilizada neste estudo para geração e captura dos sinais acústicos também pode ser encontrada em outros trabalhos que adaptaram o experimento de Silva (2009) para a investigação diferentes materiais utilizados na construção civil, tais como: aço, telha cerâmica e concreto (CARVALHO *et al.*, 2020; GUIMARÃES *et al.*, 2020; RAMOS *et al.*, 2020).

O comportamento do sinal acústico foi analisado com dez medidas realizadas em cada amostra. Para isso, os dados obtidos foram exportados para programa Origin7.0. Em seguida, buscou-se encontrar uma função matemática que melhor representasse o comportamento dos sinais acústicos nas madeiras. Esta análise foi realizada no programa GeoGebra5.0, que pode ser utilizado para análises matemáticas e ajustes de curvas, conforme ilustrado na Figura 5.

**Figura 5** – Exemplo de um ajuste de curva realizado no GeoGebra5.0



Fonte: autores (2024)

Para decompor a função temporal no domínio da frequência foi utilizado o método da Transformada Rápida de Fourier (*FFT*). Nesta etapa, o espectro de frequência do sinal acústico foi obtido com o algoritmo da função  $fft(x)$  do MATLAB R2021b, que calcula a

*FFT* a partir do sinal acústico convertido em um vetor de dados unidimensional. Depois disso, os resultados foram discutidos em função das imagens capturadas na superfície das amostras. As microscopias foram obtidas com um microscópio digital da marca Proscope USB, com aumento de 10 vezes.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade é uma característica física que pode ser diretamente relacionada com as propriedades mecânicas da madeira, sendo um importante indicador da qualidade da madeira serrada. Entretanto, sabe-se que a densidade da madeira é dependente, principalmente, da composição química, estrutura das fibras e proporção entre cerne e alborno (PFEIL; PFEIL, 2003). Para as amostras de Cedro, Ipê e Cumaru foram encontrados os seguintes resultados para a densidade aparente: 512 kg/m<sup>3</sup>, 992 kg/m<sup>3</sup> e 1017 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Estes resultados se aproximam dos valores de referência disponibilizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que são: 530 kg/m<sup>3</sup>, 1010 kg/m<sup>3</sup> e 1090 kg/m<sup>3</sup>, para um teor de umidade em torno de 15% (IPT, 2023a; IPT, 2023b; IPT, 2023c). A diferença entre os resultados pode ser explicada pelo teor de umidade e pela existência de várias espécies de madeira de Cedro, Ipê e Cumaru.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores dos parâmetros utilizados para o cálculo do módulo de elasticidade das amostras ( $E$ ). Para efeito comparativo, também estão apresentados os valores fornecidos pelo IPT (2023) para o módulo de elasticidade da madeira verde ( $E_r$ ).

**Tabela 2** – Parâmetros usados no ensaio de flexão para o cálculo do módulo de elasticidade ( $E$ )

Madeira	$P$ (N)	$L$ (mm)	$I$ (mm <sup>4</sup> )	$\nu$ (mm)	$E$ (MPa)	$E_r$ (MPa)	Referência
Cedro	19,86	900	4.201,67	7,00	10.260	8.336	IPT (2023a)
Ipê	19,86	900	3.970,14	4,00	18.990	15.298	IPT (2023b)
Cumaru	19,86	900	4.046,67	3,00	24.850	18.547	IPT (2023c)

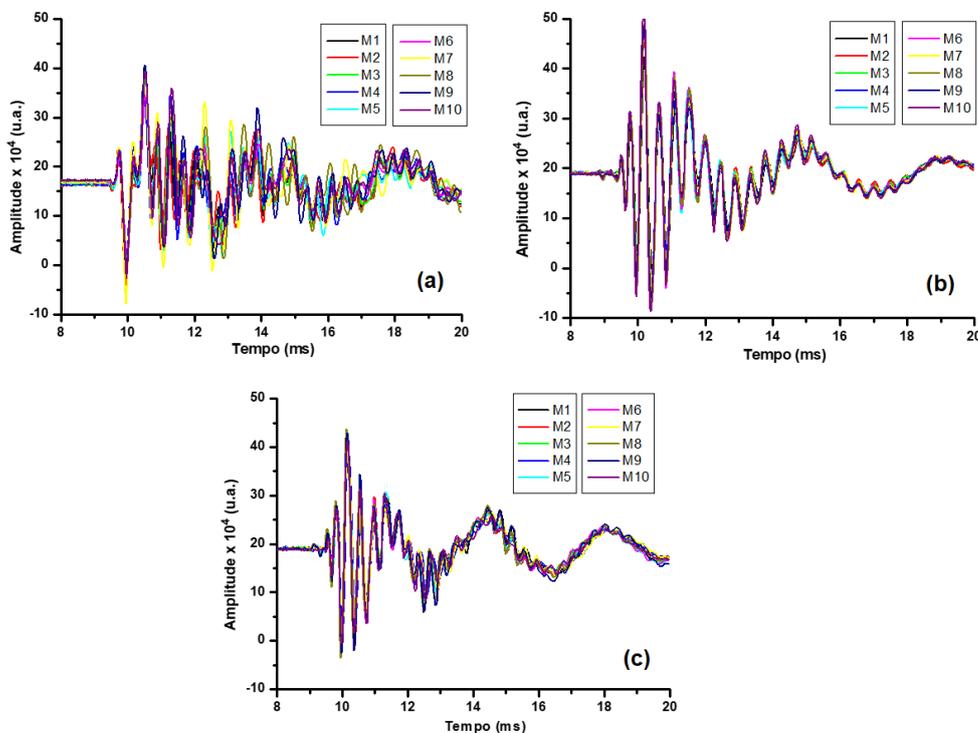
Fonte: autores (2024)

Analisando os resultados nota-se que o módulo  $E$  das amostras foi maior do que os valores de referência  $E_r$ . Esse comportamento era esperado, uma vez que o módulo de elasticidade da madeira verde é obtido com teor de umidade acima de 20%, ou seja, com valor menor de rigidez. A resistência mecânica da madeira serrada também possui uma

relação direta com o valor da densidade aparente. Neste caso, quanto maior o valor de densidade maior será a rigidez da madeira (PFEIL; PFEIL, 2003). Esse fato está de acordo com os resultados da Tabela 2. Além disso, o valor mais baixo da densidade do Cedro justifica o valor mais alto da flecha, que concorda com o menor valor do módulo de elasticidade, independente do valor do momento de inércia.

As medidas dos sinais acústicos para as amostras de Cedro, Ipê e Cumaru, estão mostradas na Figura 6. Neste resultados observa-se a reprodutibilidade da forma das ondas acústicas propagadas na superfície das madeiras, sendo apenas constatada pequenas variações na amplitude das medidas.

**Figura 6** – Reprodutibilidade dos sinais acústicos: (a) Cedro; (b) Ipê e (c) Cumaru



Fonte: autores (2024)

O trecho situado entre 9 e 12 ms delimita a região de maior amplitude dos sinais. Para intervalos de tempo acima de 12 ms nota-se uma queda na amplitude devido a atenuação dos sinais acústicos ao longo do comprimento das amostras.

A variação na amplitude das medidas pode ser observada de forma mais clara na amostra de Cedro, cujo sinal acústico foi apresentado na Figura 6(a). Para as amostras de Ipê e Cumaru, esta variação é pouco perceptível, conforme pôde ser observado nas

Figuras 6(b) e 6(c), respectivamente. A variação na amplitude das medidas é decorrente do procedimento adotado no experimento para o abandono da esfera de aço. Este comportamento também foi observado por outros autores na investigação de outros materiais diferentes da madeira (CARVALHO *et al.*, 2020; GUIMARÃES *et al.*, 2020; RAMOS *et al.*, 2020). Para determinar a amplitude máxima obtida nas amostras foram calculados os valores médios das amplitudes dos sinais acústicos expressos em unidade arbitrária (u.a.). Esses resultados estão apresentados na Tabela 3.

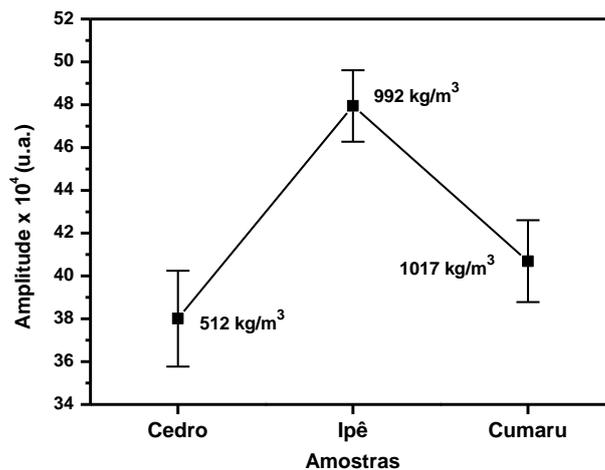
**Tabela 3** – Amplitude dos sinais acústicos medidos nas amostras

Medida do sinal acústico	Amplitude x 10 <sup>4</sup> (u.a.)		
	Cedro ( $\rho = 512 \text{ kg/m}^3$ )	Ipê ( $\rho = 992 \text{ kg/m}^3$ )	Cumaru ( $\rho = 1017 \text{ kg/m}^3$ )
M1	36,13	45,43	39,85
M2	39,20	45,71	40,94
M3	37,77	47,97	38,80
M4	34,30	47,88	38,46
M5	39,74	47,61	39,01
M6	34,64	47,65	42,66
M7	39,78	48,39	39,26
M8	38,88	48,77	43,81
M9	40,65	48,53	42,88
M10	39,05	51,46	41,24
<b>Média</b>	<b>38,01</b>	<b>47,94</b>	<b>40,69</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>2,24</b>	<b>1,67</b>	<b>1,91</b>

Fonte: autores (2024)

Comparando os resultados percebe-se que, no Cedro, a amplitude média do sinal acústico em unidade arbitrária foi a menor entre as amostras. O maior valor do desvio-padrão justifica uma variação mais perceptível na amplitude das medidas dos sinais, mostrado na Figura 6(a). Conforme discutido anteriormente, o Cedro também possui o menor valor de densidade aparente. Entretanto, a densidade pode não estar diretamente relacionada com o a amplitude média dos sinais obtidos nas amostras. Isso porque o maior valor da amplitude foi observado no Ipê, que possui valor intermediário de densidade aparente. O comportamento da amplitude dos sinais acústicos em função da densidade aparente está apresentado na Figura 7.

**Figura 7** – Amplitude média dos sinais acústicos

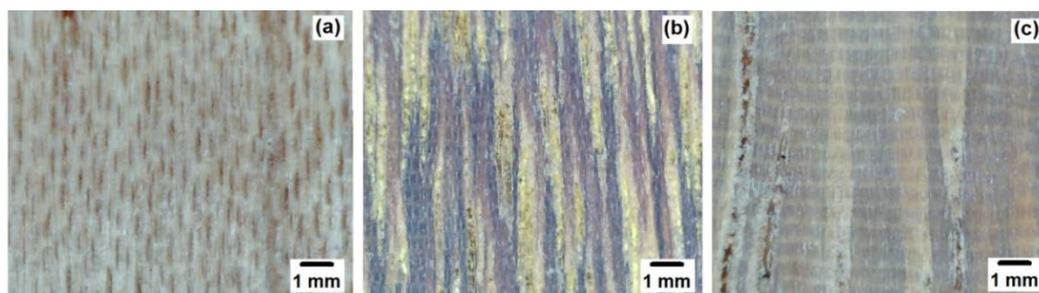


Fonte: autores (2024)

Era esperado que o impacto produzido pela esfera de aço fosse mais atenuado na superfície da amostra com menor valor de densidade aparente. Curiosamente, o comportamento observado na Figura 7 revela uma influência secundária da densidade na amplitude média dos sinais acústicos. Uma explicação para a queda da amplitude no sinal do Cumaru pode ser encontrada analisando a superfície das amostras. Sabe-se que a propagação das ondas acústicas é muito dependente da morfologia de superfície. Superfícies planas e lisas podem favorecer a propagação das ondas acústicas, enquanto que as superfícies irregulares e porosas podem atenuá-las. Assim, acredita-se que as diferentes morfologias de superfície são responsáveis pelas amplitudes dos sinais, independentemente do valor da densidade aparente.

Na Figura 8 estão apresentadas as imagens de microscopia óptica capturadas nas superfícies das amostras. Analisando o resultado na Figura 8(a), observa-se que a superfície do Cedro é constituída por diversos poros alinhados de forma unidirecional ao longo do comprimento da amostra. A alta porosidade pode justificar o valor mais baixo da densidade e a maior atenuação na amplitude média do sinal acústico. Por outro lado, no Ipê nota-se a presença de diferentes fibras em cores claras e escuras (variando entre amarelo, marrom claro, marrom escuro e preto), dispostas no sentido longitudinal da amostra. Além disso, existem pequenos poros nas regiões constituídas pelas fibras mais claras. Todas essas características podem ser observadas na imagem da Figura 8(b). A menor porosidade e o valor mais alto da densidade são características que podem estar associadas ao maior valor de amplitude do sinal acústico.

**Figura 8** – Microscopia óptica na superfície das amostras:(a) Cedro; (b) Ipê; (c) Cumaru



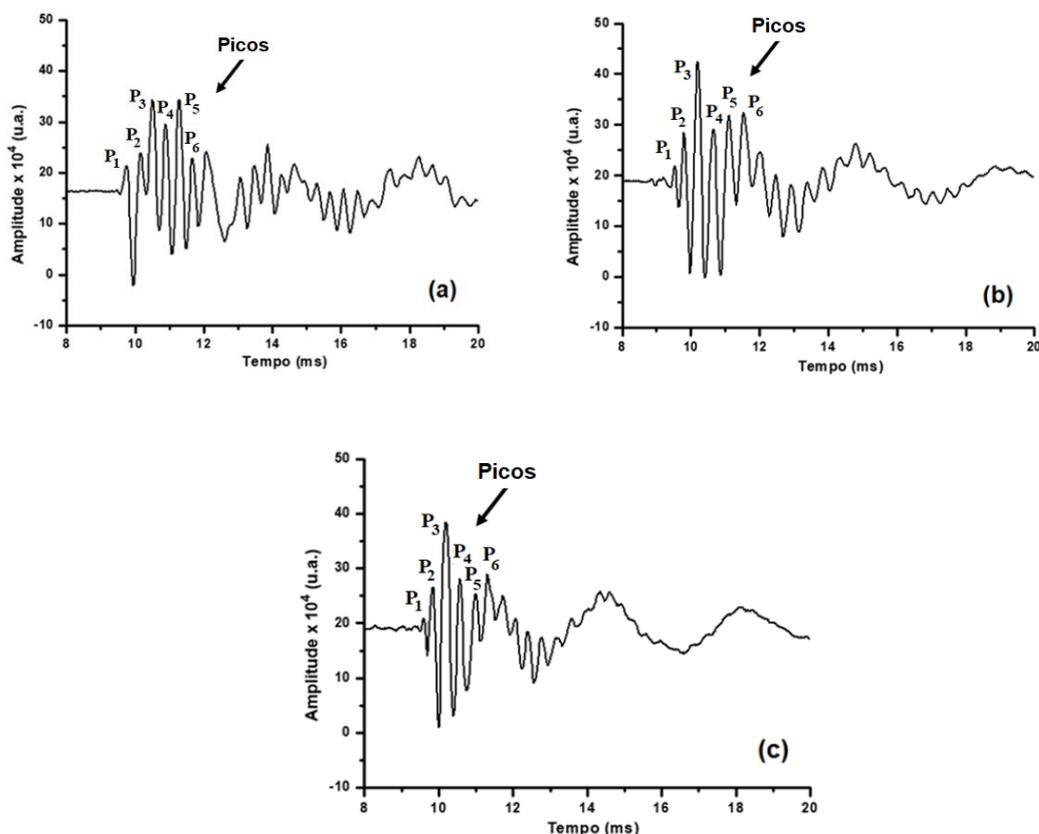
Fonte: autores (2024)

A superfície do Cumaru também é constituída por fibras em cores claras e escuras (variando entre o marrom claro e escuro), que estão alinhadas no sentido longitudinal. Estas fibras são mais largas do que as fibras observadas no Ipê e estão intertravadas por outras fibras paralelas dispostas no sentido transversal da amostra. Nota-se ainda a presença de fendilamentos em algumas regiões constituídas pelas fibras mais claras. Embora a amostra de Cumaru possua uma densidade mais alta, a presença de fendilamentos e fibras transversais pode justificar a queda na amplitude média do sinal.

A forma das ondas acústicas propagadas na superfície das amostras são muito semelhantes entre si, como pode ser observado na Figura 10. No trecho de maior amplitude dos sinais médios, entre 9 e 12 ms, observa-se a presença de seis picos com amplitudes alternadas, que se comportam de forma semelhante, mas estão localizados em posições diferentes sobre o eixo do tempo.

Nos sinais médios foram observados seis picos característicos. No Cedro, estes picos estão situados nas posições:  $P_1 = 9,751$  ms;  $P_2 = 10,159$  ms;  $P_3 = 10,499$  ms;  $P_4 = 10,884$  ms;  $P_5 = 11,270$  ms e  $P_6 = 11,678$  ms. No Ipê, os picos estão deslocados para as seguintes posições:  $P_1 = 9,796$  ms;  $P_2 = 10,204$  ms;  $P_3 = 10,658$  ms;  $P_4 = 11,088$  ms;  $P_5 = 11,519$  ms e  $P_6 = 11,995$  ms. Por outro lado, no Cumaru os picos estão localizados em:  $P_1 = 9,819$  ms;  $P_2 = 10,181$  ms;  $P_3 = 10,567$  ms;  $P_4 = 10,998$  ms;  $P_5 = 11,293$  ms e  $P_6 = 11,315$  ms. Embora as posições dos picos sejam distintas, é importante destacar que é difícil diferenciá-los visualmente nos sinais acústico e relacioná-los com a densidade aparente ou com qualquer outra propriedade. Neste sentido, buscou-se identificar com métodos computacionais alguma característica do sinal acústico que possa ser utilizada para diferenciar as madeiras.

**Figura 10** – Sinais acústicos médios para as amostras:  
(a) Cedro; (b) Ipê e (c) Cumaru



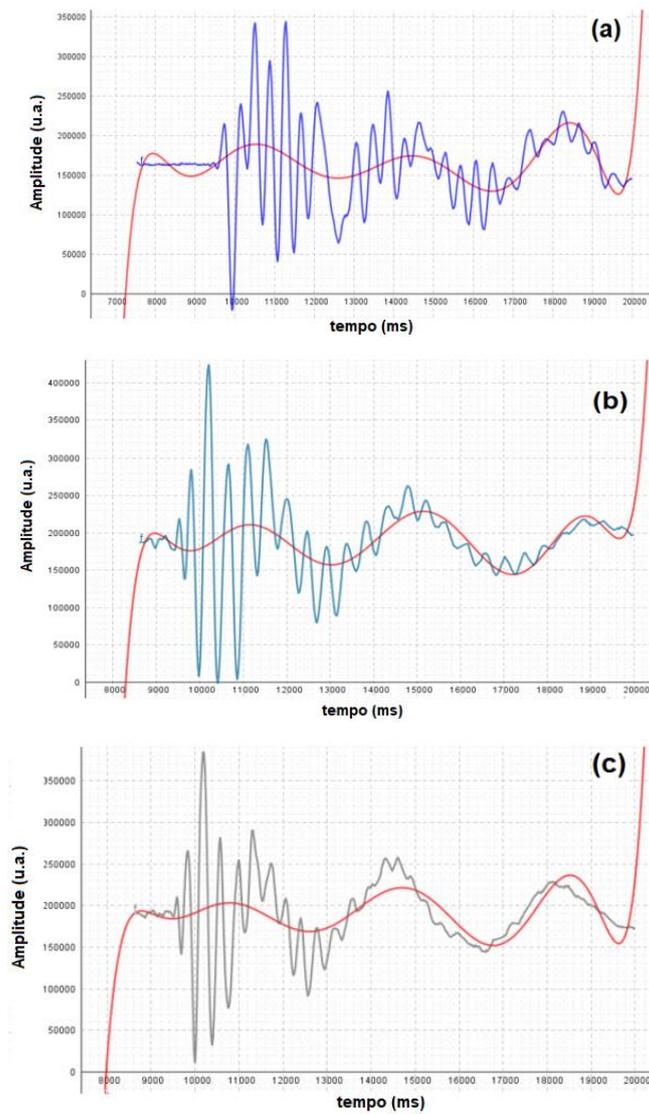
Fonte: autores (2024)

Com a utilização do programa GeoGebra5.0 foi possível encontrar, por meio de um modelo de regressão polinomial, uma função matemática que melhor descreve o comportamento do sinal acústico médio. Esse resultado está apresentado na Figura 11. Na Tabela 3 estão apresentadas as funções polinomiais que descrevem o comportamento gráfico dos sinais acústicos mostrados na Figura 10. A partir do ajuste das curvas foram encontradas funções polinomiais do 9º grau para todas as amostras. Os valores dos coeficientes no polinômio  $h(x) = a_9x^9 + a_8x^8 + a_7x^7 + a_6x^6 + a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + C$ , crescem do Cedro para o Ipê e decaem para o Cumaru. Este comportamento é semelhante ao observado na Figura 7 para a amplitude média dos sinais acústicos. Entretanto, do 9º ao 6º grau, os coeficientes possuem valores numericamente insignificantes para a análise computacional, e por este motivo, foram utilizados nas discussões apenas os polinômios a partir do 5º grau.

Supondo que as funções polinomiais fossem de graus diferentes para as amostras, estas funções poderiam ser utilizadas para diferenciar as espécies de madeira, que por sua

vez, possuem propriedades físicas e mecânicas distintas. Por exemplo, isso poderia ocorrer se nas amostras de Cedro, Ipê e Cumaru fossem encontradas, respectivamente, funções polinomiais do tipo:  $h(x) = a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + C$ ,  $h(x) = a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + C$  e  $h(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + C$ .

**Figura 11** – Ajuste do modelo de regressão polinomial: (a) Cedro; (b) Ipê e (c) Cumaru



Fonte: autores (2024)

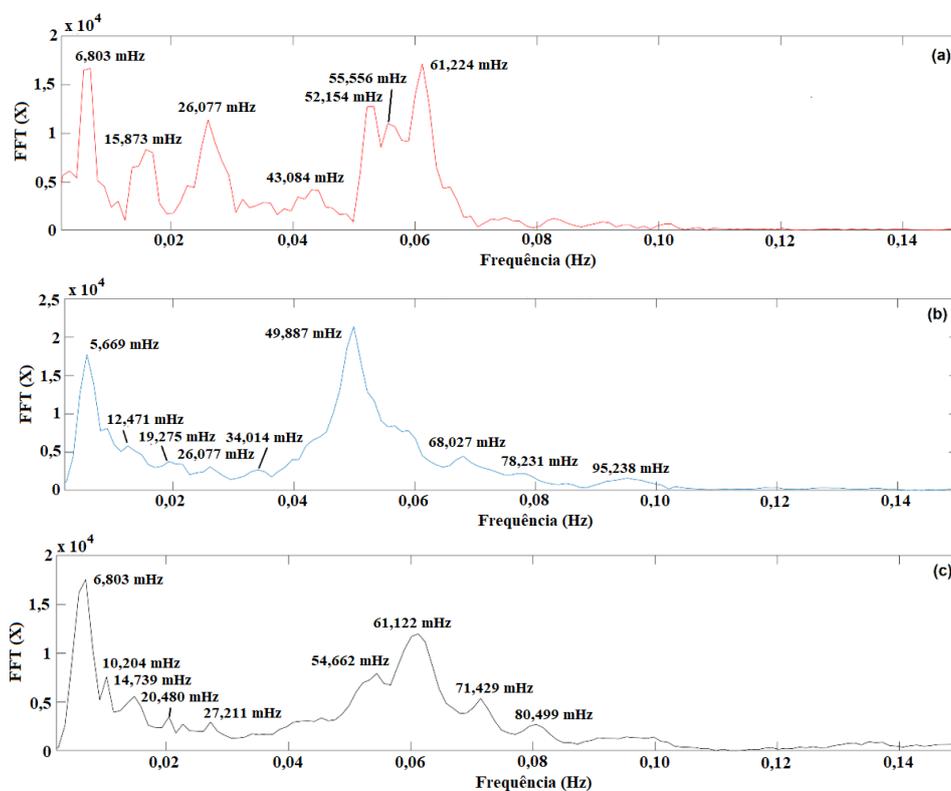
**Tabela 3** – Funções polinomiais obtidas no programa GeoGebra5.0

Função: $h(x) = a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + C$
<b>Cedro</b>
$h(x) = 0,0000000018x^5 - 0,000023056x^4 + 0,19557397x^3 - 1051x^2 + 3246719x - 4391952779$
<b>Ipê</b>
$h(x) = 0,0000000047x^5 - 0,000063823x^4 + 0,57265248x^3 - 3265x^2 + 10733435x - 15502428824$
<b>Cumaru</b>
$h(x) = 0,0000000033x^5 - 0,000043237x^4 + 0,37803566x^3 - 2103x^2 + 6740153x - 9487533997$

Fonte: autores (2024)

Outra tentativa de diferenciar os sinais acústicos por métodos computacionais consistiu na utilização da Transformada Rápida de Fourier (*FFT*) ilustrada na Figura 12. O espectro de *FFT* do Cedro, Figura 12(a), é constituído por um grupo de picos localizados em uma faixa de frequência entre 6,8 e 61,2 mHz.

**Figura 12** – Espectro de *FFT* para as amostras: (a) Cedro, (b) Ipê e (c) Cumaru



Fonte: autores (2024)

Por outro lado, para as amostras de Ipê e Cumaru, Figuras 12(b) e (c), respectivamente, são observados grupos distintos de picos excitados em uma faixa de frequência mais ampla, entre 5,7 e 95,2 mHz. Uma análise comparativa entre espectros revela a presença de um pico comum nas amostras de Cedro e Ipê, que está situado em 26,077 mHz. Este pico possui uma alta amplitude no Cedro, indicando que é mais difícil excitá-lo no Ipê. De forma análoga, entende-se que o pico a 6,806 mHz é facilmente excitado nas amostras de Cedro e Cumaru. Com exceção dos picos situados a 6,806 mHz e 26,077 mHz, os demais picos nos espectros de *FFT* são distintos.

Sabe-se que toda forma de onda, inclusive a onda acústica, é constituída por um somatório de ondas senoidais com diferentes frequências, amplitudes e fases (DELYRA, 2014). Conforme relatado anteriormente, o impacto produzido pela esfera de aço sobre a superfície das amostras gera ondas acústicas com movimentos oscilatórios que excitam várias frequências de vibração, sendo esses valores influenciados pela superfície de propagação da onda acústica e pelas características físicas e mecânicas das madeiras.

Como os espectros de *FFT* são distintos, é possível utilizá-los para a identificação das espécies de madeiras por meio do agrupamento dos picos que estão localizados em diferentes frequências. Por exemplo, o espectro de *FFT* do Cedro pode estar associado aos valores de flexão ( $f = 62,8$  MPa), dureza Janka ( $dJ = 3.138$  N), tração normal às fibras ( $\sigma_N = 5,1$  MPa) e resistência ao cisalhamento ( $\tau = 7,1$  MPa), cujos valores são maiores no Ipê ( $f = 160,5$  MPa;  $dJ = 10.807$  N;  $\sigma_N = 11,1$  MPa e  $\tau = 15,4$  MPa), mas decaem no Cumaru ( $f = 123,8$  MPa;  $dJ = 9.787$  N;  $\sigma_N = 7,5$  MPa e  $\tau = 14,2$  MPa) (IPT, 2003a; IPT, 2003b; e IPT, 2003c). Esse comportamento também é semelhante àquele observado na Figura 7 para os sinais acústicos médios das madeiras.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo permitiram concluir que os sinais acústicos nas amostras de Cedro, Ipê e Cumaru são muito semelhantes entre si, sendo difícil relacioná-los de forma clara com suas propriedades físicas e mecânicas. Por outro lado, os espectros de *FFT* obtidos no MATLAB, aliados às imagens de microscopia óptica, reforçam as relações existentes entre a morfologia da superfície, a amplitude do sinal e a resistência mecânica das madeiras. Embora a metodologia utilizada tenha sido capaz de identificar grupos de frequências que parecem estar associados aos valores das propriedades mecânicas, outros estudos devem ser realizados com um número maior de

amostras para que essa proposta de investigação seja consolidada como uma alternativa rápida para a investigação de diferentes espécies de madeira.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas da Universidade Estadual de Montes Claros pela utilização de suas dependências e infraestrutura.

## REFERÊNCIAS

CARVALHO JR., Á. B.; LOPES, M. H. T.; CARVALHO, A. C. N. M.; VIEIRA, A. W.; GARCIA, D. C. F. **Utilização de ondas acústicas para caracterização de telhas cerâmicas: uma proposta didática de ensaio não destrutivo**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 42, e20200340, 2020.

COSTA, O. A. L. **Velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira para diferentes condições de umidade**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2005.

DELYRA, J. L. **Métodos matemáticos para física e engenharia volume 2 - transformadas de fourier**. 1. ed. Rio de Janeiro: Livraria da Física, 2014.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A.D. **Ensaaios dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GUIMARÃES, T. C.; CARVALHO JR., Á. B.; GOMES, G. F. M.; LOPES, M. H. T.; MARTINS, A. P. G.; GARCIA, D. C. F. **Determinação da Resistência à Compressão do Concreto Por Meio da Propagação de Ondas Acústicas**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n° 8, 2020.

**DIVERSIFICAÇÃO em madeiras**. IPT, São Paulo, 29 de jun. de 2011. Disponível em: <[https://www.ipt.br/noticia/364-diversificacao\\_em\\_madeiras.htm](https://www.ipt.br/noticia/364-diversificacao_em_madeiras.htm)>. Acesso em: 09 de ago. de 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICA. IPT, 2023(a). **Informações sobre madeiras**. Disponível em: < [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/29-a\\_madeira\\_de\\_cedro\\_e\\_facil\\_de\\_aplainer\\_serrar\\_lixar\\_furar\\_pregar\\_colar\\_e\\_tornear\\_a\\_presenta\\_bom.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/29-a_madeira_de_cedro_e_facil_de_aplainer_serrar_lixar_furar_pregar_colar_e_tornear_a_presenta_bom.htm)>. Acesso em: 10 de ago. de 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICA. IPT, 2023(b). **Informações sobre madeiras**. Disponível em: < [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/38-a\\_madeira\\_de\\_ipe\\_e\\_moderadamente\\_dificil\\_de\\_trabalhar\\_principalmente\\_com\\_ferramentas\\_manuais\\_que\\_pe.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/38-a_madeira_de_ipe_e_moderadamente_dificil_de_trabalhar_principalmente_com_ferramentas_manuais_que_pe.htm)>. Acesso em: 10 de ago. de 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICA. IPT, 2023(c). **Informações sobre madeiras**. Disponível em: < [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/10-cumaru.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/10-cumaru.htm) >. Acesso em: 10 de ago. de 2023.

MELLO, R. L. de. **Projetar em madeira: uma nova abordagem**. Tese (Mestrado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, p.65. 2007. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/3133>>. Acesso em: 09 de ago. de 2023.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.  
RAMOS, S. G. *et al.* **Utilização de ondas acústicas para avaliação da corrosão superficial em barras de aço**. Brazilian Journal of Development, v. 6, p. 62167-62179, 2020.

RAMOS, S. G.; CARVALHO JÚNIOR, A. B.; LOPES, M. H. T.; CANGUSSU, E. A. O.; GARCIA, D. C. F.; XAVIER, P. R. R. **Utilização de ondas acústicas para avaliação da corrosão superficial em barras de aço**. Brazilian Journal of Development, vol. 6, n° 8, 2020.

RAMOS, S. G. **Determinação das propriedades elásticas e físicas de ligas de alumínio utilizando medidas ultrassônicas e análise computacional**. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas – UNIMONTES, 2023.

ROCHA, S. O. N. **Aplicação de ondas acústicas para caracterização de madeira de diferentes espécies**. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas – UNIMONTES, 2021.

SILVA, K. N. **Medindo a velocidade do som em um cano de metal – uma proposta de experimento demonstrativo**. I Simpósio Nacional de Ensino de Ciência e Tecnologia, 2009.