

Avaliação das propriedades acústicas de mogno africano (*Khaya ivorensis*) submetido a tratamento térmico em estufa e autoclave

Evaluation of the acoustic properties of African mahogany (*Khaya ivorensis*) subjected to heat treatment in an oven and autoclave

Francisco Antonio Lopes Laudares¹, Alexandre Miguel do Nascimento¹,
Renata Nunes Oliveira¹, Rogério Rodrigues dos Santos¹, Fabrizia Dias Guedes Moura¹

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. BR- 465, 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil.

e-mail: laudares@ufrj.br; alexmnasci@gmail.com; renatanunes.ufrj@gmail.com; contato.rogeriosantos@outlook.com; fabrizia_dias_rj@yahoo.com.br

RESUMO

O presente trabalho avaliou o efeito do tratamento térmico no comportamento acústico em madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) submetida a dois tipos de tratamentos, denominados tratamento a seco (TS), realizado em mufla elétrica a temperaturas de 130, 160 e 190 °C, e tratamento hidrotérmico (TH), utilizando vapor de água em autoclave nas temperaturas e pressões de 123 °C e 1,2 kgf.cm⁻² e 160 °C e 6,0 kgf.cm⁻², respectivamente. Os tratamentos foram realizados em conformidade com um planejamento experimental. Após os tratamentos, as amostras foram submetidas à avaliação acústica através de ensaios por vibração mecânica, utilizando a técnica de excitação por impulso transversal, como previsto na norma ASTM-E1876. As grandezas acústicas determinadas foram: frequência de ressonância transversal ($fr_{(Tr)}$), decaimento logarítmico transversal ($DI_{(Tr)}$), módulo de elasticidade dinâmico específico transversal ($E_{esp(Tr)}$) e eficiência da conversão acústica transversal ($ECA_{(Tr)}$). De acordo com os resultados obtidos, a madeira modificada em autoclave a 123 °C se destacou em relação aos outros tratamentos, inclusive dos conjugados. Foram verificados aumentos de 7,3 % para $fr_{(Tr)}$, 10,8 % para o $E_{esp(Tr)}$ e 26,4 % para o $ECA_{(Tr)}$, e redução de 11,9 % para DI . Tais resultados indicam otimização das propriedades do mogno africano para aplicações acústicas.

Palavras-chave: Frequência de ressonância; Excitação por Impulso; Decremento logarítmico; Atenuação acústica; Módulo de elasticidade dinâmico.

ABSTRACT

The present work evaluated the effect of thermal treatment on the acoustic behavior of african mahogany wood (*Khaya ivorensis* A. Chev.) submitted to two types of thermal treatments called dry treatment, carried out in an oven at temperatures of 130, 160 and 190 °C, and wet treatment, using steam in an autoclave at temperatures and pressures of 123 °C and 1.2 kgf.cm⁻² and 160 °C and 6.0 kgf.cm⁻², respectively. Conjugated treatments were also carried out, where part of the samples first went through wet treatment and after that, through dry treatment. After treatments, the samples were submitted to acoustic evaluation through mechanical vibration tests, using the transverse impulse excitation technique, as reported for in the ASTM-E1876 standard. The fundamental resonance frequency (fr), the specific transverse dynamic (E_{spe}), the logarithmic decrement of damping (LDD) and the acoustic conversion efficiency (ACE) were determined. According to the results obtained, the wood treated only by steam in an autoclave at 123 °C stood out in relation to the other treatments, including the conjugated was. An increase of 7.3 % was verified for the fr , 10.8 % for E_{esp} and 26.4 % for ECA , and reduction of 11.9 % for DI . It was observed the optimization of African mahogany's acoustic properties.

Keywords: Resonance frequency; Impulse Excitation; logarithmic damping decrement; Acoustic attenuation; Dynamic modulus of elasticity.

1. INTRODUÇÃO

O tratamento térmico é realizado quando se deseja alterar a estrutura física e química da madeira com a intenção de provocar degradação ou rearranjo dos seus principais constituintes, modificando dessa forma algumas de suas propriedades físicas e mecânicas. Da mesma forma, modificações da madeira utilizando processos de acetilação; tratamentos com melamina e fenol formaldeído [1, 2]; e modificação biológica com fungos que mancham ou destroem a madeira [1, 3] podem ser usados para modificar as propriedades relevantes.

Entre as principais modificações ocorridas na madeira estão a diminuição da higroscopicidade, a degradação das hemiceluloses, e redução da sorção de água, favorecendo assim a estabilidade dimensional da madeira [1, 4]. Contudo, os efeitos finais do tratamento utilizando processos térmicos estão correlacionados diretamente à temperatura máxima do processo, à taxa aquecimento, à duração do tratamento, às condições da atmosfera circundante, como por exemplo, a utilização de água na forma de vapor em uma autoclave [5], convecção atmosférica no interior de uma estufa [6, 7], ou presença de nitrogênio (N_2) [8]. Em adição, contribuem para o resultado do tratamento térmico as condições e propriedades iniciais da madeira, como as dimensões, a densidade aparente e a espécie utilizada [1, 6]. Portanto, dependendo da utilização final da madeira, os parâmetros do tratamento devem ser ajustados.

Dentro desse contexto, foi observado [2, 8–12] que ao variar as características físicas (densidade (ρ), por exemplo) e mecânicas (módulo de elasticidade (E), por exemplo) da madeira utilizando tratamentos térmicos, podem-se alterar as grandezas vibracionais associadas à madeira acústica, tornando-a mais atrativa. As principais grandezas associadas a uma madeira acústica são: módulo de elasticidade específico (E/ρ) e coeficiente de atenuação acústica ($\tan\delta$) [9].

O módulo de elasticidade específico (E_{esp}) representa a razão entre o módulo de elasticidade e a densidade (E/ρ), e é utilizado para avaliar o desempenho de vibração acústica da madeira. Alto E/ρ representa maior eficiência de vibração da madeira [9]. A atenuação acústica é a característica física que representa a capacidade do material de dissipar a energia acústica, sabe-se que quanto menor for esse fator, melhor será a qualidade acústica da madeira [9, 11, 13].

A partir dessas avaliações, PFRIEM [14] mostra que tratamento térmico moderado com temperaturas entre 160 e 180 °C, em espécies tropicais, resultou em mudanças nas propriedades físicas e mecânicas na madeira. Dentre as mudanças observadas estão o aumento da estabilidade dimensional, do módulo de elasticidade e da propagação da velocidade do som, além da redução da atenuação acústica.

DANIHELOVÁ *et al.* [13] utilizaram processo de tratamento hidrotérmico semelhante ao utilizado pela Associação ThermoWood®, em madeira de *Robinia pseudoacacia*. Observaram aumento nos valores dos módulos de elasticidade, redução da densidade, também observado por ZHU *et al.* [8] em madeiras de *Picea jezoensis* submetidas a tratamentos com nitrogênio (N_2). Com isso, os autores relataram aumento no E_{esp} conforme se aumenta a temperatura de tratamento.

MODES *et al.* [6] utilizaram a combinação de tratamentos em autoclaves (130 °C e 2,0 kgf.cm⁻²) e estufas (160 °C) em madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*, e avaliaram seus efeitos nas propriedades mecânicas. Observaram aumento do módulo de elasticidade em madeira de *Pinus taeda* em tratamento combinado, e redução quando submetidos apenas em estufa. Para madeira de *Eucalyptus grandis* houve aumento do módulo de elasticidade tanto para tratamento combinado quanto para apenas em estufa, sendo este o maior.

MANIA *et al.* [15] estudaram como o tratamento térmico afeta o desempenho acústico em madeiras de *Picea abies*. Para isso, estabeleceram parâmetros de tratamento que poderiam garantir o maior valor possível do E_{esp} . Os autores relataram que a densidade da madeira diminuiu ligeiramente em temperaturas de 120 e 160 °C, e diminuição mais acentuada à 180 °C. Além disso, houve aumento do módulo de elasticidade para tratamentos até 160 °C, e redução para tratamentos a 180 °C. Segundo BUCUR [9], madeiras com alto módulo de elasticidade e baixa densidade podem ser classificadas como de excelente qualidade acústica.

ZATLOUKAL *et al.* [16] estudaram as propriedades acústicas em madeiras de *Picea abies* tratados termicamente a 180 e 200 °C. Os autores verificaram redução na densidade e na atenuação acústica ($\tan\delta$), aumento da velocidade do som (v_{som}), do módulo de elasticidade (E) e da eficiência da conversão acústica (ECA). STRAŽE e ŽVEPLAN [12] mostraram que o tratamento hidrotérmico em atmosfera de pressão e vapor a 135 °C melhorou o desempenho acústico de madeiras de *Fagus sylvatica*. Os autores constataram reduções da densidade básica (ρ) e da atenuação acústica ($\tan\delta$), aumentos da velocidade do som, e manutenção do módulo de elasticidade. Com isso, pode-se concluir que houve aumento de E_{esp} e ECA .

Neste trabalho, madeira de mogno africano foi tratada em mufla elétrica, denominado tratamento a seco (TS), nas temperaturas de 130, 160 e 190 °C, e em autoclave, denominado tratamento hidrotérmico (TH), temperatura e pressão de 123 °C/1,2 kgf.cm⁻² e 160 °C/6,0 kgf.cm⁻². Os tratamentos hidrotérmicos conjugados

(THC) respeitaram primeiramente o TH e posteriormente TS. Após os tratamentos, as amostras foram submetidas a testes acústicos utilizando como base a norma ASTM-E1876/21 [17] para avaliar a frequência natural de vibração (f_n), o módulo de elasticidade dinâmico específico (E_{esp}), o decremento logarítmico (DI) e a eficiência da conversão acústica (ECA).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Produção e caracterização das amostras

Para a realização deste estudo foi utilizada madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.), obtida no campus da UFRRJ e EMBRAPA, no município de Seropédica, RJ, a partir de árvores com aproximadamente 30 anos de idade. Pranchões radiais-ortogonais foram retirados das toras com moto serra e posteriormente secos ao ar. Destas pranchas foram obtidos prismas radiais com dimensões de 7,0 (tangencial), 70,0 (radial) e 270,0 (longitudinal) (mm³), e climatizadas em ambiente com temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 3 %. Posteriormente foram confeccionadas 144 amostras com dimensões de 5,0 (tangencial), 25,0 (radial) e 180 (longitudinal) (mm). Essas amostras foram novamente climatizadas na condição citada anteriormente.

2.2. O tratamento térmico

A Tabela 1 apresenta o delineamento experimental utilizado neste trabalho. Para o Tratamento Hidrotérmico (TH) foi utilizada autoclave e digestor da marca RegMed, modelo AU/E – 20, onde as amostras foram submetidas às temperaturas de 123 °C sob pressão de 1,2 kgf.cm⁻², por 60 minutos, e 160 °C 6,0 kgf.cm⁻², por 70 minutos. Para o Tratamento a seco (TS) foi utilizada mufla elétrica laboratorial, da marca Linn Elektro Therm, com sistema de controle de tempo e temperatura. Os tratamentos hidrotérmicos conjugados (THC) compreendem tratamentos hidrotérmicos (TH) seguidos de tratamentos a seco (TS).

Os TS foram realizados em quatro etapas, sendo elas: i) aquecimento das amostras até 100 °C durante 30 minutos para eliminação completa da água; ii) aumento gradativo da temperatura de 100 °C até a temperatura final do tratamento (130, 160 ou 190 °C) com taxa de aquecimento de 1,6 °C/min; iii) permanência na temperatura final do tratamento por 20 minutos; e iv) resfriamento do material até a temperatura ambiente. Ao final dos tratamentos, as amostras foram climatizadas a temperatura de 20 °C e 65 % de umidade relativa (UR) e ensacadas ao atingirem massa constante.

As amostras foram medidas na espessura, largura e comprimento, foi determinada a densidade aparente, e posteriormente, análise de vibração através da técnica de vibrações mecânicas, utilizando o método de excitação por impulso no ensaio de vibração transversal. Assim foram obtidas as informações da frequência fundamental (f_r), no primeiro modo de vibração (primeiro harmônico), do módulo de elasticidade dinâmico específico (E_{esp}), da atenuação acústica, ou decremento logarítmico (DI), e da eficiência da conversão acústica (ECA).

2.3. Determinação do teor de umidade de equilíbrio (TU%) e densidade aparente (ρ)

Após os tratamentos e a climatização da madeira (20 °C e 65 % UR), as amostras foram pesadas em uma balança analítica Bioprecisa, modelo JH2102, com capacidade de 2100,00 ($\pm 0,01$) g. As dimensões de espessura, largura, e comprimento foram realizadas utilizando micrômetro e paquímetro, com precisão de 0,001 mm e 0,01 mm, respectivamente. A pesagem e medição foram feitas após as massas ficarem constantes (indicando equilíbrio com o ambiente climatizado) instantes antes das avaliações acústicas. Deste modo, o volume das amostras e suas massas foram obtidos, foram calculados, posteriormente, o teor de umidade e a densidade aparente.

Tabela 1: Delineamento experimental e número de tratamentos resultantes.

MUFLA (°C)	TRATAMENTO A SECO	AUTOCLAVE	
		123 °C E 1,2 kgf.cm ⁻²	160 °C E 6,0 kgf.cm ⁻²
Controle	T1	T5	T9
130	T2	T6	T10
160	T3	T7	T11
190	T4	T8	T12

Observação: Os tratamentos entre T1 e T4 foram apenas aquecidos em mufla, nas respectivas temperaturas. Os demais tratamentos foram primeiramente tratados em autoclave posteriormente tratados em mufla.

Para cálculo do teor de umidade de equilíbrio, todas as amostras foram colocadas em estufa para se obter suas massas secas. Após massa constante, foi aplicada a Equação 1 para determinação do teor de umidade de equilíbrio, e a Equação 2, para a densidade aparente [18].

$$TU\% = 100 \times \frac{(M_{TU} - M_{SC})}{M_{SC}} \quad (1)$$

em que M_{TU} é a massa da amostra no teor de umidade de equilíbrio (kg); M_{SC} , a massa da amostra após secagem em estufa à temperatura de 103 ± 2 °C, até massa constante (kg); $TU\%$ é o teor de umidade da amostra com relação massa seca.

A densidade aparente (ρ) é definida como a razão entre a massa da madeira e seu volume em um determinado teor de umidade.

$$\rho = \frac{M_{TU}}{V_{TU}} \quad (2)$$

em que, V_{TU} o volume da amostra (m^3), ambos com mesmos teores de umidade de equilíbrio.

2.4. Ensaio de vibração transversal

O ensaio acústico seguiu a norma ASTM – E1876 [17] que descreve o método de vibração em amostras prismáticas com extremidades livres. Esta norma estabelece que a amostra fique suspensa sobre elastômeros em dois pontos de apoio paralelos entre si localizados a uma distância de $0,224 \times L$ das extremidades livres da amostra, sendo L o comprimento da amostra. Estes dois pontos coincidem com os pontos nodais para o primeiro harmônico [17]. Impactos foram desferidos transversalmente no centro da amostra por meio de um martelo devidamente dimensionado, conforme descrito na norma (Figura 1).

As ondas sonoras são captadas por microfone localizado próximo à amostra e na mesma direção onde ocorre o impacto. Os sinais acústicos captados pelo microfone são transformados do domínio do tempo para o domínio das frequências pela Transformada Rápida de Fourier (FFT) por meio do software Fast Fourier Analyzer (FFT Analyzer) da FAKOPP® Enterprise. O pico espectral obtido corresponde à frequência de ressonância no primeiro modo de vibração transversal ($f_{(Tr)}$) da amostra ensaiada [13, 19, 20]. Com esta obteve-se então grandezas acústicas secundárias como o módulo de elasticidade dinâmico transversal ($E_{d(Tr)}$) (Equação 3) [17] e módulo de elasticidade dinâmico específico (E_{esp}) (Equação 4).

$$E_{d(Tr)} = 0,94665 \frac{\rho f_1^2 L^4}{h^2} \quad (3)$$

$$E_{esp} = \frac{E_{d(Tr)}}{\rho} = 0,94665 \frac{f_1^2 L^4}{h^2} \quad (4)$$

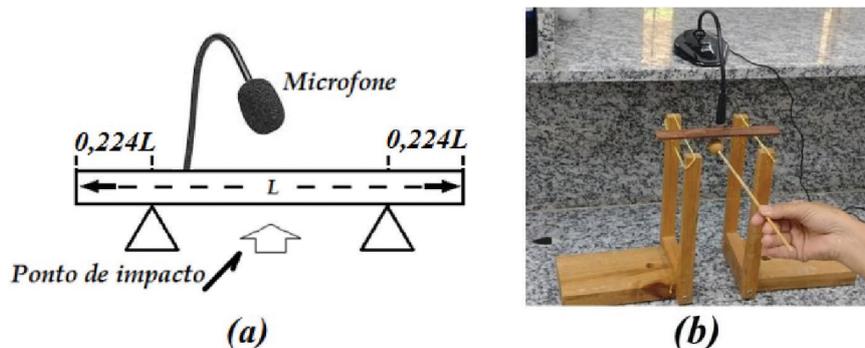


Figura 1: Esquema do aparato utilizado para ensaio de vibração transversal (a); Aparato utilizado para aquisição de dados de frequência e decaimento logarítmico (b) (Fonte: o autor).

em que, f_1 é a frequência natural de ressonância no primeiro modo de vibração transversal (Hz), L o comprimento da amostra (m), h a espessura da amostra (m), ρ densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

A atenuação acústica é uma característica física que descreve o comportamento viscoelástico da madeira e representa a capacidade do material de dissipar a energia acústica devido ao atrito interno [21]. Ela pode ser determinada a partir do sinal no domínio do tempo, representado pelo decremento logarítmico de amortecimento acústico (DI) (fornecido diretamente pelo software FFT Analyzer) e pelo coeficiente de amortecimento acústico ($\tan\delta$), determinado a partir do sinal no domínio das frequências [2, 22].

A eficiência da conversão acústica (ECA) está diretamente associada à eficiência da conversão da energia de vibração do material em energia acústica. Essa grandeza é útil para mostrar os efeitos de grupo, por exemplo, o efeito da radiação acústica e da atenuação acústica juntos [12, 23]. A ECA comumente associa a razão entre o coeficiente de radiação acústica pela atenuação acústica apresentada pelo material da amostra (Equação 5).

$$ECA = \pi \frac{\sqrt{\frac{E_{esp}}{\rho^3}}}{DI} \quad (5)$$

2.5. Análise estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificar os efeitos da temperatura em tratamentos TS, TH e a interação entre os dois fatores citados. Quando o teste F foi significativo, o teste Fisher realizou comparação entre médias. Os testes de Kolmogorov Smirnov e Brown-Forsythe verificam normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias, respectivamente. Todos os testes foram considerados ao nível de 5 % de significância.

3. RESULTADOS

A análise de variância (ANOVA) revelou o efeito significativo no TH, para as variáveis dependentes: frequência natural de ressonância (fr), decremento logaritmo (DI) e eficiência da conversão acústica (ECA). O efeito do THC (tratamento hidrotérmico combinado) foi notado no módulo de elasticidade específico (E_{esp}) e na eficiência da conversão acústica (ECA). O teor de umidade de equilíbrio (TU) apresentou efeito significativo para todos os tratamentos, Tabela 2.

3.1. Teor de umidade de equilíbrio ($TU\%$)

A madeira não tratada termicamente NT (controle) apresenta teor de umidade médio de 11,0 %, valor mais alto encontrado no estudo. Os tratamentos térmicos realizados a seco (TS) mostram diferenças acima de 130 °C, ocorrendo redução gradativa com o aumento da temperatura (Tabela 3). Dentre os tratamentos vaporizados a 123 °C, somente o tratamento a 190 °C (THC) apresentou diferença significativa, reduzindo o TU em 13,6 % quando comparado ao controle. Para os tratamentos vaporizados a 160 °C, os tratamentos THC acima de 130 °C apresentaram diferenças em relação aos demais, sendo o menor valor absoluto 8,8 % na temperatura de 190 °C, representando uma redução de 20,0 % comparada ao controle. Dessa forma, observa-se a redução do TU conforme se aumenta a temperatura de tratamento [1].

A relação do TU com a melhoria acústica foi estudada por OLADAYO e BUSOLA [24] que identificaram a dependência da velocidade de propagação acústica em madeiras de *Albizia adianthifolia* em condições verde e seca em estufa. O TU também está relacionado com variação da atenuação acústica [9, 25].

Tabela 2: Resultados das análises de variâncias para as propriedades estudadas com os valores de F e de probabilidade.

FONTE DE VARIACÃO	GL	TU		fr		DI		E _{esp}		ECA	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
Vapor (TH)	2	121,3	0,000	7,086	0,002	7,556	0,001	2,253	0,112	11,750	0,004
Mufla (TS)	3	43,51	0,000	1,672	0,181	0,666	0,575	2,194	0,096	2,039	0,116
Vapor × Mufla (THC)	6	3,26	0,006	1,989	0,078	1,166	0,334	2,337	0,041	2,924	0,013
Resíduo	72										

Observação: Valores em negrito são significativos a 5 %.

Tabela 3: Valores médios do Teor de Umidade de equilíbrio após os tratamentos térmicos (TU%).

MUFLA (°C)	TS	TRATAMENTOS TH E THC		MÉDIA
		123 °C	160 °C	
NT	11,0 ^(0,28) aA	10,3 ^(0,41) aB	9,4 ^(0,22) aC	10,2 a
130	10,7 ^(0,23) aA	10,3 ^(0,22) aB	9,5 ^(0,26) aC	10,2 b
160	10,2 ^(0,30) bA	10,3 ^(0,23) aA	9,1 ^(0,25) bB	9,8 c
190	9,6 ^(0,21) cA	9,5 ^(0,36) bA	8,8 ^(0,24) bB	9,3 d
Média	10,4A	10,1B	9,2C	

Observação: Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas ao longo das linhas e letras minúsculas idênticas ao longo das colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Fisher ao nível de 5 % de significância. Números entre parênteses são os valores dos desvios padrão.

AHMED e ADAMOPOULOS [2] identificaram redução do *TU* após tratar termicamente madeiras de *Fraxinus excelsior*, *Populus tremula* e *Betula pendula* em temperaturas de 185 e 200 °C. Os autores indicam que durante o processo térmico, a degradação das hemiceluloses diminuiu os grupos hidroxila (-OH) disponíveis, reduzindo a higroscopicidade da madeira e, portanto o *TU*.

KRÜGER *et al.* [26], ao tratarem madeiras de *Prunus avium*, *Sorbus torminalis*, *Pyrus communis* e *Prunus domestica* à temperatura de 160 °C por 8h, observaram redução do *TU* para todas as espécies. Resultados semelhantes foram obtidos por, KARAMI *et al.* [25] que submetem madeira de *Picea abies* a tratamentos de 130 e 150 °C em diferentes condições de umidade, e observaram reduções significativas do *TU* após os tratamentos térmicos. Essa redução de *TU* está ligada a mudanças químicas ocorridas na madeira durante o processo térmico. Tais modificações estão relacionadas à perda de extrativos e hemiceluloses, cristalização de celuloses e reticulação de lignina.

3.2. Frequência natural de ressonância transversal (fr)

A frequência natural de ressonância (*fr*) no 1° modo de vibração foi a primeira grandeza física obtida para se classificar a madeira acusticamente. A madeira não tratada termicamente (controle) teve valor médio de *fr* de 426,7 Hz (Tabela 4). Este valor é semelhante ao relatado por DER SLOOTEN e SOUZA [27], que encontraram 446,0 Hz, para o mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla*), sem tratamento algum. Observa-se (Tabela 3) que não houve diferença entre *fr* dos tratamentos térmicos das madeiras que não foram vaporizadas. Percebe-se um aumento de 3,8 % no valor absoluto da *fr* para a madeira tratada a 160 °C quando comparada ao controle.

Quando vaporizada na temperatura de 123 °C observa-se que a média geral se apresentou superior àquelas vaporizadas a 160 °C e não vaporizadas. Apenas a vaporização a 123 °C aumentou *fr* da madeira em 7,3 %, quando comparada ao controle. Diferenças ocorrem apenas entre as médias das madeiras que foram vaporizadas a 123 °C. Maior valor absoluto de *fr* ocorreu no THC com vaporização a 123 °C e temperatura de 190 °C, aumento de 13 % em relação ao controle. Estes aumentos podem implicar em ganhos acústicos e maior rigidez do material [15].

Apesar de não ocorrer em diferenças entre as médias dos tratamentos vaporizados a 160 °C, o tratamento apenas vaporizado apresentou *fr* maior que as médias dos THC, com 4,6 % superior ao grupo de controle. Redução de *fr* dos THC a 130 e 190 °C também foi observada por KANG *et al.* [28] para madeira de *Picea*

Tabela 4: Valores médios da frequência natural (*f_n*) (Hz) das amostras submetidas aos tratamentos térmicos.

MUFLA (°C)	TS	TRATAMENTOS TH E THC		MÉDIA
		123°	160°	
NT	426,7 ^(35,5) aA	457,8 ^(27,9) aA	446,4 ^(21,7) aA	443,6 a
130	436,0 ^(22,9) aA	430,4 ^(29,0) aA	422,1 ^(22,2) aA	429,5 a
160	443,0 ^(33,9) aA	458,5 ^(27,0) aA	435,4 ^(24,1) aA	445,6 a
190	428,8 ^(30,3) aA	482,3 ^(26,8) bB	426,4 ^(27,4) aA	445,8 a
Média	433,6 A	457,2 B	432,6 A	

Observação: Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas ao longo das linhas e letras minúsculas idênticas ao longo das colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Fisher ao nível de 5 % de significância. Números entre parênteses são os valores dos desvios padrão.

jezoensis, *Quercus rubra* e *Pinus densiflora* submetidas a tratamentos com temperaturas de 170 e 190 °C, e por MANIA *et al.* [15] após tratamento térmico em estufa a 160 °C em madeira de *Picea abies*.

Esta redução da fr pode estar associada à redução da densidade da madeira assim como as modificações associadas a alguns constituintes químicos da estrutura da parede celular da madeira tratada, como por exemplo, a degradação das hemiceluloses, dos grupos hidroxílicos (-OH) livres na região amorfa da celulose, extrativos e a reticulação da lignina [1, 9, 29].

A fr está diretamente relacionada com o módulo de elasticidade dinâmico por um fator quadrático (Equação 1). Os maiores resultados de fr acima do valor do grupo de controle implicaria em um módulo de elasticidade maior, conferindo a madeira maior rigidez. MARQUES *et al.* [30], trabalhando com madeira de marupá (*Simarouba amara*) seca em estufa ou ao ar livre, obtiveram resultados semelhantes aos aqui encontrados. A secagem não alterou significativamente as médias das frequências, apenas houve aumento numérico em relação à madeira seca ao ar livre. Os autores concluíram que essas diferenças foram devidas a redução da densidade e do teor de umidade de equilíbrio.

3.3. Módulo de elasticidade dinâmico específico (E_{esp})

A Tabela 5 apresenta os resultados médios das análises estatísticas de E_{esp} antes e após os tratamentos térmicos. Observa-se que não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos TS, TH e THC.

Diferenças absolutas apareceram apenas no grupo que foi vaporizado a 123 °C, sendo que os melhores resultados ocorreram no tratamento apenas vaporizado (10,7 %) e no conjugado a temperatura de 190 °C (15,2 %). Este último também se diferenciou numericamente dos demais tratamentos TS a 190 °C.

Com esse aumento no E_{esp} , foi possível sugerir que estes tratamentos contribuíram para melhora no desempenho acústico das amostras de mogno [9]. Segundo ZHU *et al.* [8], um E_{esp} maior representa maior eficiência na vibração da madeira, porém somente esta grandeza não é suficiente para classificar uma madeira como de boa qualidade para fins acústicos [9].

Resultados semelhantes foram relatados por DANIHELOVÁ *et al.* [23] que submeteram madeiras de *Picea abies* (L.) Karst. e *Acer pseudoplatanus*, L. a processos térmicos utilizando a técnica ThermoWood® e tratamentos a 135, 160 e 185 °C. Os autores relataram aumento do módulo de elasticidade específico em todos os tratamentos, sendo os maiores (6,8 %) para madeira de *Picea* tratada a 160 °C e de 7,8 % para madeira de *Acer* tratada às temperaturas de 160 e 185 °C.

Ao estudar a relação entre a densidade e o módulo de elasticidade específico, MANIA *et al.* [15] pesquisaram parâmetros de tratamento térmico que garantissem maior valor possível de E_{esp} . Como resultado, tratamento a 160 °C aumentou em 6,5 % o valor de E_{esp} e redução ao aumentar a temperatura de tratamento. KARAMI *et al.* [25] identificaram aumento em E_{esp} após tratarem madeiras de *Picea abies*, a temperaturas de 130 e 150 °C, sob diferentes condições de umidade.

3.4. Decaimento logarítmico (DI)

A Tabela 6 mostra que madeira sem tratamento (controle) teve valor médio de DI igual a $31,2 \times 10^{-3}$, valor este superior ao relatado por DER SLOOTEN e SOUZA [27] para o mogno brasileiro, que obteve de valor de $19,0 \times 10^{-3}$. Observa-se (Tabela 6) que apenas no tratamento vaporizado a 160 °C apresentou diferenças significativas entre os tratamentos. Nele observa-se aumento do valor de DI para todos os tratamentos. Vaporização a 123 °C

Tabela 5: Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico específico (E_{esp}) ($\text{GPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) e densidade aparente (ρ) ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) após os tratamentos térmicos.

MUFLA (°C)	TS		TRATAMENTOS TH E THC				MÉDIA	
			123 °C		160 °C			
	E_{esp}	ρ	E_{esp}	ρ	E_{esp}	ρ	E_{esp}	ρ
NT	11,2 ^(1,1) aA	767	12,4 ^(1,4) aA	733	11,7 ^(1,6) aA	756	11,7 a	752
130	11,2 ^(1,5) aA	752	10,5 ^(1,2) aA	756	10,3 ^(1,5) aA	755	10,6 a	754
160	11,5 ^(2,1) aA	768	11,3 ^(1,8) aA	779	11,8 ^(1,3) aA	764	11,5 a	770
190	10,3 ^(1,7) aA	751	12,9 ^(1,3) aA	760	10,3 ^(1,2) aA	772	11,2 a	761
Média	11,1 A	760	11,8 A	757	11,0 A	762		

Observação: Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas ao longo das linhas e letras minúsculas idênticas ao longo das colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Fisher ao nível de 5 % de significância. Números entre parênteses são os valores dos desvios padrão.

Tabela 6: Valores médios do decaimento logarítmico médio ($Dl \times 10^{-3}$) das amostras submetidas aos tratamentos térmicos.

MUFLA (°C)	TS	TRATAMENTOS TH E THC		MÉDIA
		123 °C	160 °C	
NT	31,2 ^(4,1) aA	27,5 ^(4,8) aA	33,5 ^(4,3) aA	30,7 a
130	29,6 ^(4,2) aA	31,3 ^(6,2) aA	37,9 ^(6,9) bB	32,9 a
160	30,5 ^(6,0) aA	31,4 ^(2,5) aA	34,7 ^(4,2) aA	32,2 a
190	33,8 ^(7,1) aA	28,9 ^(4,0) aA	33,6 ^(5,1) aA	32,1 a
Média	31,3 A	29,8 A	34,9 B	

Observação: Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas ao longo das linhas e letras minúsculas idênticas ao longo das colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Fisher ao nível de 5 % de significância. Números entre parênteses são os valores dos desvios padrão.

apresentou valores médios de Dl equivalentes aos tratamentos que não receberam vaporização, sendo a maior redução registrada para madeira tratada apenas com vaporização a 123 °C (10,6 %), com relação ao controle. Apesar da diferença não-significativa observada, madeiras tratadas sem vapor a 130 e 160 °C em TS apresentaram valores médios absolutos menores que o controle. Observa-se que dentre os tratamentos a vapor a 160 °C apenas o THC a 130 °C se diferenciou dos demais, sendo este também o maior valor absoluto do decaimento logarítmico, indicando que a madeira resultante deste tratamento não possui características acústicas adequadas.

Ao submeter madeira de *Picea sitchensis* a temperaturas de 120, 160 e 200 °C, KUBOJIMA *et al.* [10] relataram aumentos ou reduções no coeficiente de atenuação acústica ($\tan\delta$) dependendo do processo térmico aplicado na pesquisa. Indicaram que a redução da atenuação pode ser devido à mudança estrutural nas cadeias poliméricas da madeira [30, 31].

DANIHELOVÁ *et al.* [23] relataram redução de 16,3 % no decaimento logarítmico quando madeiras de *Picea* foram aquecidas a 135 °C, e de 3,6 % quando as madeiras de *Acer* foram aquecidas a 160 °C. ŽVEPLAN e STRAŽE [32] relataram redução da atenuação acústica em madeiras de *Fagus sylvatica* após TH a 135 °C. Resultado semelhante foi encontrado por KRÜGER *et al.* [26], que relataram redução da constante acústica ($\tan\delta$) após TS, assim como KARAMI *et al.* [25], que identificou redução em $\tan\delta$ após TS na presença de diferentes condições de umidade.

A redução ou aumento do Dl pode estar relacionado com a temperatura de tratamento e o tipo de atmosfera utilizada [16]. O tratamento em ambiente úmido pode proporcionar degradação das hemiceluloses por acetilação e, ao mesmo tempo, modificar a lignina, sem prejudicar a estrutura da parede celular [33]. Esta degradação reduz a resistência da parede celular da madeira e a tensão interna gerada pelo aquecimento seria liberada durante a migração da água, de modo que a superfície das paredes celulares passaria pelo fenômeno de rasgamento [33, 34], resultando em aumento do Dl .

3.5. Eficiência da conversão acústica (ECA)

Observa-se (Tabela 7) que apenas as madeiras vaporizadas a 123 °C apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos. Dentre eles, apenas o TH a 123 °C diferenciou-se dos demais, apresentando aumento de 26 % (569,1 $\text{m}^4\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$), em relação ao controle (450,4 $\text{m}^4\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$).

Verificou-se ainda aumento de 17 % (527,5 $\text{m}^4\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$) para THC a 190 °C. Vaporização a 160 °C proporcionou redução média da ECA. Não houve diferença significativa entre as médias dos TS e TH, enquanto que para o tratamento a 123 °C houve aumento médio de ECA, sendo este o maior valor numérico. Madeiras tratadas a 130 e 160 °C (sem vapor) mostram tendência de aumento da eficiência da conversão acústica.

Após submeterem madeiras de *Picea abies* (L.) Karst. e *Acer pseudoplatanus*, L. a processos térmicos utilizando a técnica ThermoWood®, e tratamentos a 135, 160 e 185 °C, DANIHELOVÁ *et al.* [23] relataram aumentos do ECA quando as madeiras foram aquecidas a 135 °C, sendo aumentos de 8,3 % para madeira de *Picea* e de 11 % para *Acer*.

Reduções da ECA foram observadas por MOHEBBY *et al.* [35], que submeteram madeira de *Morus alba* a temperaturas de 100, 120 e 140 °C em diferentes tempos de tratamento e observaram que todos os tratamentos térmicos realizados reduziram ligeiramente a ECA. Relataram ainda aumento do coeficiente de atenuação ($\tan\delta$), que ocasionou nesse ligeiro aumento. Por outro lado, AHMED e ADAMOPOULOS [2] relataram melhorias significativas nos desempenhos acústicos das madeiras tratadas termicamente, exibindo valores altos de ECA associados à redução de $\tan\delta$, o mesmo relatado por ZATLOUKAL *et al.* [16].

Tabela 7: Valores médios da eficiência da conversão acústica (ECA) ($\text{m}^4\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$) das amostras submetidas ao tratamento térmico.

MUFLA (°C)	TS	TRATAMENTOS TH E THC		MÉDIA
		123 °C	160 °C	
NT	450,4 ^(79,5) aA	569,1 ^(122,2) aB	433,7 ^(84,3) aA	484,4 a
130	486,0 ^(98,4) aA	448,4 ^(108,0) bA	363,5 ^(80,0) aA	432,6 a
160	480,9 ^(150,1) aA	433,2 ^(43,2) bA	414,0 ^(62,5) aA	442,7 a
190	426,1 ^(153,5) aA	527,5 ^(101,7) bA	398,0 ^(70,5) aA	450,5 a
Média	460,9 AB	494,5 B	402,3 A	

Observação: Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas ao longo das linhas e letras minúsculas idênticas ao longo das colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Fisher ao nível de 5 % de significância. Números entre parênteses são os valores dos desvios padrão.

4. CONCLUSÕES

Os processos térmicos utilizando ambiente seco (TS), utilizando autoclave (TH), e tratamentos hidrotérmicos conjugados (THC), resultaram em modificações físicas e acústicas expressivas em madeiras de *Khaya ivorensis*. Com isso, tais tratamentos podem ser utilizados para agregar valor em madeiras desta espécie destinadas à construção de instrumentos musicais.

Os tratamentos a seco em mufla (TS) não afetaram as propriedades acústicas, apenas o teor de umidade de equilíbrio (TU), sendo valores inferiores em relação ao controle.

Aumentos consideráveis da frequência natural de ressonância ($f_{r(T_r)}$) ocorreram quando a madeira passou pelos processos TH a 123 °C, e THC a 123 °C e, 160 e 190 °C. Estes aumentos representaram 7,3, 7,4 e 13,0 %, em relação ao valor médio do grupo controle.

A maior redução do decaimento logarítmico ($DI_{(T_r)}$) ocorreu quando a madeira foi passada por TH a 123 °C, conferindo uma redução de 11,9 % em relação ao grupo controle.

O módulo de elasticidade dinâmico específico ($E_{esp(T_r)}$) apresentou aumentos após processos térmicos TH e THC. Os tratamentos que melhor representaram o aumento desta grandeza foram os TH a 123 °C, 10,8 %, e o tratamento THC a 123 °C e 190 °C, sendo de 15,8 %, em relação ao grupo controle.

A grandeza eficiência da conversão acústica ($ECA_{(T_r)}$) apresentou aumento de 26,4 %, com relação ao controle, quando a madeira foi tratada TH a 123 °C.

Avaliando de forma geral as grandezas acústicas pesquisadas, a vaporização na temperatura a 123 °C (TH) foi o tratamento que se destacou, trazendo melhorias em praticamente todas as grandezas ou propriedades acústicas estudadas, quando comparado ao controle.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] HILL, C., *Wood modification-chemical, thermal and other processes*, Hoboken, John Wiley & Sons, Ltd., 2006. Wiley Series in Renewable Resources.
- [2] AHMED, S.A., ADAMOPOULOS, S., “Acoustic properties of modified wood under different humid conditions and their relevance for musical instruments”, *Applied Acoustics*, v. 140, pp. 92–99, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.05.017>.
- [3] DANIHELOVÁ, A., SPIŠIAK, D., REINPRECHT, L., *et al.*, “Acoustic properties of norway spruce wood modified with staining fungus (*Sydowia polyspora*)”, *BioResources*, v. 18, n. 2, pp. 3432–3444, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.14.2.3432-3444>.
- [4] KIM, A.R., KIM, N.-H., “Effect of heat treatment and particle size on the crystalline properties of wood cellulose”, *Mogjae Gonghag*, v. 47, n. 3, pp. 299–310, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.5658/WOOD.2019.47.3.299>.
- [5] MISSIO, A.L., GATTO, D.A., MODES, K.S., *et al.*, “Método ultrassônico para estimativa do módulo de elasticidade de madeiras de *Pinus taeda* tratadas termicamente”, *Ciência Rural*, v. 43, n. 4, 2013, pp. 616–622. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782013000400009>.
- [6] MODES, K.S., SANTINI, E.J., VIVIAN, M.A., *et al.*, “Efeito da termorretificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*”, *Ciência Florestal*, v. 27, n. 1, pp. 291–302, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509826467>.

- [7] MANIA, P., SKRODZKA, E., “Modal parameters of resonant spruce wood (*Picea abies* L.) after thermal treatment”, *Journal of King Saud University – Science*, v. 32, n. 1, pp. 1152–1156, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.11.007>.
- [8] ZHU, L., LIU, Y., LIU, Z., “Effect of high-temperature heat treatment on the acoustic-vibration performance of *Picea jezoensis*”, *BioResources*, v. 11, n. 2, pp. 4921–4934, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.2.4921-4934>.
- [9] BUCUR, V. *The acoustics of wood*. 2 ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer Series in Wood Science, 2006.
- [10] KUBOJIMA, Y., OKANO, T., OHTA, M., “Vibrational properties of Sitka spruce heat-treated in nitrogen gas”, *Journal of Wood Science*, v. 44, n. 1, pp. 73–77, 1998. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00521878>.
- [11] ZERBST, D., CLAUDER, L., OLSON, D., *et al.*, “Influence on acoustical properties of resonant soundboard material through different processes of thermal modification,” In: *European Conference on Wood Modification*, Arnhem, Netherlands, 2018.
- [12] STRAŽE, A., ŽVEPLAN, E., “Improving the acoustic properties of beech wood by high pressure hydrothermal treatment”, In: *Proceedings of the Tenth European Conference on Wood Modification*, Nancy, France, 25-26 April 2022.
- [13] DANIHELOVÁ, A., CULÍK, M., NYMEC, M., *et al.*, “Modified wood of black locust alternative to honduran rosewood in the production of xylophones”, *Acta Physica Polonica A*, v. 127, n. 1, pp. 106–109, 2015.
- [14] PFRIEM, A., “Thermally modified wood for use in musical instruments”, *Drvna Industrija*, v. 66, n. 3, pp. 251–253, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.5552/drind.2015.1426>.
- [15] MANIA, P., MOLIŃSKI, W., ROSZYK, E., *et al.*, “Optimization of spruce (*Picea abies* L.) wood thermal treatment temperature to improve its acoustic properties”, *BioResources*, v. 15, n. 1, pp. 505–516, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.15.1.505-516>.
- [16] ZATLOUKAL, P., SUCHOMELOVÁ, P., DÖMÉNY, J., *et al.*, “Possibilities of decreasing hygroscopicity of resonance wood used in piano soundboards using thermal treatment”, *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, v. 11, n. 2, pp. 475, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/app11020475>.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM E-1876-21 International Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration*, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 2021.
- [18] FOREST PRODUCTS LABORATORY, *Wood handbook – Wood as an engineering material. General Technical Report Forest Products Laboratory-GTR-282*. Madison, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021.
- [19] SPROßMANN, R., ZAUER, M., WAGENFÜHR, A., *et al.*, “Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars”, *Results in Physics*, v. 7, pp. 1737–1742, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2017.05.006>.
- [20] SEGUNDINHO, P.G.A., REGAZZI, A.J., POLETTI, F.S., *et al.*, “Variação dos módulos de elasticidade e ruptura em madeira de cedro-australiano por meio de ensaios não destrutivo e destrutivo”, *Ciência Florestal*, v. 28, n. 3, pp. 1163–1178, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509833392>.
- [21] WEGST, U.G.K., “Wood for sound”, *American Journal of Botany*, v. 93, n. 10, pp. 1439–1448, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439>.
- [22] BRÉMAUD, I., EL KAÏM, Y., GUIBAL, D., *et al.*, “Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types”, *Annals of Forest Science*, v. 69, n. 3, pp. 373–386, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13595-011-0166-z>.
- [23] DANIHELOVÁ, A., VIDHOLDOVÁ, Z., GERGEL’, T., *et al.*, “Thermal modification of spruce and maple wood for special wood products”, *Polymers*, v. 14, n. 14, pp. 2813, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/polym14142813>.
- [24] OLADAYO, O.K., BUSOLA, O.F., “Acoustic properties of *Albizia adianthifolia* (schum.) wood in relation to moisture”, *Journal of Agriculture and Forestry (New York, N.Y.)*, v. 7, n. 3, pp. 119–125, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajaf.20190703.15>.
- [25] KARAMI, E., BARDET, S., MATSUO, M., *et al.*, “Effects of mild hygrothermal treatment on the physical and vibrational properties of spruce wood”, *Composite Structures*, v. 253, pp. 112736, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112736>.

- [26] KRÜGER, R., ZAUER, M., WAGENFÜHR, A., “Physical properties of native and thermally treated European woods as potential alternative to Indian rosewood for the use in classical guitars”, *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 76, n. 6, pp. 1663–1668, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-018-1345-5>.
- [27] DER SLOOTEN, H.J.V., SOUZA, M.R., *Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para manufatura de instrumentos musicais*, Manaus, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 1993.
- [28] KANG, H.-Y., KANG, C.-W., HONG, S.-H., *et al.*, “Effect of heat treatment on the acoustic properties of a wooden xylophone keyboard”, *Journal of the Faculty of Agriculture*, v. 61, n. 1, pp. 157–163, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.5109/1564098>.
- [29] HILL, C., ALTGEN, M., RAUTKARI, L., “Thermal modification of wood—a review: chemical changes and Hygroscopicity”, *Journal of Materials Science*, v. 56, n. 11, pp. 6581–6614, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>.
- [30] MARQUES, M.H.B., MARTINS, V.A., SOUZA, M.R., *et al.*, “Efeito da secagem nas propriedades acústicas da madeira de marupá (*Simarouba amara* Aubl.)”, *Floresta e Ambiente – FLORAM*, v. 12, n. 2, pp. 57–64, 2005.
- [31] TJEERDSMA, B.F., MILITZ, H., “Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 63, n. 2, pp. 102–111, 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-004-0532-8>.
- [32] ŽVEPLAN, E., STRAŽE, A., “Akustične lastnosti bukovine po hidrotermični obdelavi”, *Les/Wood*, v. 66, n. 2, pp. 5–14, Nov. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n02a01>.
- [33] WU, Z., DENG, X., LI, L., *et al.*, “Effects of heat treatment on interfacial properties of *Pinus massoniana* Wood”, *Coatings*, v. 11, n. 5, pp. 543, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/coatings11050543>.
- [34] XING, D., LI, J., WANG, S., “Comparison of the chemical and micromechanical properties of *Larix spp.* after eco-friendly heat treatments measured by *in situ* nanoindentation”, *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, pp. 4358, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-61314-6>.
- [35] MOHEBBY, B., YAGHOUBI, K., ROOHNIA, M., “Acoustic properties of hydrothermally modified Mulberry (*Morus alba* L.) Wood”, In: *European Conference on Wood Modification*, Cardiff, UK, 2007.