



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

CAROLINE DA SILVA SANTOS

**TESTE DE REVERSIBILIDADE NAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DAS
MADEIRAS DE *Simarouba amara* E *Cordia goeldiana* Huber, MODIFICADAS
TERMICAMENTE**

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JULHO – 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

CAROLINE DA SILVA SANTOS

**TESTE DE REVERSIBILIDADE NAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DAS
MADEIRAS DE *Simarouba amara* E *Cordia goeldiana* Huber, MODIFICADAS
TERMICAMENTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, do Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JULHO – 2025

**TESTE DE REVERSIBILIDADE NAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DAS
MADEIRAS DE *Simarouba amara* E *Cordia goeldiana* Huber, MODIFICADAS
TERMICAMENTE**

CAROLINE DA SILVA SANTOS

APROVADA EM: 02/07/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MIGUEL DO NASCIMENTO – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOPES LAUDARES – UFRRJ
Membro

MSc. JAQUELINE ROCHA DE MEDEIROS – UFRRJ
Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) pela formação sólida e pelas oportunidades de crescimento acadêmico e pessoal, proporcionadas ao longo dos anos. Aos professores, colaboradores e técnicos ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, deixo meu sincero reconhecimento pelo comprometimento, pela excelência no ensino e pela inspiração constante.

Agradeço, em especial, à Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), por ter aberto portas valiosas no campo da pesquisa e por me permitir vivenciar experiências enriquecedoras em ambiente científico. À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), registro minha profunda gratidão pelo apoio financeiro e incentivo aos projetos de iniciação científica dos quais tive a honra de participar, fundamentais para minha formação acadêmica e profissional.

A todos do Laboratório de Modificação Físico Química da Madeira (LMFQM), em especial ao professor Alexandre Miguel do Nascimento pela oportunidade de iniciar na pesquisa científica, pelas palavras e por ter acreditado em mim no Congresso. Agradeço também ao Gabriel Iuri, Jaqueline Rocha, Rogério Santos, Daiana, Lohana e Francisco pela companhia na pesquisa, pelas risadas, fofocas e companhia.

A Deus, minha eterna gratidão por me conceder forças nos momentos difíceis, luz nos momentos de dúvida e serenidade ao longo de toda a jornada.

Agradeço profundamente aos meus pais Verônica e José Ronaldo, pelo amor incondicional, pelo exemplo de dedicação, pelo apoio constante em todas as fases da minha vida e por sempre acreditarem no meu potencial. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

A minha irmã Ana Clara, agradeço pelo carinho, pela amizade, pela lealdade, pelo incentivo constante e por ser sempre uma presença firme e acolhedora ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu futuro esposo Jonathan Cavalheiro, agradeço por acreditar em mim, pelo companheirismo e por estar ao meu lado nos momentos mais desafiadores. Sua presença foi essencial para que eu seguisse firme até aqui.

Aos amigos que fiz ao longo da faculdade, Íris Malheiros, Juliana Azevedo e Patrício Almeida, agradeço pelo apoio mútuo, pela troca de conhecimento, pelas fofocas e pelas amizades que levarei para a vida toda. Aos amigos de fora da universidade, Luma Sobrinho, Everson Freitas, Sabrina Souza e Rayane Fernandes, agradeço por me lembrarem da importância do equilíbrio, da leveza e por sempre estarem presentes, mesmo à distância, com palavras de incentivo e carinho.

Por fim, compartilho esta conquista com todos que sonham com a educação e com a possibilidade de trilhar um caminho acadêmico. Este sonho foi possível para mim — e espero que um dia seja possível para todos que acreditam, se dedicam e persistem, mesmo diante das dificuldades. Que esta etapa concluída seja também uma mensagem de esperança e inspiração.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista, deixo minha sincera gratidão.

RESUMO

O trabalho analisou os efeitos da reversibilidade nas propriedades acústicas das madeiras de *Simarouba amara* (marupá) e *Cordia goeldiana* (freijó), modificadas termicamente. As madeiras foram previamente tratadas em estufa a vácuo a 150°C e submetidas a processos de vaporização e/ou lixiviação. Após um período de 24 meses em climatização controlada, elas passaram por um processo de reumidificação e secagem, envolvendo três condições distintas: (i) climatização a aproximadamente 20°C e 65% umidade relativa (UR), (ii) imersão das madeiras em um postmix contendo água, de forma a água não entrar em contato direto com a madeira, por três semanas e (iii) secagem das madeiras no postmix com sílica, controlando sempre a UR no material. As propriedades físicas (densidade e umidade), mecânicas (módulo de elasticidade dinâmico, eficiência de conversão acústica e decaimento logarítmico) foram avaliadas antes e após esse ciclo, com base em ensaios conforme as normas ABNT e ASTM. Os resultados mostraram que o freijó apresentou um aumento na densidade aparente, rigidez e melhoria no desempenho acústico, após o tratamento térmico, com destaque para o módulo de elasticidade dinâmico e a eficiência de conversão acústica. O decaimento logarítmico também foi reduzido, indicando menor dissipação de energia sonora, o que é positivo para uso em instrumentos musicais. No caso do marupá, os pré-tratamentos não trouxeram ganhos significativos e, em alguns casos, prejudicaram as propriedades acústicas, como o aumento da atenuação sonora e redução da rigidez. A madeira não tratada apresentou melhor desempenho acústico e estrutural após o teste de reversibilidade, sugerindo que o tratamento térmico pode gerar efeitos irreversíveis em suas características. A análise estatística indicou que, para o freijó, as propriedades se mantiveram estáveis após os ciclos de umidade, enquanto no marupá as variações foram mais sensíveis. Sendo assim, o freijó responde positivamente ao tratamento térmico para fins acústicos, ao passo que o marupá apresenta melhor desempenho sem pré-tratamentos.

Palavras-chave: Propriedades vibracionais; Envelhecimento artificial; Eficiência acústica.

ABSTRACT

This study analyzed the effects of reversibility on the acoustic properties of thermally modified *Simarouba amara* (marupá) and *Cordia goeldiana* (freijó) wood. The wood was previously treated in a vacuum oven at 150°C and subjected to vaporization and/or leaching processes. After a 24-month period under controlled climate control, the wood underwent a rehumidification and drying process involving three distinct conditions: (i) climate control at approximately 20°C and 65% relative humidity (RH); (ii) immersion of the wood in a postmix containing water, so that the water does not come into direct contact with the wood, for three weeks; and (iii) drying of the wood in the postmix with silica, always controlling the RH in the material. Physical (density and moisture content) and mechanical (dynamic modulus of elasticity, acoustic conversion efficiency, and logarithmic decay) properties were evaluated before and after this cycle, based on tests conducted in accordance with ABNT and ASTM standards. The results showed that freijó wood exhibited increased apparent density, stiffness, and improved acoustic performance after heat treatment, particularly in dynamic modulus of elasticity and acoustic conversion efficiency. Logarithmic decay was also reduced, indicating reduced sound energy dissipation, which is positive for use in musical instruments. In the case of marupá, the pretreatments did not produce significant improvements and, in some cases, impaired acoustic properties, such as increased sound attenuation and reduced stiffness. The untreated wood exhibited better acoustic and structural performance after the reversibility test, suggesting that heat treatment can have irreversible effects on its characteristics. Statistical analysis indicated that, for freijó, the properties remained stable after the moisture cycles, while for marupá, the variations were more sensitive. Therefore, freijó responds positively to heat treatment for acoustic purposes, while marupá performs better without pre-treatment.

Keywords: Vibrational properties; Artificial aging; Acoustic efficiency.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ANEXOS	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 A Madeira	2
2.2 Modificação Térmica	3
2.3 Propriedades Físicas	4
2.4 Propriedades Mecânicas	5
2.5 Propriedades Acústicas	6
2.6 Processo de Reversibilidade	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1 Preparação das Amostras	8
3.2 Processo de Umidificação e Secagem.....	9
3.3 Propriedades Físicas	11
3.4 Propriedades Mecânicas	11
3.4.1 Ensaio Mecânico.....	11
3.4.1 Ensaio Acústico	12
3.5 Análise dos Dados	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
4.1 Freijó	13
4.2 Marupá	16
4.3 Comparação estatística das madeiras antes e após teste de reversibilidade.....	21
5. CONCLUSÃO	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química da madeira.

Tabela 2. Estatísticas com valores médios e desvio para cada variável analisada, da madeira de freijó, antes e após testes de reversibilidade com as variações percentuais tendo o controle como referência.

Tabela 3. Resultados estatísticos e comparações entre médias, para a madeira de marupá após teste de antes e após o teste de reversibilidade.

Tabela 4. Quadro de análise de variâncias para as madeiras de freijó e marupá após teste de reversibilidade e seus efeitos nas seguintes propriedades.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Demonstração das madeiras de marupá e freijó pré-tratadas após 24 meses em climatização com seus respectivos tratamentos
- Figura 2.** Demonstração do processo de umidificação e secagem das madeiras de marupá e freijó após 24 meses em climatização
- Figura 3.** Demonstração do postmix utilizado para o processo de umidificação e secagem da madeira.
- Figura 4.** Box plot das variáveis do módulo específico antes e após teste e ECA antes do teste, em função da lixiviação e vaporização para a madeira de freijó.
- Figura 5.** Box plot das variáveis do módulo específico antes e após teste e ECA antes do teste, em função da lixiviação e vaporização para a madeira de marupá.
- Figura 6.** Gráfico das variáveis antes e após o teste de reversibilidade para todos os pré-tratamentos.

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Teste de Normalidade pelo Método de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de significância.

Anexo B: ANOVA do Teste de Brown-Forsythe para Homogeneidade de Variância- 5%.que

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um recurso natural amplamente empregado em distintos setores industriais e tecnológicos, em virtude de sua versatilidade, leveza, resistência e facilidade de processamento. Essas características a tornam especialmente atrativa para uma variedade de aplicações, que incluem desde a construção civil até a fabricação de móveis e instrumentos musicais, configurando-se como um material de elevado valor funcional, estrutural e estético (Santos, 2016; Bucur, 2006; Pereira, 2009; Flores, 2015; Lima, 2015).

Nesse cenário de ampla aplicabilidade, cresce também a demanda por melhorias no desempenho técnico da madeira, especialmente em ambientes com variações climáticas ou exigências funcionais específicas. Nesse contexto, os métodos de modificação da madeira têm se destacado, com ênfase para o tratamento térmico, considerado uma das abordagens mais promissoras. Tal processo visa aperfeiçoar propriedades físicas, mecânicas e acústicas do material, dispensando o uso de agentes químicos potencialmente agressivos, o que representa uma alternativa mais segura do ponto de vista ambiental (Karami et al., 2020).

Dentre os efeitos mais relevantes do tratamento térmico, destaca-se a redução da higroscopidez da madeira, isto é, sua capacidade de absorver ou liberar umidade em função das condições ambientais. Essa modificação resulta em maior estabilidade dimensional, atributo crucial em contextos que demandam precisão estrutural ou acústica. Ademais, estudos demonstram que, em espécies como o *Pinus sylvestris*, esse tipo de tratamento pode incrementar a velocidade de propagação do som e reduzir as perdas acústicas, aspectos essenciais para aplicações na construção de instrumentos musicais (Montero et al., 2015; Göken, 2021; Zatloukal et al., 2021).

As transformações induzidas pelo calor, por sua vez, têm sido frequentemente associadas ao envelhecimento natural da madeira, porém ocorrendo de maneira acelerada. Essa semelhança suscita questionamentos sobre a permanência dessas alterações ao longo do tempo. Nesse sentido, o conceito de reversibilidade assume papel central, permitindo investigar se as modificações promovidas são definitivas ou se podem ser revertidas mediante exposição a determinadas condições ambientais. Tal distinção revela-se essencial para a avaliação da confiabilidade e da estabilidade do material em longo prazo (Karami et al., 2020).

Com o intuito de elucidar essa questão, são realizados ensaios específicos voltados à análise da reversibilidade das propriedades da madeira. Esses testes buscam verificar em que medida as alterações físicas, mecânicas e acústicas persistem após a exposição das amostras a diferentes condições de umidade e temperatura. Caso os efeitos permaneçam mesmo após tais variações, considera-se que o tratamento foi eficaz em promover modificações estáveis — característica desejável em aplicações que exigem desempenho técnico consistente.

Entretanto, investigações como a de Obataya (2017) indicam que determinados processos de umidificação podem reverter parcialmente os efeitos tanto do envelhecimento natural quanto do tratamento térmico. Além disso, estudos com intervenções controladas envolvendo calor e umidade têm demonstrado melhorias nas propriedades acústicas da madeira, o que reforça a necessidade de se compreender os limites entre alterações permanentes e temporárias.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho consistiu em caracterizar a reversibilidade das propriedades físicas, mecânicas e acústicas das madeiras *Simarouba amara* (marupá) e *Cordia goeldiana* Huber (freijó), contribuindo para o aprofundamento do conhecimento sobre os efeitos do tratamento térmico e sua aplicabilidade para instrumentos musicais, que demandem um desempenho acústico adequado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A madeira

A madeira tem sido um recurso essencial para a humanidade desde os primórdios da civilização. Por ser um material natural, renovável e amplamente acessível, desempenha um papel fundamental em diversas atividades humanas. Suas características intrínsecas, como cor, aroma, resistência e até mesmo sabor, estão diretamente relacionadas à sua complexa composição química. Essa composição envolve elementos de baixo peso molecular, como extrativos orgânicos e cinzas inorgânicas, e componentes de alto peso molecular, como celulose, hemicelulose (também conhecida como poliose) e lignina (Oliveira, 2003). A Tabela 1 apresenta os percentuais típicos desses constituintes em madeiras de coníferas e folhosas.

Tabela 1. Composição química da madeira

Constituintes	Coníferas (%)	Folhosas (%)
Celulose	44 – 40	47 – 43
Poliose	29 – 25	35 – 25
Lignina	31 – 25	24 – 16
Extrativos	5 – 1	8 – 2
Cinzas	≤ 1	≤ 1

Adaptado de Wastowski (2018)

Esses componentes conferem à madeira propriedades técnicas valiosas, como elevada resistência mecânica, leveza em relação à rigidez, baixo consumo energético no processamento e um notável apelo estético. Em virtude dessas qualidades, a madeira é amplamente utilizada em uma variedade de aplicações, desde a fabricação de instrumentos musicais até o uso em revestimentos internos e estruturas arquitetônicas. Sua versatilidade a torna adequada tanto para ambientes residenciais quanto institucionais, como escolas e auditórios (Moreschi, 2014).

No entanto, apesar de suas inúmeras vantagens, é importante reconhecer que a madeira apresenta limitações naturais que podem comprometer sua estabilidade e durabilidade ao longo do tempo. A principal delas é sua instabilidade dimensional, resultante da higroscopidade intrínseca ao material, ou seja, da sua capacidade de absorver e liberar umidade em função das condições ambientais. Variações no teor de umidade podem induzir deformações, rachaduras, perda de resistência e, em situações mais críticas, propiciar o desenvolvimento de agentes biológicos deteriorantes, sobretudo quando o material ultrapassa o ponto de saturação das fibras (Brischke e Alfredsen, 2020).

Diante desses desafios, a ciência e a tecnologia aplicadas aos materiais lignocelulósicos têm buscado estratégias para aprimorar o desempenho da madeira, com destaque para as técnicas de modificação que visam melhorar suas propriedades físicas e prolongar sua vida útil. Pesquisas como as de Moreschi (2015) e Čermák (2022) evidenciam

que tais inovações tornam possível expandir o uso da madeira para contextos mais exigentes, nos quais estabilidade e resistência são requisitos fundamentais.

Nesse panorama, destaca-se a espécie *Simarouba amara* (popularmente conhecida como marupá), cuja madeira apresenta tonalidade clara e densidade variando entre 0,45 e 0,55 g/cm³. Segundo Freitas et al. (2016), o marupá possui boa trabalhabilidade e acabamento superficial, características desejáveis para determinadas aplicações. Contudo, essas mesmas propriedades — aliadas à sua menor densidade — limitam seu aproveitamento em usos mais intensivos, como em pisos, onde são preferidas madeiras mais densas, escuras e com maior resistência ao desgaste físico e biológico.

Ainda assim, essa espécie tem despertado interesse em nichos específicos. Trabalhos recentes, como o de Laudares et al. (2022), destacam o potencial do marupá na fabricação de instrumentos musicais, considerando que suas propriedades físicas e acústicas se assemelham às de madeiras nobres tradicionalmente empregadas nesse segmento. Ademais, trata-se de uma espécie de crescimento relativamente rápido e que não se encontra em risco de extinção, o que favorece sua adoção em práticas sustentáveis de uso e manejo florestal.

Assim, observa-se que a madeira permanece como um material de grande relevância no cenário tecnológico e ambiental atual. O contínuo desenvolvimento de métodos de modificação, associado ao uso responsável de espécies nativas promissoras, como o marupá, amplia as possibilidades de aproveitamento sustentável desse recurso, promovendo soluções que conciliam desempenho técnico, viabilidade econômica e responsabilidade ecológica.

2.2 Modificação Térmica

Considerando os impactos ambientais decorrentes do uso de produtos químicos convencionais, diversos setores industriais, incluindo o madeireiro, têm direcionado esforços para o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis no tratamento da madeira, com o objetivo de aumentar sua durabilidade e desempenho. A escolha do tratamento mais adequado está diretamente relacionada à finalidade de uso do material, podendo envolver modificações que visam à melhoria da estabilidade dimensional, da resistência mecânica ou da proteção contra agentes biodegradadores. Tais alterações podem ser promovidas tanto por meio de tratamentos químicos quanto por processos físicos, como o tratamento térmico, que modificam a estrutura celular da madeira e aprimoram suas características funcionais.

Dentre as opções disponíveis, o tratamento térmico desponta como uma das estratégias mais eficazes e ambientalmente responsáveis, ganhando destaque significativo tanto na literatura científica quanto na prática industrial. Nesse contexto, a modificação térmica da madeira tem se consolidado como uma solução promissora. Diversas tecnologias estão atualmente disponíveis no mercado, refletindo o avanço expressivo dessa abordagem. Entre essas, o tratamento térmico tem sido amplamente investigado em estudos de revisão conduzidos por especialistas como Sandberg e Jones (2013), que destacam seu potencial como método eficiente de proteção e de aprimoramento das propriedades da madeira (Godinho et al., 2021).

Além de seus benefícios ambientais, a modificação térmica tem permitido a valorização de espécies menos utilizadas comercialmente, ampliando suas possibilidades de aplicação e tornando-as mais atrativas sob os pontos de vista técnico e econômico. No entanto, o êxito desse tipo de tratamento depende de uma série de variáveis, entre as quais a umidade relativa do ar se destaca, uma vez que interfere diretamente na umidade de equilíbrio da madeira durante o processo e, consequentemente, em seu desempenho final (Freitas et al., 2016).

A madeira termicamente modificada (MTM) é obtida por meio de um processo que combina calor e umidade, sem a necessidade de produtos químicos agressivos. Essa metodologia promove, simultaneamente, uma secagem mais eficiente e ganhos energéticos, sendo realizada geralmente em temperaturas que variam entre 120 °C e 260 °C, conforme o tipo de processo industrial adotado e as propriedades desejadas no produto final (Hill, Altgen e Rautkari, 2021).

Tais condições de modificação induzem alterações estruturais e químicas nas paredes celulares da madeira, resultando em mudanças substanciais em suas propriedades físicas e mecânicas. Entre os efeitos positivos mais frequentemente relatados estão o aumento da estabilidade dimensional, a redução da absorção de umidade e da molhabilidade, além de uma maior resistência a agentes biológicos, o que contribui significativamente para a longevidade do material.

Contudo, é importante reconhecer que os resultados do tratamento térmico não são universalmente vantajosos. Algumas propriedades físicas e mecânicas podem ser afetadas negativamente, a depender da espécie utilizada e das condições específicas do processo. Apesar dessas limitações, pesquisas recentes, como a de Medeiros et al. (2025), demonstram que, mesmo na ausência de aditivos químicos, o tratamento térmico pode promover melhorias substanciais no desempenho da madeira.

Em virtude desses avanços, a madeira termicamente modificada tem ampliado sua inserção em diversos segmentos do mercado, incluindo a construção civil, o design de interiores e, mais recentemente, a produção de instrumentos acústicos. O crescimento contínuo das pesquisas e das inovações tecnológicas no setor tem impulsionado sua aceitação comercial, com estimativas que apontam para uma produção anual de aproximadamente 535 mil metros cúbicos e projeções de crescimento na ordem de 40% até 2028 (Lucarelli e Pagnozzi, 2024).

Além dos benefícios funcionais, a madeira tratada termicamente também apresenta características visuais e estruturais similares àquelas observadas em madeiras naturalmente envelhecidas, como menor higroscopidade, aumento da rigidez, escurecimento da cor e elevação da fragilidade (Endo et al., 2016). Essas semelhanças indicam que o tratamento hidrotérmico pode, qualitativamente, simular os efeitos do envelhecimento prolongado, configurando-se como uma alternativa relevante para a reprodução de propriedades acústicas históricas em aplicações técnicas, patrimoniais e artísticas.

2.3 Propriedades Físicas

A escolha do uso mais apropriado para uma espécie madeireira depende, fundamentalmente, do conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas. Entre os aspectos mais relevantes estão a densidade básica, a variação dimensional diante de mudanças no teor de umidade e a capacidade de resistência a diferentes tipos de esforços mecânicos (Corrêa et al., 2024).

Dentre esses atributos, a densidade básica assume papel de destaque, especialmente por sua relação direta com a qualidade da madeira e sua viabilidade como matéria-prima para diversas finalidades. Essa propriedade é considerada essencial em setores como a produção de celulose, o processamento industrial por serragem, a fabricação de móveis e painéis, bem como na geração de energia a partir de biomassa, incluindo lenha, carvão vegetal, briquetes e pellets (Welter et al., 2024).

Esse cuidado na avaliação das propriedades decorre da própria natureza complexa da madeira, cuja composição química e estrutura anatômica conferem ao material um

comportamento altamente anisotrópico. Além disso, variáveis ambientais como a incidência solar, o tipo de solo, o regime pluviométrico e demais condições climáticas influenciam significativamente essas propriedades, inclusive entre indivíduos da mesma espécie. Dessa forma, torna-se imprescindível realizar uma caracterização físico-mecânica detalhada, sobretudo quando a madeira se destina a aplicações estruturais (Lima et al., 2024). Entre os parâmetros mais sensíveis a essas variações estão o módulo de elasticidade (MOE), o módulo de ruptura (MOR), a resistência ao impacto, a abrasão, a dureza e a rugosidade superficial (Godinho et al., 2021).

2.4 Propriedades Mecânicas

A madeira é um material de grande versatilidade e uso difundido em diversas aplicações, mas nem todas as espécies disponíveis apresentam propriedades físicas e mecânicas adequadas para contextos que exigem alta resistência e durabilidade. Em especial, madeiras de baixa densidade e com estrutura porosa costumam apresentar limitações significativas que comprometem seu aproveitamento industrial em larga escala.

Para superar esses entraves, têm sido desenvolvidas diversas técnicas de modificação da madeira, buscando aperfeiçoar suas características estruturais. Dentre essas alternativas, destaca-se o tratamento termomecânico, que se mostra uma solução eficiente e ambientalmente sustentável (Freitas et al., 2016). Esse processo envolve a aplicação de calor e pressão controlados, promovendo mudanças na estrutura interna da madeira que resultam em maior densidade e resistência.

Estudos demonstram que os efeitos do tratamento térmico não se distribuem uniformemente entre todas as propriedades mecânicas. A resistência à flexão (MOR), por exemplo, tende a ser mais afetada do que o módulo de elasticidade (MOE), indicando que o comportamento da madeira sob carga e sua capacidade de deformação sofrem alterações distintas (Medeiros et al., 2025). Essa diferença precisa ser considerada na escolha do tratamento mais adequado para cada aplicação específica.

Além disso, a presença de água na estrutura da madeira exerce influência direta sobre suas propriedades mecânicas. Alterações no teor de umidade afetam a massa específica e, consequentemente, a resistência do material. Conforme Araújo (2017), essa resistência diminui à medida que o teor de umidade se eleva, até atingir o ponto de saturação das fibras, a partir do qual as propriedades tendem a se estabilizar.

Outro fator essencial na caracterização da madeira é seu comportamento anisotrópico, ou seja, suas propriedades variam conforme a direção das fibras. Para facilitar análises técnicas, a madeira é frequentemente considerada um material ortotrópico, com propriedades avaliadas nas direções longitudinal, radial e tangencial (Kuniyoshi, 2024). Essa abordagem permite uma compreensão mais precisa do seu desempenho estrutural.

A análise microscópica reforça essa complexidade estrutural, evidenciando o papel decisivo das paredes das fibras na rigidez da madeira, especialmente nas espécies folhosas. Por outro lado, madeiras com alta concentração de parênquimas, células menos densas, frágeis e frequentemente carregadas de amido, tendem a apresentar menor resistência, sobretudo em situações de tração. A distribuição, o formato e a espessura dessas células também influenciam diretamente as propriedades mecânicas do material (Kuniyoshi, 2024).

Por fim, observa-se que, dependendo do método e da intensidade da modificação aplicada, as propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas da madeira podem ser mantidas ou até mesmo aprimoradas. A melhora no desempenho estrutural, aliada à estética aprimorada da

madeira modificada, contribui para sua crescente aplicação tanto em ambientes internos quanto externos (Ahmed e Adamopoulos, 2018).

2.5 Propriedades Acústicas

A acústica, segundo o American National Standards Institute (ANSI), é definida como a ciência que estuda o som em seus diversos aspectos, desde sua geração e propagação até os efeitos que ele produz. Inserida no campo da física das ondas, essa disciplina investiga fenômenos que se manifestam como oscilações periódicas (Medeiros et al., 2002).

Esse fenômenos ondulatórios dividem-se, basicamente, em dois tipos principais: ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas. As ondas mecânicas, como o som, dependem de um meio material para se propagar; já as ondas eletromagnéticas, que incluem a luz e as cores, resultam da movimentação de partículas subatômicas e não exigem um meio físico para se deslocarem (Galvão et al., 2018).

O som, portanto, é caracterizado como uma onda mecânica longitudinal que se propaga em meios físicos como o ar, a água ou sólidos, por meio de zonas alternadas de compressão e rarefação. Esse movimento gera vibrações nas partículas do meio, ocasionando colisões sucessivas entre elas. As ondas sonoras podem ser descritas por grandezas como velocidade, amplitude, direção e período, parâmetros que originam outras, como frequência e comprimento de onda (Medeiros et al., 2002).

A amplitude da onda está diretamente relacionada à intensidade sonora, refletindo as variações de pressão durante a propagação. Já a frequência, medida em hertz (Hz), representa o número de ciclos de vibração por segundo e é um dos principais fatores que determinam a altura do som (Costa et al., 2003).

Esse conceitos são fundamentais na construção e avaliação de instrumentos musicais, especialmente no que se refere à propagação e à irradiação das ondas sonoras nos materiais utilizados. A resistência que um material oferece à propagação dessas ondas está ligada ao seu módulo de elasticidade dinâmico, uma propriedade que pode ser determinada por métodos acústicos, como o uso de ultrassom e a análise da propagação de ondas de tensão (Neto et al., 2008).

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico é feita por meio de ensaios não destrutivos, com destaque para técnicas que utilizam as frequências naturais de vibração e a análise da atenuação acústica (Júnior, 2018). O valor do módulo tende a aumentar com a frequência de excitação, o que indica maior rigidez do material (Ballarin e Nogueira, 2015). A atenuação acústica, por sua vez, representa a capacidade do material de absorver ou dissipar energia sonora: quanto menor a atenuação, melhor o desempenho acústico da madeira (Laudares et al., 2022).

Cada objeto possui uma ou mais frequências naturais de vibração, determinadas principalmente por sua massa e rigidez. Um aumento na massa tende a reduzir essas frequências, enquanto um aumento na rigidez as eleva (Calvino, 2017). Quando um corpo é excitado externamente, ele vibra preferencialmente em suas frequências naturais e nos harmônicos correspondentes (UFC, s.d.), o que torna esses dados essenciais para a avaliação acústica de materiais como a madeira.

Dentro desse contexto, Portela (2014) demonstrou que a madeira tropical marupá (*Simarouba amara*) apresenta propriedades acústicas favoráveis à construção de instrumentos de corda (cordofones), com base em testes experimentais e simulações numéricas aplicadas tanto ao tampo quanto ao corpo do instrumento.

No entanto, por se tratar de um material de origem orgânica, a madeira apresenta elevada variabilidade em suas propriedades acústicas. Essa variação ocorre não apenas entre espécies diferentes, mas também entre indivíduos da mesma espécie e, inclusive, entre partes distintas de uma mesma árvore. Tal variabilidade confere singularidade a cada peça de madeira. Em determinados casos, algumas espécies são consideradas insubstituíveis devido à combinação única de características físicas, mecânicas e acústicas. Um exemplo clássico é o Pau-Brasil (*Paubrasilia echinata*), amplamente valorizado na confecção de arcos de violino (Haddad et al., 2023; Fletcher, 1999; Brémaud et al., 2008).

Outro aspecto relevante é a higroscopidez da madeira, que influencia diretamente sua estabilidade dimensional e seu desempenho acústico. Tratamentos térmicos costumam reduzir a capacidade da madeira de absorver umidade; no entanto, essa alteração pode ser reversível caso o material seja exposto a ambientes com altos níveis de umidade (Zeniya et al., 2019). Isso reforça a noção de que certas modificações induzidas termicamente podem ter caráter temporário, o que deve ser considerado na aplicação acústica desses materiais.

2.6 Processo de Reversibilidade

O envelhecimento da madeira tem sido amplamente associado a transformações irreversíveis em sua estrutura, como a decomposição de hemiceluloses. Contudo, estudos recentes indicam que parte das alterações provocadas tanto pelo envelhecimento natural quanto pelo envelhecimento artificial (hidrotérmico) podem ser parcialmente revertidas por meio da umidificação ou reidratação da madeira (Obataya et al., 2002; Maejima et al., 2019). Essas evidências sugerem que o envelhecimento envolve também mudanças temporárias e reversíveis na parede celular da madeira.

Essa reversibilidade pode estar intimamente ligada ao processo de climatização e ao uso frequente de instrumentos musicais antigos, tornando-se um aspecto relevante para a preservação e o ajuste acústico desses objetos. Compreender os efeitos do envelhecimento, tanto os irreversíveis quanto os reversíveis—torna-se, portanto, essencial para restaurar ou imitar as características físicas da madeira envelhecida utilizada em instrumentos musicais históricos.

Nesse sentido, Obataya (2016) citou que o envelhecimento em longo prazo pode melhorar a qualidade acústica da madeira de pinheiro-vermelho, corroborando a percepção empírica de artesãos e músicos. No entanto, investigações posteriores demonstraram que essas melhorias podem não ser permanentes. Maejima et al. (2019) mostraram que a umidificação afeta significativamente as propriedades vibracionais da madeira envelhecida. Por exemplo, ao submeter à madeira a umidade relativa de 100%, observou-se uma redução no módulo de elasticidade (E') e um aumento no fator de perda ($\tan \delta$), indicando uma reversão temporária dos efeitos do envelhecimento, possivelmente relacionada à reabertura de microporos e à reestruturação dos polímeros da parede celular.

Considerando tais evidências, o tratamento hidrotérmico tem se destacado como uma alternativa ecologicamente viável para melhorar o desempenho da madeira. Quando a madeira é aquecida em meio de ar, vapor ou óleo a temperaturas superiores a 100 °C observa-se ganhos em estabilidade dimensional, durabilidade e resistência mecânica (Sandberg et al., 2013). Essas características despertam o interesse de luthiers, que buscam reproduzir, em curto prazo, os efeitos acústicos proporcionados pelo envelhecimento natural ao longo de décadas.

Diante desse contexto, o presente estudo adotou uma metodologia baseada nos protocolos descritos por Wentzel, Altgen e Militz (2018), submetendo amostras previamente

tratadas termicamente a três diferentes condições experimentais: (i) climatização a 20 °C e 65% de umidade relativa (condição A), (ii) secagem a vácuo a 20 °C sob pressão de -2,5 kPa (condição B) e (iii) imersão contínua em água por um período de duas semanas (condição C). Complementarmente, conforme proposto por Karami et al. (2020), as amostras também foram submetidas a ciclos de secagem até massa anidra, seguidos por fases de estabilização em cinco diferentes condições de adsorção e dessorção.

Por fim, destaca-se que o efeito da umidade relativa durante o aquecimento (RH_h) nos tratamentos hidrotérmicos também deve ser considerado, já que a degradação térmica dos componentes da madeira é diretamente influenciada pelas condições de umidade durante o processo (Zeniya et al., 2019). Esse comportamento higroscópico alterado, e sua possível reversibilidade, afeta não apenas as propriedades físicas da madeira, mas também sua estabilidade ao longo do tempo, aspecto particularmente relevante para aplicações sensíveis como os instrumentos musicais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Preparação das Amostras

Foram utilizadas madeiras de *Simarouba amara* (marupá) e *Cordia goeldiana* (freijó) provenientes de pré-tratamentos de vaporização e/ou lixiviação, como mostra a figura 1, com posterior tratamento térmico em estufa elétrica a vácuo na temperatura de 150°C. A metodologia do processo de modificação térmica seguiu o descrito por Laudares et al. (2022). Utilizaram-se dados coletados pelo autor dois anos antes, os quais foram comparados com os dados obtidos nesta pesquisa após o processo de umidificação e secagem das amostras. Para fins comparativos, consideraram-se as propriedades físicas, mecânicas e acústicas.



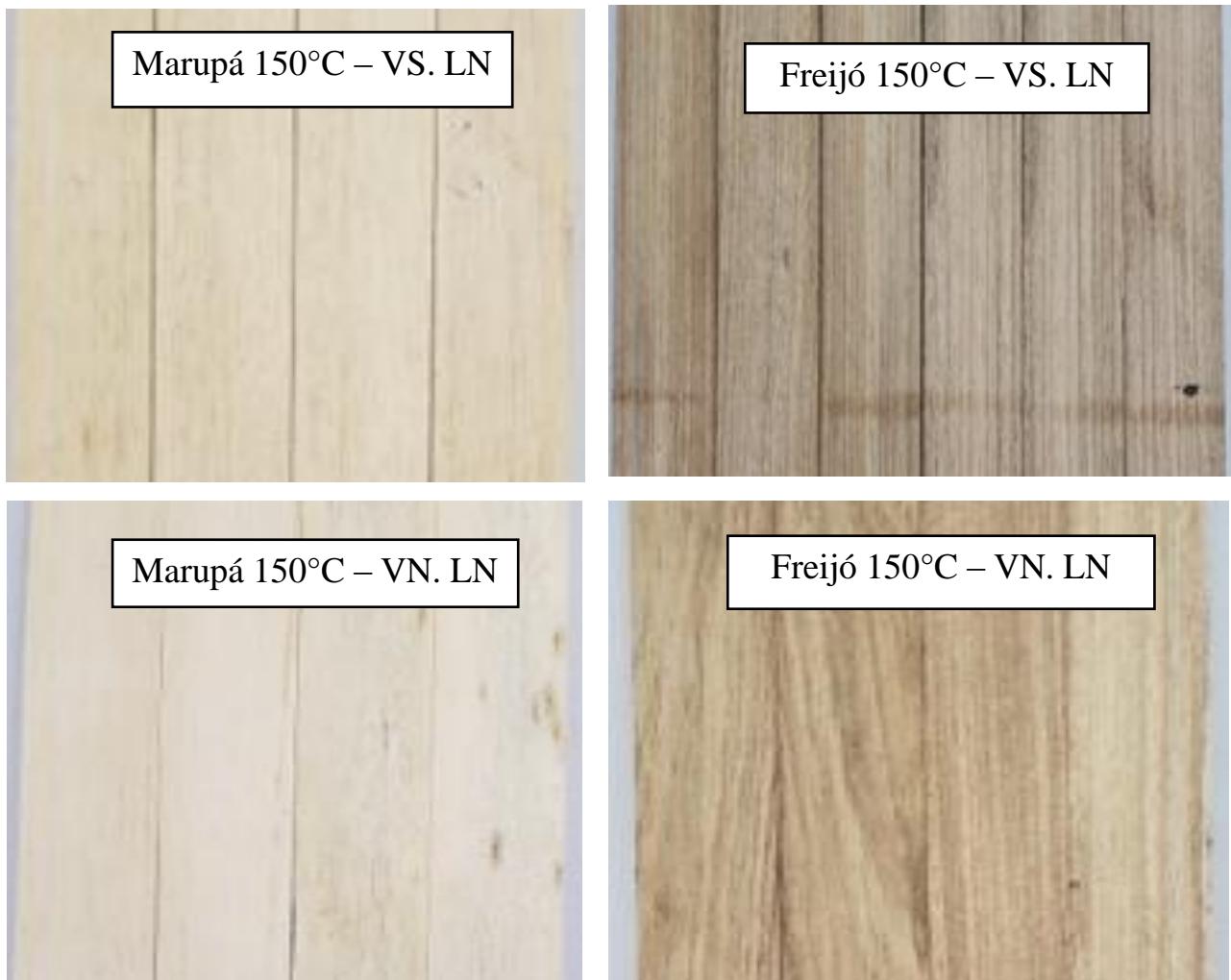


Figura 1. Demonstração das madeiras de marupá e freijó após 24 meses em climatização com seus respectivos tratamentos, em que VN.LN é a madeira não vaporizada e não lixiviada, VN.LS é não vaporizada e lixiviada, VS.LN é vaporizada e não lixiviada; VS.LS é vaporizada e lixiviada

3.2 Processo de Umidificação e Secagem

Após um período de 24 meses de climatização, as amostras de madeira modificadas termicamente foram reavaliadas com o objetivo de investigar possíveis alterações em suas propriedades físicas, mecânicas e acústicas ao longo do tempo. Essa etapa inicial teve como foco verificar se as características adquiridas durante o tratamento térmico se mantiveram estáveis, avaliando a influência do envelhecimento natural em condições controladas de armazenamento.

Na sequência, as amostras foram submetidas a um processo controlado de variação da umidade relativa do ar (UR), com o intuito de analisar a reversibilidade das propriedades físicas, mecânicas e acústicas da madeira. Para isso, as madeiras inicialmente passaram por uma etapa de umidificação, onde foram acondicionadas em cilindro de aço inox com fechamento hermético (postmix), de forma que as amostras não entrassem em contato com a água no fundo do recipiente, com umidade relativa maior ou igual a 90%, devido a presença de água no fundo do recipiente. Para a etapa de secagem, utilizou-se sílica como agente dessecante. Em todas as fases, a umidade relativa interna do ambiente foi rigorosamente controlada. O uso do postmix visou garantir um ambiente homogêneo, livre de interferências externas, favorecendo o controle preciso da umidade.

Após esse ciclo, as amostras foram transferidas para um ambiente com UR intermediária de 65% e temperatura constante de 22 °C, até obter massa constante.

Devido o material de estudo ser destinado a uso acústico, foi adotado procedimentos que simulassem condições de serviço interno da madeira (sem exposição direta à água, como ocorre com madeira destinada às condições em uso externo). Sendo demonstrado pela figura 2. Para tal, a metodologia adotada neste trabalho baseou-se em protocolo adaptado de Wentzel, Altgen e Militz (2018), que expôs madeiras tratadas termicamente a três diferentes condições de envelhecimento e umidade. Com a estabilização alcançada, foram repetidos os ensaios acústicos e mecânicos, com o objetivo de avaliar os efeitos das variações de umidade nas propriedades dos materiais. Esse processo de variação de UR, seguido da reavaliação das amostras, foi denominado neste estudo como etapa de “re-umidificação”.

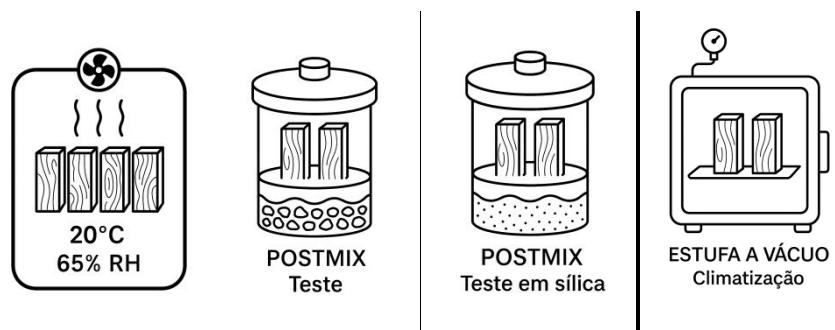


Figura 2. Demonstração do processo de umidificação e secagem das madeiras de marupá e freijó após 24 meses em climatização



Figura 3. Demonstração do postmix utilizado para o processo de umidificação e secagem da madeira. A: Postmix utilizado como câmara para controle de umidade durante o processo de

condicionamento das amostras de madeira. B: Monitoramento da temperatura e umidade relativa dentro do postmix durante a etapa de umidificação das amostras. C: Etapa de secagem das amostras de madeira em estufa controlada, com registro das condições internas de temperatura e umidade

3.3 Propriedades Físicas

Foram determinados o teor de umidade e a densidade aparente das amostras. A densidade aparente (Equação 1) foi calculada com base na relação entre massa e volume para um determinado teor de umidade, enquanto a umidade (Equação 2) foi expressa em base seca.

$$Da = \frac{m}{v} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde, “ Da ” representa a densidade aparente em g/cm³, “ m ” representa a massa em g e “ v ” representa o volume, em mL.

$$TU = 100 \times \left(\frac{M_{úmida} - M_{seca}}{M_{seca}} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde, “ TU ” representa o teor de umidade em %, “ $M_{úmida}$ ” representa a massa úmida em g e “ M_{seca} ” representa a massa seca, em g.

3.4 Propriedades Mecânicas

3.4.1 Ensaio Mecânico

Para a análise mecânica, foi empregado o método de flexão estática. Considera-se, nesse contexto, que a madeira é tenaz quando apresenta elevada deformação sob esforços de flexão ou torção antes de sua ruptura (Stolf et al., 2000). O procedimento consiste na aplicação de carga no ponto central da amostra, com a posterior avaliação da deformação. Para a execução da análise, seguiu-se o disposto na norma ABNT NBR 7190/2022, que estabelece os critérios para ensaios de flexão estática em elementos de madeira.

Com o intuito de determinar o módulo de elasticidade estático (Eest), foram realizados ensaios preliminares de resistência em amostras adicionais previamente selecionadas, com o objetivo de obter o valor médio do módulo de ruptura ou da tensão de resistência característica da espécie.

Os ensaios foram executados em uma máquina universal de ensaios Contec UMC 300, com capacidade de até 30 toneladas. Utilizou-se célula de carga com capacidade de 20 kgf, a qual aplicou força no centro das amostras. Primeiro aplicou-se carga até atingir um deslocamento de 1,5mm e posteriormente de 3,0 mm, para cada deslocamento pré-definido foram registradas as respectivas cargas, sendo o vão entre apoios de 340 mm. A partir disso foi calculado o módulo de elasticidade estático, dado pela Equação 3.

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{4 \times \Delta v \times b \times h^3} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que, “ ΔF ” representa a variação de carga entre os deslocamentos de 3,0mm e 1,5 mm, “ L ” representa o vão livre entre os apoios em mm, “ Δv ” representa a variação dos deslocamentos no centro do vão, ou seja, 1,5mm, “ b ” representa a largura da seção transversal no centro da amostra, em mm e “ h ” representa a espessura da seção transversal no mesmo ponto de medição, em mm.

3.4.1 Ensaio Acústico

A caracterização das propriedades acústicas foi realizada por meio do método de vibração transversal, conforme descrito na norma ASTM E1876 (2022), também denominado método de vibração livre-livre. Nessa técnica, as amostras foram sustentadas entre dois apoios paralelos, posicionados a 22,4% do comprimento total da peça a partir de cada extremidade livre, correspondendo aos pontos nodais do primeiro modo harmônico, conforme descrito por Laudares et al. (2022).

As ondas sonoras da amostra foram promovidas por impactos aplicados transversalmente em seu ponto médio, utilizando um martelo calibrado para esse fim. O sinal acústico resultante foi captado por um microfone instalado no lado oposto ao impacto e, posteriormente, processado por meio do software *Fast Fourier Analyzer (FFT)*, desenvolvido pela empresa FAKOOP® Enterprise. A frequência obtida referente ao primeiro harmônico foi interpretada como a frequência natural de vibração da amostra (fr), de acordo com Laudares et al. (2022).

A determinação da atenuação acústica foi realizada por meio do amortecimento por decremento logarítmico (DL), também denominado *Logarithmic Decrement of Damping (LDD)*. Esse método consiste na análise da resposta em frequência do material após a aplicação de uma excitação por impulso, conforme descrito por Jesus et al. (2023). A atenuação é calculada com base na razão entre duas amplitudes consecutivas do sinal no domínio temporal, conforme representado na Equação 4. Embora esse cálculo possa ser feito manualmente, o software *FFT Analyzer*, desenvolvido pela FAKOOP® Enterprise, realiza essa estimativa de forma automática.

$$Dl = (1 \times n^{-1}) \ln \ln A0 \times An^{-1} \approx \pi \times \tan \delta \quad (\text{Equação 4})$$

Para a estimativa do módulo de elasticidade dinâmico (Ed), foi utilizada a Equação 5, comumente empregada em estudos baseados em métodos de ressonância, conforme também apresentado por Laudares et al. (2022). Esta equação leva em consideração propriedades físicas e geométricas da amostra, como densidade e dimensões lineares.

$$E_{din} = 0,9464 \frac{\rho \cdot f_n^2 \cdot L^4}{h^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que, “ E_{din} ” representa o módulo de elasticidade dinâmico, em $\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$, “ ρ ” representa a densidade, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, “ f_n ” representa a frequência de vibração, em Hz, “ L ” representa o comprimento da amostra (cm) e “ h ” representa a espessura da amostra (cm).

A Eficiência de Conversão Acústica (ECA) foi calculada a partir da Equação 6, que expressa a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico, a densidade cúbica do material e o amortecimento. Considerando que o valor de DL já é fornecido diretamente pelo software, a equação pode ser aplicada substituindo os dados correspondentes.

$$ECA = \pi \sqrt{\frac{E_{din}}{\rho^3}} \quad (\text{Equação 6})$$

A velocidade de propagação do som no material (V_{som}) foi estimado com base na equação 7, que relaciona diretamente o módulo de elasticidade dinâmico a densidade da amostra conforme a equação a seguir:

$$V_{som} = \sqrt{\frac{E_{din}}{\rho}} \quad (\text{Equação 7})$$

3.5 Análise dos Dados

A partir dos dados experimentais obtidos, realizaram-se testes estatísticos preliminares para avaliar a adequação dos pressupostos do modelo. A normalidade das distribuições foi verificada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov, enquanto a homogeneidade das variâncias (homocedasticidade) foi avaliada pelo teste de Brown-Forsythe para Homogeneidade de Variância- 5%.

Em seguida, procedeu-se à análise de variância fatorial (ANOVA), considerando os efeitos principais dos tratamentos aplicados — vaporização, lixiviação, antes e após os de umidificação-secagem — sobre as propriedades físicas, mecânicas e acústicas das amostras. Posteriormente, foram contrastadas e comparadas às madeiras com seus diferentes tratamentos antes e após ciclo de umidificação-secagem, comparações foram feitas tendo como referência o material controle e calculado a variação percentual das propriedades. Todas as análises estatísticas foram conduzidas com o auxílio do software **Statistica® 14.0**

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Freijó

A análise dos resultados obtidos para a madeira de Freijó, conforme apresentado na Tabela 2, permitiu avaliar os efeitos do tratamento térmicos sobre o desempenho do material, tanto antes quanto após o teste de reversibilidade. Inicialmente, observou-se que após um período de 24 meses, os tratamentos submetidos à vaporização revelaram um aumento expressivo na densidade aparente da madeira. Esse incremento foi ainda mais acentuado nas amostras que passaram pelo processo de lixiviação. Tal comportamento sugere que a lixiviação pode favorecer a lixiviação de extrativos solúveis em água ou a redistribuição de componentes que contribuem para o aumento da massa, sobretudo após a exposição à vaporização. É possível que esse ganho de densidade esteja associado tanto à absorção de água pela parede celular quanto à reorganização interna dos elementos estruturais da madeira.

Adicionalmente, a microestrutura anatômica da madeira de Freijó pode influenciar de forma significativa os resultados observados. Conforme apontado por Kuniyoshi et al. (2024), a rigidez da madeira de espécies folhosas está intimamente ligada à espessura e à organização das paredes celulares das fibras. Em madeiras com menor módulo de elasticidade, é comum encontrar uma maior proporção de células parenquimatosas, tipos celulares menos densos e

menos rígidos, que funcionam como reservatórios de amido. A predominância dessas células pode reduzir a resistência do material, especialmente sob cargas de tração.

Além da quantidade de parênquimas, aspectos como sua forma, disposição, espessura da parede celular e características particulares também exercem influência direta sobre o desempenho mecânico da madeira. No caso do Freijó, a baixa presença dessas células pode estar associada à sua alta densidade aparente, o que, por sua vez, favorece um melhor comportamento mecânico, sobretudo em contextos que demandam elevada rigidez estrutural (Kuniyoshi et al., 2024).

Tabela 2. Estatísticas com valores médios e desvio para cada variável analisada, da madeira de freijó, antes e após testes de reversibilidade com as variações percentuais tendo o controle como referência.

Madeira freijó										
Propriedades	Vaporizado	Lixiviado	Antes			Após			Variação-%	
			Estatísticas			Estatísticas			antes	Após
Fr (Hz)	controle		240	±	3,57 ^a	240	±	3,57 ^a	0,00	0,00
	não	não	255	±	5,36 ^b	253	±	5,84 ^b	6,25	5,42
		sim	258	±	6,15 ^b	253	±	9,46 ^b	7,50	5,42
	sim	não	273	±	9,39 ^c	273	±	9,22 ^c	13,75	13,75
		sim	261	±	6,14 ^b	261	±	6,1 ^b	8,75	8,75
Da (g/cm ³)	controle		0,479	±	0,019 ^a	0,479	±	0,019 ^a	0,00	0,00
	não	não	0,507	±	0,051 ^a	0,512	±	0,051 ^{ab}	5,85	6,89
		sim	0,522	±	0,045 ^{ab}	0,529	±	0,045 ^{ab}	8,98	10,44
	sim	não	0,500	±	0,028 ^a	0,502	±	0,028 ^a	4,38	4,80
		sim	0,566	±	0,048 ^b	0,568	±	0,049 ^b	18,16	18,58
E.e (kgf·cm ⁻²)	controle		118,44	±	12,689 ^a	118,44	±	12,68 ^a	0,00	0,00
	não	não	131,24	±	13,228 ^{ab}	131,24	±	13,22 ^{ab}	10,81	10,81
		sim	137,47	±	10,308 ^{bc}	137,47	±	10,30 ^{bc}	16,07	16,07
	sim	não	147,85	±	17,003 ^{bc}	147,85	±	17,00 ^{bc}	24,83	24,83
		sim	153,33	±	10,767 ^c	153,33	±	10,76 ^c	29,46	29,46
Ed.t (kgf·cm ⁻²)	controle		124,85	±	7,836 ^a	124,85	±	7,836 ^a	0,00	0,00
	não	não	133,81	±	13,307 ^a	133,84	±	13,58 ^a	7,17	7,20
		sim	140,70	±	9,250 ^{ab}	137,35	±	7,469 ^{ab}	12,69	10,01
	sim	não	153,40	±	18,187 ^{ab}	156,91	±	18,98 ^b	22,86	25,67
		sim	155,01	±	11,396 ^b	157,50	±	11,30 ^b	24,15	26,15
E.esp*(kgf·cm ⁻²)	controle		260,55	±	10,728	260,55	±	10,72	0,00	0,00
	não	não	264,24	±	6,991	261,36	±	6,792	1,41	0,31
		sim	269,87	±	11,248	260,68	±	16,32	3,58	0,05
	sim	não	306,12	±	22,370	312,04	±	22,85	17,49	19,76
		sim	274,11	±	8,293	277,80	±	8,297	5,20	6,62
Dl	controle		20,7	±	0,97 ^a	20,7	±	0,97 ^a	0,00	0,00
	não	não	12,8	±	2,22 ^{bc}	14,8	±	0,96 ^b	-38,16	-28,50
		sim	11,5	±	0,58 ^c	14,3	±	1,50 ^b	-44,44	-30,92
	sim	não	14,0	±	0,56 ^b	15,3	±	0,50 ^b	-32,37	-26,09
		sim	13,0	±	2,12 ^{bc}	13,5	±	1,73 ^b	-37,20	-34,78
E.C.A*. (dB)	controle		1.623	±	123	1.623	±	123 ^a	0,00	0,00
	não	não	2.590	±	577	2.156	±	330 ^b	59,58	32,84

	sim	2.730	±	154	2.164		357	^b	68,21	25,00
	não	2.485	±	102	2.299	±	149	^b	53,11	33,33
sim	sim	2.261	±	117	2175		112	^b	39,31	41,65

Em que: Fr é a frequência natural do primeiro harmônico; Da é a densidade aparente da madeira; E.e é o módulo de elasticidade estático; E.dt é o módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal; E.esp é o módulo de elasticidade específico. Dl é o decaimento logarítmico e ECA é a eficiência de conversão acústica. Médias seguidas por letras minúsculas distintas revelam diferenças significativas, pelo teste T ao nível de 5% de significância. O valor da média é seguido pelo desvio-padrão. Material controle é referente à madeira que não passou por nenhum processo de modificação (sem vapor, sem lixiviação e sem temperatura a 150°C). * avaliação por boxplot, devido às variâncias não homogêneas.

Quanto à frequência natural de ressonância do primeiro harmônico (Fr), observou-se que quando a madeira foi submetida à vaporização, mas não foi lixiviada, estas apresentaram o mesmo resultado quanto a sua variação antes e após o teste de reversibilidade, sugerindo assim que a propriedade manteve as suas características. Concomitantemente a esse resultado foi possível analisar que dentre os outros pré-tratamentos a madeira que foi vaporizada, mas não foi lixiviada apresentou o maior resultado quanto à frequência natural do primeiro harmônico, tanto antes do processo de reversibilidade quanto após, sugerindo uma maior atenuação do som. Laudares et al. (2022), também constatou que, o tratamento vaporizado apresentou um valor de Fr mais elevado em comparação aos tratamentos hidrotérmicos combinados, superando o grupo controle em 4,6%, para a espécie *Khaya ivorensis*.

O decaimento logarítmico (Dl) apresentou uma redução expressiva em todos os tratamentos. Essa diminuição indica aumento na dissipação de energia durante as vibrações, o que significa que a madeira tratada pode ter um som de maior durabilidade e sustentação, aumentando assim, sua qualidade em aplicações que exigem um bom desempenho acústico, como instrumentos musicais ou painéis de ressonância. Essa redução do Dl foi menos acentuada nas amostras lixiviadas. Isso ratifica o encontrado por com Laudares et al. (2022) para a espécie *Khaya ivorensis*, onde o autor encontrou uma diminuição nos valores de Dl para todos os tratamentos avaliados (envolvendo a vaporização e lixiviação). Especificamente, para a madeira submetida à vaporização a 123 °C que apresentou valores médios de Dl semelhantes aos dos tratamentos sem aplicação de vapor. O autor sugere que essa variação no decaimento logarítmico pode estar relacionada a alterações estruturais nas cadeias poliméricas da madeira, influenciadas pela temperatura do tratamento e pelo tipo de atmosfera aplicada.

O módulo de elasticidade estático (E.e) e o módulo de elasticidade dinâmico (Ed.t) apresentaram comportamento semelhante. Ambos aumentaram consideravelmente com a vaporização, indicando uma madeira mais rígida, para este tratamento, característica desejável para usos estruturais e acústicos. Estudos mostram que o módulo de elasticidade dinâmico específico (Eesp) tende a crescer com os tratamentos térmicos, especialmente nas temperaturas de 123 °C e 190 °C (Laudares et al., 2022). Essa variação está ligada ao teor de umidade na parede celular, pois sua elevação reduz a densidade das hemiceluloses e, consequentemente, o módulo de elasticidade (Hill, Altagen e Rautkari, 2021). Em instrumentos musicais, como tampos harmônicos de cordas, é desejável uma alta razão entre os módulos E/G, pois uma anisotropia elástica elevada favorece a radiação sonora, embora essa relação deva ser menos acentuada para os tampos do que para outros componentes (Sproßmann et al., 2017).

O módulo de elasticidade específico (E.esp) e a eficiência acústica (ECA) foram avaliadas por boxplot, como mostra a Figura 3, devido às suas variâncias não serem homogêneas, como mostra o Anexo 3. Através do boxplot foi possível analisar que o E.esp. apresentou aumento principalmente quando a madeira não foi lixiviada, mas foi vaporizada, o que demonstra uma melhora na eficiência estrutural quando a madeira passa por pré-

tratamento. Isso sugere que a madeira tratada apenas por vaporização pode apresentar um melhor desempenho mecânico, visto que a sua variação antes e após tratamento foi maior.

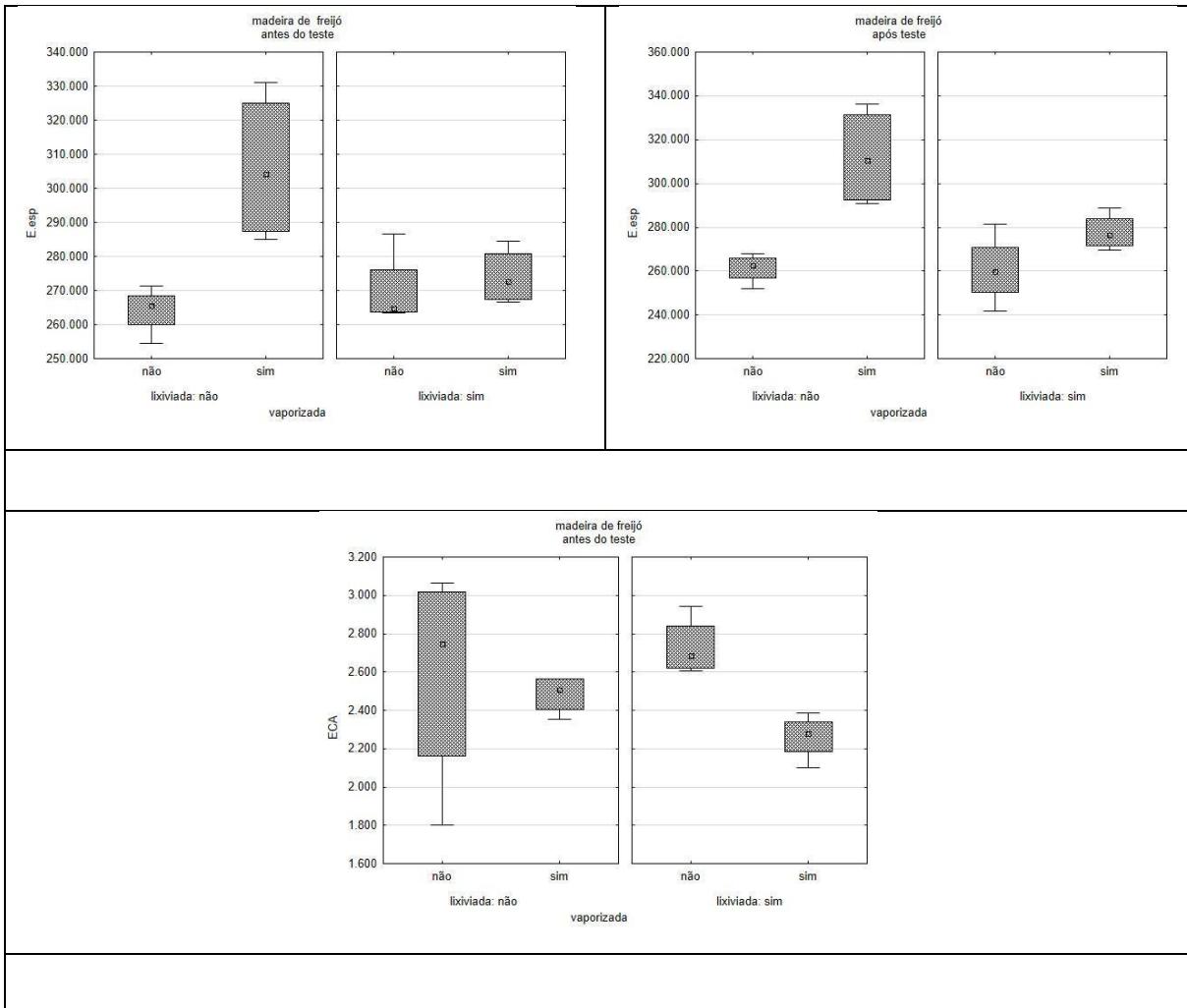


Figura 4. Box plot das variáveis módulo específico antes e após teste e ECA antes do teste, em função da lixiviação e vaporização para a madeira de freijó.

De forma geral, os resultados demonstram que a vaporização para a madeira de freijó contribuiu positivamente para o aumento da rigidez e da acústica, o que pode ser benéfico para aplicações estruturais e acústicas. No entanto, a lixiviação surge como um fator de aumentar algumas propriedades, como a densidade e a redução eficiência acústica e o decaimento logarítmico após os testes de reversibilidade. Portanto, para finalidades estruturais, de resistência e acústica, a vaporização pode ser considerada eficaz. Além disso, os resultados demonstraram que todos os tratamentos (lixiviação e vaporização) acarretaram um ganho acústico, tanto no Dl quanto no ECA.

4.2 Marupá

Para madeira de Marupá, como mostra a Tabela 3, antes e após o teste de reversibilidade, o trabalho realizado permitiu avaliar o impacto dos processos de vaporização e lixiviação sobre as propriedades físicas, mecânicas e acústicas. De maneira geral, os resultados revelaram que os pré-tratamentos aplicados promovem alterações expressivas, com

diferentes efeitos dependendo da combinação de vaporização e lixiviação, como mostra o Anexo 2 e 4.

No caso da densidade aparente (Da), observou-se que o grupo vaporizado e que também passou pelo processo de lixiviação apresentou as maiores reduções, próximas a 11%. E, as madeiras que foram somente vaporizadas também apresentaram redução de densidade, embora em menor grau, indicando que a vaporização atenua esse efeito de redução da densidade aparente. Os resultados obtidos estão alinhados com os encontrados por outros pesquisadores. Karami et al. (2020) destacaram que a perda de massa aumenta com maiores temperaturas e tempos de exposição. De forma semelhante, Mania et al. (2020) relataram uma leve diminuição da densidade da madeira a 120 °C e 160 °C, com uma redução mais acentuada a 180 °C. Čermák et al. (2015) também observou que o tratamento térmico provocou alterações químicas expressivas, refletidas em uma perda de massa que variou entre 2,8% e 10,4%, dependendo da espécie analisada. As hemiceluloses foram os componentes mais suscetíveis à degradação, ao passo que houve um aumento na concentração de extrativos.

A análise da frequência natural de ressonância do primeiro harmônico (Fr) demonstrou que nos materiais que não foram vaporizados e não foram lixiviados, a frequência natural aumentou consideravelmente, indicando um ganho da atenuação acústica, com leve ganho após os testes de reversibilidade, sugerindo que os testes de vaporização e lixiviação não contribuíram significativamente para estabilizar a frequência e reduzir a sensibilidade do material para às alterações promovidas pelo teste de reversibilidade. Nas amostras vaporizadas e não lixiviadas, as variações foram menores.

No que diz respeito ao decaimento logarítmico (Dl), o comportamento foi variado. Nas amostras sem vaporização, o decaimento diminui inicialmente, mas apresentou leve recuperação após o teste de reversibilidade. Já nas amostras vaporizadas, algumas apresentaram aumento do decaimento, principalmente o grupo vaporizado e lixiviado, que registrou um acréscimo de aproximadamente 25%. Os resultados indicaram que para a madeira de marupá, o processo do tratamento, pode intensificar a dissipação da energia vibracional, o que tende a prejudicar o desempenho acústico do material. De maneira geral, os pré-tratamentos aplicados — vaporização e lixiviação — contribuíram para a diminuição da atenuação acústica da madeira de marupá, refletindo em um menor atrito interno. Por outro lado, quando a madeira não passou por pré-tratamentos e foi apenas submetida ao tratamento em estufa a vácuo a 150 °C, observou-se um aumento na atenuação. Portanto, a associação entre vaporização e lixiviação promoveu um aumento de cerca de 25% na atenuação, um resultado considerado indesejável para aplicações acústicas.

Tabela 3. Resultados estatísticos e comparações entre médias, para a madeira de marupá após teste de antes e após o teste de reversibilidade.

Madeira de Marupá										
Propriedades	Vaporizado	Lixiviado	Antes				Após			Variação-% antes Após
			Estatísticas				Estatísticas			
Fr (Hz)	não	controle	227	±	4,84	^a	227	±	4,84	^a 0 0
		não	256	±	13,32	^b	254	±	13,44	^b 12,67 12,07
		sim	254	±	6,10	^b	256	±	8,03	^b 12,10 12,98
	sim	não	230	±	1,67	^a	232	±	2,14	^a 1,44 2,22
		sim	237	±	19,89	^a	235	±	20,60	^a 4,47 3,61

	controle	0,452	±	0,014	^a	0,452	±	0,014	^a	0
Da (g/cm ³)	não	0,436	±	0,016	^{ab}	0,439	±	0,016	^{ab}	3,52 -2,82
	sim	0,412	±	0,021	^{bc}	0,413	±	0,019	^{bc}	8,77 -8,67
	não	0,423	±	0,003	^{bc}	0,422	±	0,004	^{bc}	6,31 -6,56
	sim	0,402	±	0,030	^c	0,406	±	0,030	^c	11,0 3 10,23
	controle	101,4 02	±	8.953		101,40 2	±	8.953	^{ab}	0
	não	111,4 82	±	10,38 0		111,48 2	±	10,38 0	^a	9,94 9,94
	sim	104,4 01	±	5,314		104,40 1	±	5,314	^{ab}	2,96 2,96
	não	99,82 4	±	613		99,824	±	613	^b	1,56 -1,56
E.e (kgf·c m ⁻²) *	sim	83,53 7	±	7,095		83,387	±	7,257	^c	17,6 2 17,77
	controle	110,7 58	±	7,932	^{ab}	110,75 8	±	7,932	^a	0
	não	113,7 66	±	10,38 4	^a	114,98 7	±	10,88 9	^a	2,72 3,82
	sim	106,6 06	±	5,795	^{ab}	108,49 0	±	5,893	^{ab}	3,75 -2,05
	não	100,4 93	±	1,211	^b	103,19 8	±	2,407	^b	9,27 -6,83
Ed.t (kgf·c m ⁻²)	sim	85,01 8	±	5,707	^c	85,912	±	5,884	^c	23,2 4 22,43
	controle	244,9 05	±	10,76 9		244,90 5	±	10,76 9		0
	não	261,6 16	±	31,56 5		262,53 4	±	32,48 3	^b	6,82 7,20
	sim	259,1 34	±	20,92 1		263,44 8	±	21,98 1		5,81 7,57
	não	237,3 08	±	2,591		244,33 8	±	4,783		3,10 -0,23
E.esp* (kgf·c m ⁻²)	sim	210,6 86	±	27,68 4		210,93 3	±	28,17 5		13,9 7 13,87
	controle	19,9	±	0,83	^a	19,9	±	0,83	^{ab}	0
	não	18,3	±	2,87		19,3	±	3,59	^b	8,29 -3,27
	sim	21,0	±	1,41		21,4	±	1,69		5,53 7,54
	não	19,5	±	0,58		20,4	±	0,61		2,01 2,33
DI*	sim	25,0	±	4,19		25,0	±	6,68		25,6 3 25,63
	controle	1.623	±	123		1.623	±	123	^a	0 0
	não	2.078	±	491		1.976	±	517	^b	28,0 2 21,76
	sim	1.864	±	262		1.845	±	275	^b	14,8 7 13,69

sim	sim	1.855	±	68	1.807	±	77	^b	14,2	11,36
		1.634	±	373	1.503	±	384	^b	0,66	-7,37

Em que: F_r é a frequência natural do primeiro harmônico; D_a é a densidade aparente da madeira; $E.e$ é o módulo de elasticidade estática; $E.dt$ é o módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal; $E.esp$ é o módulo de elasticidade específico. Dl é o decaimento logaritmo e ECA é a eficiência de conversão acústica. Médias seguidas por letras minúsculas distintas revelam diferenças significativas, pelo teste T ao nível de 5% de significância. O valor da média é seguido pelo desvio-padrão. Material controle é referente à madeira que não passou por nenhum processo de modificação (sem vapor, sem lixiviação e sem temperatura a 150°C). * avaliação por boxplot, devido à variância não homogênea.

O módulo de elasticidade estática ($E.e$) apresentou uma tendência de aumento nas amostras não vaporizadas e não lixiviadas, demonstrando um possível ganho de rigidez. Por outro lado, nas amostras vaporizadas, especialmente sem lixiviação, houve uma expressiva redução da rigidez estática, com quedas superiores a 17%, mesmo após o teste de reversibilidade. Esses resultados sugerem que a vaporização sem o acompanhamento da lixiviação melhora a estrutura interna da madeira. Ou seja, os pré-tratamentos tendem a reduzir as propriedades mecânicas da madeira, consequentemente, apenas o tratamento realizado em estufa a vácuo se mostrou eficaz para melhorar a rigidez da madeira de marupá ($E.e$).

Quando analisado o módulo de elasticidade dinâmico ($E.dt$), a tendência foi semelhante. As amostras tratadas sem vaporização apresentaram aumentos discretos. Contudo, as amostras vaporizadas, principalmente aquelas não lixiviadas, apresentaram reduções significativas no módulo dinâmico, chegando a perdas superiores a 22%. A lixiviação foi capaz de reduzir parcialmente essas perdas, mas não evitou completamente o comprometimento da elasticidade dinâmica.

O módulo de elasticidade específico ($E.esp$) e a eficiência acústica (ECA) foram avaliadas por boxplot, como mostra a figura 2, devido às suas variâncias não serem homogêneas, como mostra o Anexo 2 e 4. Através do boxplot foi possível analisar que o módulo de elasticidade específico ($E.esp$) também foi impactado pelos tratamentos. O grupo vaporizado e sem lixiviação (tratamento 6), apresentou um aumento significativo, o que indica uma melhoria na eficiência acústica da madeira. Por outro lado, as amostras que foram vaporizadas apresentaram perdas, especialmente no grupo vaporizado e lixiviado, que teve uma redução. A lixiviação foi eficaz para aumentar essa perda. Tal resultado vai contra com o encontrado por Laudares et al. (2022) que encontrou os melhores resultados no tratamento apenas vaporizado (10,7 %). De acordo com Zhu e Liu. (2016), um valor elevado de $E.esp$ indica uma vibração mais eficiente da madeira, mas esse fator isolado não é suficiente para determinar se a madeira possui boa qualidade acústica. Além disso, conforme Laudares et al. (2022), madeiras com baixa densidade e alto módulo de elasticidade são consideradas de excelente qualidade acústica.

Por fim, a eficiência de conversão acústica (E.C.A) apresentou resultados diversos. O tratamento sem vaporização e sem lixiviação resultou em um aumento significativo da eficiência acústica. As amostras vaporizadas apresentaram ganhos menores ou, em alguns casos, perdas, sendo que o grupo vaporizado sem lixiviação apresentou um aumento após o teste de reversibilidade. A vaporização contribuiu para reduzir a magnitude das perdas acústicas, mas não foi suficiente para manter os níveis observados nas madeiras que não foram lixiviadas e nem vaporizadas.

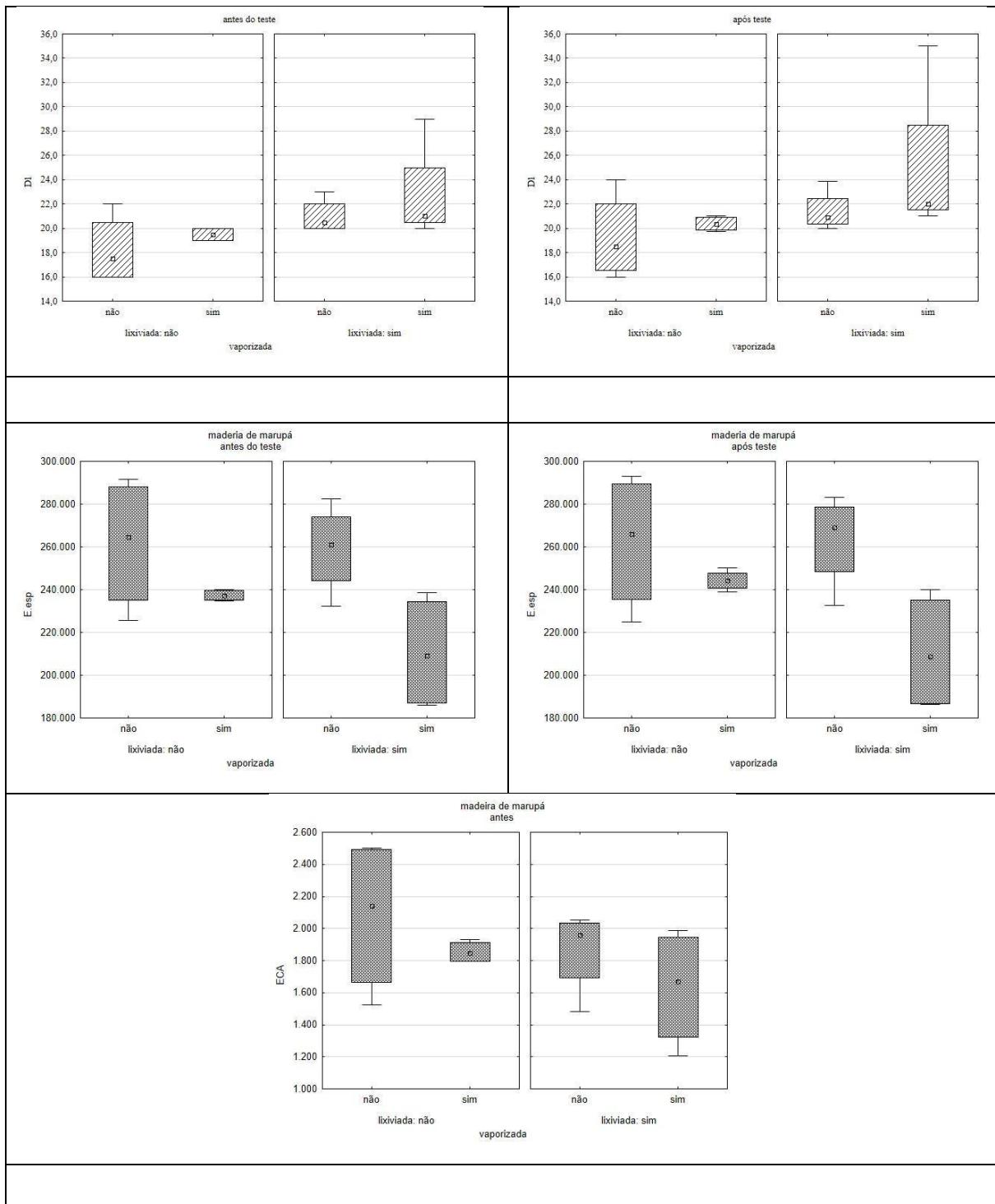


Figura 5. Box plot das variáveis do módulo específico antes e após teste e ECA antes do teste, em função da lixiviação e vaporização para madeira de marupá.

Os resultados evidenciam que os tratamentos da madeira de marupá podem reduzir o decremento logarítmico, a eficiência acústica e os módulos de elasticidade específico e dinâmico, mas aumenta a densidade e a frequência, sendo assim, os tratamentos (vaporização e lixiviação) demonstraram-se não essenciais para promover um aumento nas propriedades acústicas. Quando a madeira não passou por pré-tratamento, observou-se uma melhora em seu desempenho na sua estabilidade estrutural e em sua acústica. Ainda assim, mesmo com os pré-tratamentos algumas propriedades não retornaram aos níveis observados no material

controle, indicando que o tratamento térmico causa alterações irreversíveis no desempenho da madeira.

Os pré-tratamentos pioraram a madeira de marupá. Quando a madeira não foi pré-tratada houveram ganhos em seu decremento logarítmico, na sua eficiência acústica e nos módulos de elasticidade.

4.3 Comparação estatística das madeiras antes e após teste de reversibilidade

A análise de variância (ANOVA) para as madeiras de freijó e marupá revelou o efeito significativo no teste de reversibilidade, para as variáveis: frequência natural de ressonância (fr), densidade aparente (Da), módulo de elasticidade estático (E.e), módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal (Ed.t) e módulo de elasticidade específico (E.esp), Anexo 5.

Após a realização do teste de reversibilidade, como mostra a Tabela 4, foi possível observar que, para a madeira de freijó, a maioria das propriedades avaliadas não apresentou alterações significativas, menos para o quesito do decaimento logarítmico e para a eficiência acústica. A frequência natural do primeiro harmônico (Fr) manteve-se praticamente constante antes e após o teste, assim como a densidade aparente (Da), o módulo de elasticidade estático (E.e), o módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal (Ed.t) e o módulo de elasticidade específico (E.esp).

No entanto, houve uma redução significativa no decaimento logarítmico (Dl), indicando uma maior dissipação de energia após o teste. Além disso, a eficiência de conversão acústica (ECA) do freijó apresentou uma redução significativa, sugerindo uma possível diminuição no desempenho acústico da madeira após a reversibilidade.

Para a madeira de marupá, os resultados apontaram uma estabilidade geral em todas as propriedades analisadas. A frequência natural de ressonância do primeiro harmônico (Fr), a densidade aparente, os módulos de elasticidade (tanto estático quanto dinâmico), o módulo de elasticidade específico, o decaimento logarítmico e a eficiência de conversão acústica não apresentaram diferenças estatisticamente significativas após o teste. Estes resultados indicam que o teste de reversibilidade não afetou de forma relevante as características físicas e acústicas do marupá.

Tabela 4. Quadro de análise de variâncias para as madeiras de freijó e marupá após teste de reversibilidade e seus efeitos nas seguintes propriedades.

Propriedades	Teste Reversibilidade	Estatísticas			
		freijó		Marupá	
Fr (Hz)	antes	262	± 9,2	^a	244 ± 15,9 ^a
	após	260	± 10,8	^a	245 ± 16,2 ^a
Da (g/cm ³)	antes	0,524	± 0,048	^a	0,419 ± 0,022 ^a
	após	0,528	± 0,047	^a	0,420 ± 0,022 ^a
E.e (kgf·cm ⁻²)	antes	142.47 8	± 14.721	^a	99.811 ± 12.244 ^a
	após	142.47 8	± 14.721	^a	99.774 ± 12.316 ^a
Ed.t (kgf·cm ⁻²)	antes	145.73 3	± 15.098	^a	101.471 ± 12.445 ^a
	após	146.40 2	± 16.490	^a	103.147 ± 12.765 ^a
E.esp	antes	278.58	± 20.773	^a	242.186 ± 29.827 ^a

		9				
	após	277.97	7	\pm 25.371	^a	
D.1	antes	12,8	\pm 1,64	^a	20,4	\pm 2,94
	após	14,4	\pm 1,31	^b	21,5	\pm 4,14
ECA (dB)	antes	2.516	\pm 327	^a	1.858	\pm 342
	após	2.199	\pm 237	^b	1.783	\pm 362

Em que: Fr é a frequência natural do primeiro harmônico; Da é a densidade aparente da madeira; $E.e$ é o módulo de elasticidade estático; $E.dt$ é o módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal; $E.esp$ é o módulo de elasticidade específico. Dl é o decaimento logarítmico e ECA é a eficiência de conversão acústica. Médias seguidas por letras minúsculas distintas revelam diferenças significativas, pelo teste Tukey ao nível de 5% de significância. O valor da média é seguido pelo desvio-padrão.

Segundo Liu et al. (2020), madeiras com densidade entre 0,4 e 0,5 g/cm³, como o freijó, tendem a apresentar boas características acústicas para uso em caixas de ressonância de instrumentos de corda. Nesses casos, o módulo de elasticidade dinâmico costuma ser elevado, a tangente de perda é reduzida, a eficiência de vibração sonora é aumentada e, como resultado, o som produzido torna-se mais intenso e claro. Assim, tanto o freijó quanto o marupá podem ser considerados madeiras adequadas para aplicações acústicas, especialmente na fabricação de instrumentos musicais.

De forma geral, conclui-se que o teste de reversibilidade não promoveu alterações significativas na maioria das propriedades das madeiras estudadas. Contudo, o freijó apresentou mudanças pontuais, principalmente no aumento do decaimento logarítmico e na redução da eficiência acústica, o que pode influenciar negativamente seu desempenho para aplicações que exijam boa resposta acústica. O marupá, por outro lado, demonstrou maior estabilidade frente ao teste, mantendo suas propriedades praticamente inalteradas.

Porém, como mostra a figura 6, as madeiras que foram vaporizadas de freijó apresentaram uma igualdade estatística, apesar da redução do decrecimento logarítmico (Dl) e da eficiência acústica (ECA). Sendo assim, o processo de vaporização garante a não reversibilidade das propriedades Dl e ECA para esta madeira.

Portanto, a reversibilidade das propriedades acústicas depende da espécie e do tipo de tratamento, sendo a vaporização um fator decisivo para a permanência das modificações. Esses achados ampliam o entendimento sobre o comportamento acústico de madeiras termicamente modificadas, especialmente para aplicações que exigem estabilidade sonora e durabilidade.

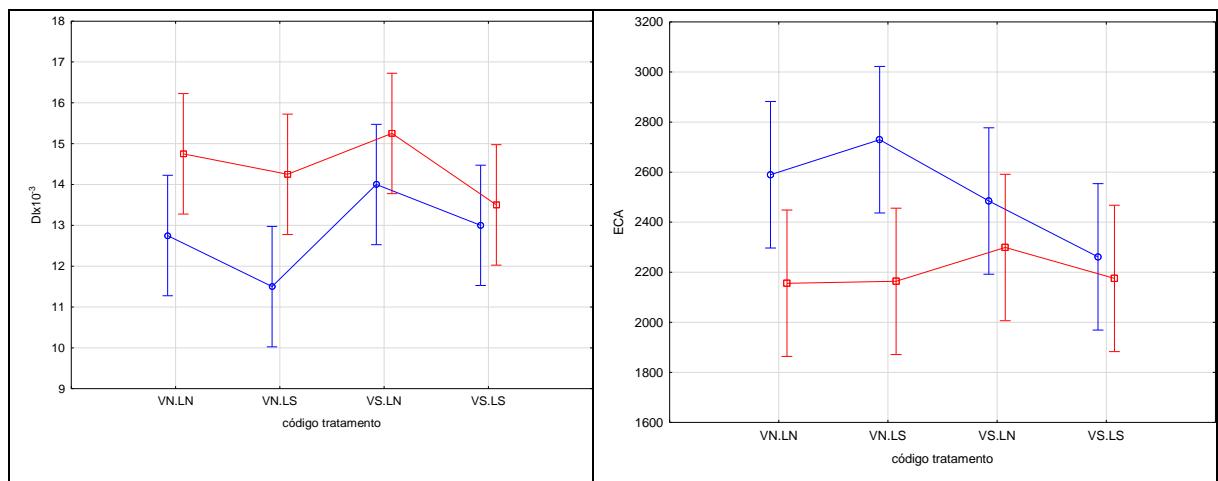


Figura 6. Gráfico das variáveis DI e ECA, antes e depois do teste de reversibilidade para todos os pré-tratamentos, em que a linha vermelha representa os resultados depois do processo de umidificação e a linha azul representa os resultados antes do processo de umidificação. VN.LN é a madeira não vaporizada e não lixiviada, VN.LS é não vaporizada e lixiviada, VS.LN é vaporizada e não lixiviada; VS.LS é vaporizada e lixiviada

5. CONCLUSÃO

O tratamento térmico afeta de forma distinta as propriedades acústicas do freijó e do marupá quando submetidas a ciclos de umidificação e secagem. No freijó, houve uma recuperação parcial das propriedades acústicas, especialmente do decrecimento logarítmico (DI) e da eficiência de conversão acústica (ECA), indicando reversibilidade. No entanto, quando submetido à vaporização, essas propriedades se mantiveram estatisticamente estáveis, confirmando a irreversibilidade promovida por esse tratamento. Já no marupá, as alterações físicas, mecânicas e acústicas permaneceram irreversíveis mesmo após os ciclos, sugerindo que o tratamento térmico promove mudanças permanentes nesta espécie.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E-1876-22: “**International Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration**”, Philadelphia, 2022.
- BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de Pinus taeda por ultra-som**. Engenharia Agrícola, v. 25, n. 1, p. 19–28, abr. 2015.
- BLANCO-FLÓREZ, J, SILVA, J.R.M.; BRAGA, P.P.C.; LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F. 2015. **Simulation in service of young teak wood floors**. *Revista Matéria*, 20: 1048-1060.
- BRÉMAUD, I. et al. **Vibrational properties of tropical woods with historical uses in musical instruments**. International Conference of COST Action IE0601 Wood Science for the Preservation of Cultural Heritage. Braga, Portugal, p. 17-23, 2008.
- Brischke C, Alfredsen G. **Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay**. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2020 May;104(9):3781-3795. doi: 10.1007/s00253-020-10479-1. Epub 2020 Mar 6. Erratum in: *Appl Microbiol Biotechnol*. 2021 Aug;105(14-15):6121.
- BUCUR, V. **The acoustics of wood** 2 ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer Series in Wood Science, 2006.

CALVINO, V. B. **Fórmulas simplificadas baseadas em medições de vibrações para estimativa de frequências naturais de casco de navios.** Universidade Federal do Rio de Janeiro: 2017.

COSTA, J.A. **Classificação de madeiras da Amazonia para composição de instrumento musical de corda por meio da técnica de excitação por impulso.** Orientador: Dra. Claudete Catanhede do Nascimento. 2017. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Ciências Florestais e Ambientais da Universidade Federal do Amazonas, UFA, 2017. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/5649/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Joelma%20A.%20Costa.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ČERMÁK, PETR, BAAR et al.. "Wood-water interactions of thermally modified, acetylated and melamine formaldehyde resin impregnated beech wood" *Holzforschung*, vol. 76, no. 5, 2022, pp. 437-450.

ČERMÁKP, RAUTKARI L, HORACEK P et al. **Analysis of Dimensional Stability of Thermally Modified Wood Affected by Re-Wetting Cycles** (2015). *BioResources* 10:3242–3253

ENDO, K. et al. **Effects of heating humidity on the physical properties of hydrothermally treated spruce wood.** *Wood sci technol*. V. 50, P.1161–1179, 2016.

ENDO K, OBATAWA E, ZENIYA N, MATSUO M. **Effects of heating humidity on the physical properties of hydrothermally treated spruce wood** (2016). *Wood Sci Technol* 50:1161–1179.

ESTEVES BM, PEREIRA HM. **Modificação da madeira por tratamento térmico: uma revisão** (2009). *BioResources* 4:370–404.

FLETCHER, N. **Materials for Musical Instruments.** Acoustics Australia, Canberra, v. 27, n.1, p. 5- 9, 1999.

FREITAS, A. S., GONÇALVEZ, J. C., & DEL MENEZZI, C. H.. (2016). **Tratamento Termomecânico e seus Efeitos nas Propriedades da *Simarouba amara* (Aubl.).** *Floresta E Ambiente*, 23(4), 565–572

GALVÃO, L. G. O. et al. **Efeitos da acústica e da temperatura no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira de *Eucalyptus grandis*.** Orientador: PROF. DR. Ailton Teixiera do Vale. 2018. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, UnB, 2018. Disponível em:<https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/32315/1/2018_LuizGustavoOliveiraGalv%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2025.

GODINHO, D.; ARAÚJO, S.d.O.; QUILHÓ, T.; DIAMANTINO, T.; GOMINHO, J. **Thermally Modified Wood Exposed to Different Weathering Conditions: A Review.** *Forests* 2021, 12, 1400.

GÖKEN, J.. **Temperature-dependent damping of the tonewood spruce.** *Journal of Alloys and Compounds*. 856 158182, 2021.

HILL, C., ALTGEN, M. & RAUTKARI, L. **Modificação térmica da madeira — uma revisão: alterações químicas e higroscopidade.** *J Mater Sci* 56 , 6581–6614 (2021).

JANKOWSKY, I.; GALINA, M. SECAGEM DE MADEIRAS. [s.l.] ANPM, 2013. JESUS, D. S. de. **Melhoria das propriedades físicas, acústicas, mecânicas e biológicas da madeira pela técnica de acetilação**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro: 2024.

JÚNIOR, N. T. A. et al. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto através dos ensaios de resistência à compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO CBC2018, 60., 2018, Foz do Iguaçu. Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2018 [...]. [S. l.: s. n.], 2018. p. 13. Disponível em: <https://academic.oup.com/plcell/article/32/12/3652/6118605> . Acesso em: 10 de maio de 2025.

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.

KUNIYOSHI, J. R. G., AGUIAR, F. da S., ROCHA, C. É. R., SOUZA, C. G. F. de ., CHRISTOFORO, A. L., ALMEIDA FILHO, F. M. de ., & LAHR, F. A. R.. (2024). **Relações entre os módulos de elasticidade à compressão, tração e flexão para madeiras tropicais**. Ambiente Construído, 24, e137617.

LAUDARES, F. A. L., NASCIMENTO, A. M. do ., OLIVEIRA, R. N., SANTOS, R. R. dos ., & MOURA, F. D. G.. (2023). **Avaliação das propriedades acústicas de mogno africano (*Khaya ivorensis*) submetido a tratamento térmico em estufa e autoclave**. *Matéria (rio De Janeiro)*, 28(1), e20230035.

LUCARELLI, A.; PAGNOZZI, U. **The thermally treated wood in the world with thermo vuoto method** In: EUROPEAN CONFERENCE ON WOOD MODIFICATION, 11,2024, Florença. Books of abstract [...], Florença, 2024. p. 5 –6.

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.

MEDEIROS, J. R., NASCIMENTO, A. M., BATISTA, D.C., SOUZA, N.D. **Efeito dos processos de modificação térmica nas propriedades químicas, mecânicas e acústicas da madeira**. Revista Caderno Pedagógico-Studies Publicações Ltda 2025. ISSN:1983-0882.

MONTERO, M. J.; DE LA MATA, J.; ESTEBAN, M.; HERMOSO, E.. **Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross section pieces for structural use of scots pine from Spain**. *Maderas Ciencia y Tecnología*. 17(2): 407 – 420, 2015.

MORESCHI, J. C., NETO, A.L et al. **Efeito das diferentes madeiras no isolamento acústico**, v. 38, n. 4, p. 673–682, 2008.

OBATAYA, E., **Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments**, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 27, Supplement, 2017, Pages S63-S69, ISSN 1296-2074.

OBATAYA, E. et al. Hygroscopicity of heat-treated wood. II **Reversible and irreversible reductions in the hygroscopicity of wood due to heating**, 2002.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. Orientador: Benedito Rocha Vital. 2003. 122 p. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) - Engenharia Florestal da

Universidade Federal de Viçosa, UFV, 2003. Disponível em: <https://1library.org/document/oy8k7wry-caracteristicas-anatomicas-quimicas-termicas-madeira-especies-ocorrecia-nordestino.html>. Acesso em: 5 jun. 2025

PORTELA, M. S. Estudo das propriedades acústicas da madeira amazônica marupá para tampo de violão. Orientador: Arcanjo Lenzi. 2014. 150 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/132450/332924.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 jun. 2025.

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.

WASTOWSKI, A. D. Química da Madeira (Chemistry of Wood). Interciência, 2018.

WENTZEL M, ALTGEN M, MILITZ H. Analyzing reversible changes in hygroscopicity of thermally modified eucalypt wood from open and closed reactor systems (2018). *Wood Sci Technol* 52:889–907.

ZENIYA, N., OBATAWA, E., ENDO-UJIIE, K. et al. Changes in vibrational properties and colour of spruce wood by hygrothermally accelerated ageing at 95–140 °C and different relative humidity levels. *SN Appl. Sci.* 1, 7 (2019).

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.

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.

ANEXO A – TESTE DE NORMALIDADE PELO MÉTODO DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Anexo 1. Teste de normalidade por Kolmogorov -Smirnov, ao nível de 5% de significância, para madeira de freijó.

Propriedades	Madeira de Freijó			
	D tabelado n=32	D tabelado n=38	D calculado n=32	D calculado n=38
Fr	0,234	0,221	0,152	0,096
Da	0,234	0,221	0,110	0,175
E.e	0,234	0,221	0,130	0,109
E.dt	0,234	0,221	0,122	0,131
E.esp	0,234	0,221	0,153	0,158
Dl	0,234	0,221	0,174	0,183
ECA	0,234	0,221	0,073	0,087

Em que: quando n=32 não é considerado o controle, quando n=38 é considerado o controle

Anexo 2. Teste de normalidade por Kolmogorov -Smirnov, ao nível de 5% de significância para madeira de marupá.

Propriedades	Madeira de Marupá			
	D tabelado		D calculado	
	n=32	n=38	n=32	n=38
Fr	0,234	0,221	0,096	0,097
Da	0,234	0,221	0,108	0,110
E.e	0,234	0,221	0,208	0,181
E.dt	0,234	0,221	0,156	0,125
E.esp	0,234	0,221	0,138	0,139
Dl	0,234	0,221	0,243	0,263
ECA	0,234	0,221	0,129	0,121

Em que: valores em negrito indica a não normalidade dos dados, a 5% de significância, pelo método de Kolmogorov-Smirnov.

ANEXO B – TESTE DE HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIA PELO TESTE DE BROWN-FORSYTHE

Anexo 3. Teste de heterocedasticidade e análise de variância quanto ao efeito da vaporização e lixiviação para a madeira de freijó, antes e após teste de reversibilidade

Variável	Valores de F	Antes			Após		
		Brown-Forsyth	Efeito da vaporização		Brown-Forsyth	Efeito da lixiviação	
			vaporiz	lixiviação		vaporiza	lixiviaçã
Fr	F	1,18	12,5	0,2	0,97	11,3	2,29
	p	0,36	0,01	0,65	0,44	0,01	0,15
D _a	F	0,45	1,4	5,4	0,42	0,42	3,39
	p	0,72	0,26	0,04	0,74	0,53	0,09
E.e	F	1,10	21,3	11	1,10	6,7	0,87
	p	0,39	0,02	0,01	0,39	0,02	0,37
E.dt	F	1,76	26,5	11,2	2,42	11,1	0,1
	p	0,21	0,01	0,01	0,12	0,01	0,76
*E.esp	F	3,81			3,73		
	p	0,04			0,04		
Dl	F	0,28	1,4	5,5	1,06	0,04	3,16
	p	0,84	0,26	0,04	0,40	0,85	0,1
*ECA	F	3,28			1,09	0,39	0,22
	p	0,06			0,39	0,55	0,65

Em que: valores em negrito revelam significâncias e, Fr é a frequência natural do primeiro harmônico; Da é a densidade aparente da madeira; E.e é o módulo de elasticidade estático; Edt é o módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal; E.esp é o módulo de elasticidade específico; Dl é o decaimento logaritmo e ECA é a eficiência de conversão acústica. Variáveis com * não apresentaram variâncias homogêneas e serão analisados por boxplot.

Anexo 4. Teste de heterocedasticidade e análise de variância quanto ao efeito da vaporização e lixiviação para a madeira de marupá, antes e após teste de reversibilidade

Variável	Valores	Antes	Após
----------	---------	-------	------

de F	Brown-Forsyth	Efeito da		Brown-Forsyth	Efeito da		
		vaporizaçã o	lixiviaçã o		vaporizaçã o	lixiviaçã o	
Fr	F	1,60	12,5	0,2	1,30	11,3	2,29
	p	0,24	0,01	0,65	0,32	0,01	0,15
Da	F	1,09	1,4	5,4	1,16	0,42	3,39
	p	0,39	0,26	0,04	0,37	0,53	0,09
E.e	F	3,59	21,3	11	3,64	6,7	0,87
	p	0,05	0,02	0,01	0,04	0,02	0,37
E.dt	F	2,77	26,5	11,2	2,36	11,1	0,1
	p	0,09	0,01	0,01	0,12	0,01	0,76
*E.esp	F	7,60			5,07		
	p	0,00			0,02		
Dl	F	0,70	1,4	5,5	0,70	0,04	3,16
	p	0,57	0,26	0,04	0,57	0,85	0,10
*ECA	F	5,41			3,23	0,39	0,22
	p	0,01			0,06	0,55	0,65

Em que: valores em negrito revelam significâncias e, Fr é a frequência natural do primeiro harmônico; Da é a densidade aparente da madeira; E.e é o módulo de elasticidade estático; Edt é o módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal; E.esp é o módulo de elasticidade específico; Dl é o decaimento logaritmo e ECA é a eficiência de conversão acústica. Variáveis com * não apresentaram variâncias homogêneas.

Anexo 5. Teste de heterocedasticidade e análise de variância para as madeiras de freijó e marupá comparando as propriedades das madeiras antes e após o teste de reversibilidade.

Propriedades	Madeira de Freijó				Madeira de Marupá			
	Brown-Forsyth		ANOVA		Brown-Forsyth		ANOVA	
	F	p	F	p	F	p	F	p
Fr	0,20	0,66	0,26	0,61	0,00	0,97	0,00	0,97
Da	0,00	0,98	0,05	0,82	0,00	1,00	0,00	1,00
E.e	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,99	0,00	0,99
E.dt	0,05	0,83	0,01	0,91	0,02	0,88	0,02	0,88
E.esp	0,42	0,52	0,01	0,94	0,05	0,83	0,05	0,83
Dl	0,09	0,77	9,55	0,00	0,21	0,65	0,21	0,65
ECA	1,17	0,29	9,90	0,00	0,03	0,87	0,03	0,87

Em que: valores em negrito revelam significâncias e, Fr é a frequência natural do primeiro harmônico; Da é a densidade aparente da madeira; E.e é o módulo de elasticidade estático; Edt é o módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal; E.esp é o módulo de elasticidade específico; Dl é o decaimento logaritmo e ECA é a eficiência de conversão acústica.