



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

BRENT GRUENHAGEN ROCHA

**EFEITO DA PRÉ-SECAGEM E ORIENTAÇÕES DE CORTE NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E ACÚSTICAS DE MADEIRAS NATIVAS TRATADAS
TERMICAMENTE**

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
Dezembro – 2025



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

BRENT GRUENHAGEN ROCHA

**EFEITO DA PRÉ-SECAGEM E ORIENTAÇÕES DE CORTE NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E ACÚSTICAS DE MADEIRAS NATIVAS TRATADAS
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
DEZEMBRO – 2025

**EFEITO DA PRÉ-SECAGEM E ORIENTAÇÕES DE CORTE NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E ACÚSTICAS DE MADEIRAS NATIVAS TRATADAS
TERMICAMENTE**

BRENT GRUENHAGEN ROCHA

APROVADO EM:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO - UFRRJ
Orientador

MSc. JAQUELINE ROCHA DE MEDEIROS - UFRRJ
Membro

MSc. ROGÉRIO RODRIGUES DOS SANTOS - UFRRJ
Membro

Soon will be gone all the desert
Cities will cover each hill
Today will just be
A fond memory
Man walks among us
Be still, be still..."

(Marty Robbins 'Man Walks Among Us', 1963)

AGRADECIMENTOS

Seria uma grande injustiça agradecer de forma simples e direta a todos que me ajudaram a chegar até aqui. Escrever os agradecimentos de um trabalho como este me parece muito com um discurso de premiação como o Oscar: por mais sincero que você seja, sempre teme esquecer alguém que foi fundamental.

E, como em qualquer premiação que se preze, é um pecado capital não agradecer à família. Então, em primeiro lugar, quero agradecer ao meu pai, Iury, e à minha mãe, Rachelle, que sempre desejaram o melhor para mim e apoiaram as decisões que tomei ao longo do caminho.

Um agradecimento de coração às minhas avós, Sharyl e Sira, por quem tenho um imenso carinho e amor. Seu apoio e afeto são um tesouro que levo comigo.

Meu agradecimento também vai para meus irmãos, Jesse e Luke, que mesmo distantes estão presentes, sempre me trazem de volta à realidade quando preciso. A vocês, sou profundamente grato.

Um agradecimento especial à minha namorada, Clarissa Carvalho Santana. Não há palavras suficientes para descrever o quanto sua presença foi importante nos momentos mais difíceis. Sua paciência e apoio foram o alicerce que me manteve de pé.

Aos amigos que fiz no caminho dessa Rural: Gabriel Ouverney, Lucas Coelho, Nádia Brandão, Camila Lima, Raul Rodrigues, Gabi Camargo e Milene Ramos – que estiveram comigo em todas, sou grato pelo companheirismo que criamos. Aos amigos das fogueirinhas na rural e das várias resenhas e peregrinações que fizemos por essas terras da universidade.

Quero também agradecer à galera do Laboratório de Propriedades Mecânicas da Madeira, que me acompanhou nesse frenesi de empacotar esse experimento, então Gabriel Iuri, Rian, Jaqueline e Chico, essa é para vocês. E de agregado, o Karlos do laboratório do lado, que sempre aparecia de curioso.

À turma do terceiro módulo de Agrimensura, que tornaram essa jornada muito mais leve e divertida, meu muito obrigado. Um destaque aqui para o Pablo Berriel, quem eu simplesmente vi todos os dias nesse período durante o curso técnico no CTUR, e que acompanhou de perto todas as atualizações, e às vezes desesperos, da produção desse documento.

Aos professores que me guiaram, levo seus ensinamentos para a vida. Agradeço em especial aos professores João Vicente Latorraca, Emanuel Araújo e Alexandre Monteiro. Ter a oportunidade de ser monitor de vocês foi uma das experiências mais ricas que tive; aprendi um monte e levo cada ensinamento comigo. E, é claro, uma menção de enorme gratidão ao professor Alexandre Miguel, meu orientador. Foram tantos momentos de paciência e dedicação, que sou grato. Em um momento em que eu precisava de uma mão, o senhor estendeu a sua e guiou a um patamar que eu sozinho jamais alcançaria.

Esta jornada também foi marcada por experiências únicas que me moldaram profissionalmente. Agradeço ao LAMFLOR e às incríveis viagens e trabalhos de campo na REGUA, que transformaram a teoria em prática de uma forma inesquecível. Agradeço também aos amigos do Projeto Seringueira, com quem me aventurei rumo ao Sul da Bahia e produzimos ciência na serraria do instituto.

Um agradecimento também a Two Steps from Hell, que me deu estímulo e inspiração durante incontáveis noites.

Por fim, um agradecimento muito especial aos mestres que tornaram o possível nas oficinas: Mário, Glebson, Ari e Rogério, da serraria e marcenaria. Sua habilidade, paciência para ensinar e bom humor foram fundamentais em incontáveis projetos. Muito do que consegui construir devo a vocês.

RESUMO

O tratamento térmico é uma técnica utilizada para modificar propriedades da madeira, com potencial aplicação na área acústica. Este estudo investigou o efeito da pré-secagem e do tipo de corte nas propriedades mecânicas e acústicas de três madeiras tropicais: Cedro (*Cedrela spp.*), Freijó (*Cordia goeldiana*) e Marupá (*Simarouba amara*), termicamente tratadas. Foram analisados dois tipos de corte (radial e tangencial) para caracterizar sua influência nas propriedades avaliadas. Os corpos de prova foram submetidos a ciclos sequenciais de pré-secagem (70°C e 103°C) seguidos de tratamento final a 160°C, comparados com um grupo-controle tratado diretamente a 160°C. Avaliaram-se densidade, módulos de elasticidade estático e dinâmico, frequência de ressonância, decaimento logarítmico e eficiência de conversão acústica (ECA). Os resultados indicaram que a pré-secagem sequencial promoveu alterações mais homogêneas e controladas nas propriedades das madeiras. O tipo de corte influenciou significativamente as propriedades avaliadas, com o corte tangencial apresentando valores superiores em diversos parâmetros acústicos, embora com implicações práticas quanto à estabilidade dimensional. O Freijó destacou-se com os melhores valores acústicos absolutos. Verificou-se que a pré-secagem sequencial mostrou-se superior ao tratamento direto em 160°C, proporcionando transformações mais equilibradas. Conclui-se que a pré-secagem em etapas é uma estratégia eficiente para a otimização de propriedades de madeiras tropicais submetidas ao tratamento térmico, e que o tipo de corte é um fator relevante a ser considerado no processamento de madeiras para fins acústicos.

Palavras-chave: corte radial, corte tangencial, madeiras tropicais e eficiência de conversão acústica.

ABSTRACT

Thermal treatment is a technique used to modify wood properties, with potential application in the acoustic area. This study investigated the effect of pre-drying and cutting direction on the mechanical and acoustic properties of three tropical woods: Cedar (*Cedrela spp.*), Freijó (*Cordia goeldiana*), and Marupá (*Simarouba amara*), subjected to thermal modification. Two cutting directions (radial and tangential) were analyzed to characterize their influence on the evaluated properties. Specimens were submitted to sequential pre-drying cycles (70°C and 103°C) followed by a final treatment at 160°C, compared to a control group treated directly at 160°C. Density, static and dynamic modulus of elasticity, resonance frequency, logarithmic decrement, and acoustic conversion efficiency (ACE) were evaluated. The results indicated that sequential pre-drying promoted more homogeneous and controlled changes in wood properties. The cutting direction significantly influenced the evaluated properties, with tangential cutting showing superior values in several acoustic parameters, although with practical implications regarding dimensional stability. Freijó stood out with the best absolute acoustic values. Sequential pre-drying proved superior to direct treatment at 160°C, providing more balanced transformations. It is concluded that stepwise pre-drying is an efficient strategy for optimizing properties of thermally modified tropical woods, and that cutting direction is a relevant factor to be considered in the processing of woods for acoustic purposes.

Keywords: quarter sawn, rift sawn, tropical woods, acoustic conversion efficiency.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Tratamento Térmico e Secagem da Madeira	2
2.2. Espécies de Madeira Tropicais como Instrumentos Musicais	2
2.2.1. Cedro	4
2.2.2. Freijó	4
2.2.3. Marupá	5
2.2.4. Panorama das Madeiras Utilizadas neste Estudo	6
2.3. Método de Excitação por Impulso para Propriedades Acústicas	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1. Preparo das amostras	10
3.2. Protocolo de Tratamento Térmico e Avaliações	11
3.3. Propriedades físicas	13
3.3. Propriedades mecânicas	13
3.4. Análises estatísticas	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1. Análise Geral do Efeito do Tratamento e da Espécie nas Propriedades da Madeira	17
4.2. Influência do Tipo de Corte nas Propriedades das Espécies	22
4.2.1. Cedro	22
4.2.2. Freijó	23
4.2.3. Marupá	25
4.3. Visão geral	26
5. CONCLUSÃO	26
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de densidade, contração e módulo de elasticidade das espécies Cedro, Freijó e Marupá segundo o IPT e LPF.

Tabela 2. Valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) das propriedades físico-mecânicas e acústicas das madeiras de Cedro, Freijó e Marupá submetidas a diferentes condições de tratamento térmico.

Tabela 3. Agrupamento de médias pelo teste de Tukey (ANOVA) e teste de Dunn (Kruskal-Wallis) para sete propriedades físico-mecânicas da madeira de Cedro em função do tipo de corte e temperatura de secagem.

Tabela 4. Agrupamento de médias pelo teste de Tukey (ANOVA) e teste de Dunn (Kruskal-Wallis) para sete propriedades físico-mecânicas da madeira de Freijó em função do tipo de corte e temperatura de secagem.

Tabela 5. Agrupamento de médias pelo teste de Tukey (ANOVA) e teste de Dunn (Kruskal-Wallis) para sete propriedades físico-mecânicas da madeira de Marupá em função do tipo de corte e temperatura de secagem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição da Eficiência de Conversão Acústica (ECA) por categoria de madeira, com porcentagens representando a proporção de espécies no banco de dados de Brémaud (2012) (Adaptado de Brémaud, 2012).

Figura 2. Diferentes faces de corte do Cedro (IPT, 2023).

Figura 3. Diferentes faces de corte do Freijó (IPT, 2023).

Figura 4. Diferentes faces de corte do Marupá (IPT, 2023).

Figura 5. Diagrama em bloco de um típico aparelho de teste do método de excitação por impulso. (Adaptado de ASTM E1876-01, 2001).

Figura 6. Visão geral dos arranjos experimentais utilizados: (a) Norma ASTM E1876; (b) Abordagem proposta por Carbajo et al, (2022). (Carbajo et al, 2022).

Figura 7. Visualização de um sinal no domínio do tempo e da frequência (NTi Audio, [s.d.]).

Figura 8 - Visualização do decremento logarítmico em uma onda amortecida (Wikipedia, 2023).

Figura 9. Ilustração dimensional dos corpos de prova, com esquematização das direções anatômicas da madeira. À esquerda um exemplo de uma peça radial. (Adaptado de HURTADO DE MENDOZA; BORGES; SILVA, 2015).

Figura 10 - Fluxograma mostrando as etapas do tratamento térmico para cada grupo e sequência. (O autor).

Figura 11. Demonstração das amostras de madeira dentro da estufa a vácuo: A - Madeira em condição na condição de reabsorver água para atingir equilíbrio de umidade dentro da estufa; B - Todas as amostras adicionadas à estufa (grupo principal e controle) para o tratamento final de 160 °C. (O Autor)

Figura 12. Equipamento para Ensaios de Flexão: A - Máquina de Ensaios Universal Contenco UMC 300 do laboratório de Propriedades Mecânicas da Madeira, da UFRRJ; B - Demonstração da amostra apoiada em dois pontos para ensaios de flexão. (O Autor)

Figura 13. Esquema da barra (amostra) sofrendo flexão (Santos, 2021)

Figura 14. Ilustração do teste vibracional. (a) amostra de madeira; (b) fio de suporte; (c) microfone; (d) impulsor elétrico. (Adaptado de Obataya et al, 2020).

Figura 15. Arranjo de teste para método não destrutivo vibracional (excitação por impulso). (Adaptado de ASTM E1876-01, 2001).

Figura 16 - Resultados de densidade para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de densidade nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de densidade por tratamento.

Figura 17 - Resultados de Módulo de Elasticidade Estático para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Módulo de Elasticidade Estático nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Módulo de Elasticidade Estático por tratamento.

Figura 18 - Resultados de Módulo de Elasticidade Dinâmico para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Módulo de Elasticidade Dinâmico nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Módulo de Elasticidade Dinâmico por tratamento.

Figura 19 - Resultados de Módulo de Elasticidade Específico para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Módulo de Elasticidade Específico nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Módulo de Elasticidade Específico por tratamento.

Figura 20 - Resultados de Frequência de Ressonância para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Frequência de Ressonância nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Frequência de Ressonância por tratamento.

Figura 21 - Resultados de Decaimento Logarítmico para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Decaimento Logarítmico nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Decaimento Logarítmico por tratamento.

Figura 22 - Resultados Eficiência de Conversão Acústica (ECA) para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de ECA nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de ECA por tratamento.

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Teste de Normalidade e Homogeneidade da Variância

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material natural renovável de grande relevância, com aplicações que vão da construção civil à fabricação de instrumentos musicais, devido à sua combinação de resistência mecânica, baixa densidade, trabalhabilidade e propriedades acústicas e térmicas notáveis (GIBSON, 2012). No entanto, seu comportamento higroscópico – a capacidade de trocar umidade com o meio – é uma limitação tecnológica significativa. Variações no teor de umidade induzem tensões internas que resultam em instabilidade dimensional e defeitos como empenamentos e fissuras.

Esse fenômeno deve-se à constituição química e anatômica da madeira, especialmente à presença de hemiceluloses. Estas são polímeros heterogêneos e amorfos que compõem, junto à lignina, a matriz da parede celular. Por sua natureza química, estes polímeros são altamente hidrofílicos, absorvendo e liberando água ativamente, o que causa os ciclos de inchamento e contração. Para mitigar essas limitações, a modificação térmica (MT) é empregada para promover alterações químicas na parede celular por meio da exposição a temperaturas elevadas (160–240°C) em ambiente com baixo teor de oxigênio (ESTEVES & PEREIRA, 2009). Esse processo resulta na degradação parcial de hemiceluloses, conferindo maior estabilidade dimensional e menor capacidade higroscópica.

Contudo, a deterioração desses componentes pode reduzir as propriedades mecânicas da madeira (GARCIA *et al.*, 2012), devido à deterioração de polissacarídeos que compõe a parede celular, sendo a degradação das hemiceluloses o fator principal da diminuição da resistência (FERREIRA *et al.*, 2019). Ademais, o processo de pré-secagem realizado em diferentes temperaturas e ciclos pode influenciar a eficácia do tratamento térmico subsequente, pois a remoção controlada de umidade em etapas anteriores altera a resposta da madeira a temperaturas mais elevadas.

Em aplicações acústicas, como na luteria, as propriedades da madeira são determinantes para a qualidade sonora. Essa redução de propriedades mecânicas é particularmente relevante neste contexto. Aceita-se que um excelente tampo ressonante requer baixa anisotropia e alta eficiência de conversão acústica (OBATAYA, 2000). Um material ideal combina alto módulo de elasticidade dinâmico, baixa densidade (cerca de 430 kg·m⁻³) e baixo decaimento logarítmico, refletindo a capacidade de vibrar livremente e sustentar o som (DANIHELOVÁ *et al.*, 2022).

O efeito combinado do tratamento térmico e de diferentes protocolos de pré-secagem sobre essas propriedades ainda não é completamente compreendido, especialmente para espécies tropicais, que possuem estrutura anatômica e composição química distintas das madeiras tradicionalmente usadas (coníferas). Diante dessa lacuna, este trabalho investigou o efeito de ciclos sequenciais de pré-secagem (70°C, 103°C) seguidos de tratamento a 160°C nas propriedades mecânicas, acústicas e higroscópicas de três madeiras nativas: marupá (*Simarouba amara* Aubl.), cedro (*Cedrela spp.*) e freijó (*Cordia goeldiana* Huber.), considerando diferentes orientações de corte (radial e tangencial). O objetivo foi caracterizar as alterações induzidas pela pré-secagem com posterior tratamento térmico na temperatura de 160°C comparando com o tratamento térmico direto (160°), na densidade, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à flexão e propriedades vibracionais, contribuindo para a seleção e o tratamento adequado de madeiras para fins acústicos e de engenharia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Tratamento Térmico e Secagem da Madeira

A prática de aquecer a madeira para melhorar seu desempenho é uma técnica milenar. Evidências arqueológicas e históricas mostram que povos antigos já dominavam esse conhecimento. Por exemplo, um esqui de madeira (Kalvträsk) datado de mais de 5200 anos atrás, encontrado no norte da Suécia, foi curvado com o uso de calor pelo povo Saami (ÅSTRÖM, 1993; INSULANDER, 1999 apud ROWELL et al., 2009).

Nesse contexto, o tratamento térmico surge como uma forma moderna e controlada de modificar a madeira. Esse processo consiste em aquecer a madeira a altas temperaturas, geralmente entre 160°C e 240°C, em ambientes com baixo teor de oxigênio (ESTEVES & PEREIRA, 2009). O calor provoca alterações na estrutura química da madeira, o que pode resultar em um material mais durável, estável e resistente ao apodrecimento. A secagem em estufa em temperaturas acima de 100°C, citada no estudo de Jones *et al.* (2019), pode ser considerada uma forma leve desse tratamento, servindo como um tipo de modificação térmica inicial.

A modificação térmica resulta em perda de massa na madeira, e geralmente é relacionada a uma mudança nas suas dimensões macroscópicas. Esta perda de massa está relacionada com o tempo e a temperatura do tratamento em condições secas, podendo haver uma redução associada ao volume da madeira, além de depender da espécie de madeira, sendo que madeiras de angiospermas (folhosas) apresentam maior perda de massa do que madeiras de coníferas, em condições idênticas (HILL *et al.*, 2021).

O tratamento térmico promove alterações estruturais e químicas na madeira com reflexos diretos em suas propriedades físicas e mecânicas. Segundo Sikora *et al.* (2018), essa degradação seletiva é corroborada pela maior redução das hemiceluloses em madeiras folhosas (58,85% no carvalho) comparadas às coníferas (37,40% no abeto), indicando diferentes respostas térmicas entre espécies.

A degradação das hemiceluloses e grupos acetila é, de fato, um fator determinante para a redução das propriedades mecânicas. Grinins *et al.* (2024) observaram que o tratamento em temperaturas superiores a 160 °C causa perdas significativas de massa e no módulo de ruptura (MOR) na madeira de bétula, em contraste com tratamentos a 150 °C, que provocam alterações negligenciáveis. Essa relação entre intensidade do tratamento e degradação química é crucial para aplicações que demandam um equilíbrio entre modificação e preservação da resistência.

Nesse contexto, o tratamento térmico na luteria, conforme Danihelová et al. (2022), tem como objetivo maximizar os benefícios acústicos e a estabilidade dimensional ao mesmo tempo que minimiza a degradação estrutural. Por exemplo, madeiras para tampas harmônicas, que requerem alta constante acústica e baixa densidade, e madeiras para laterais, de maior densidade, quando termicamente tratadas, adquirem rapidamente características sonoras de instrumentos envelhecidos. Este efeito ilustra como um processo controlado pode otimizar propriedades específicas para um fim determinado.

2.2. Espécies de Madeira Tropicais como Instrumentos Musicais

De acordo com Brémaud (2012), a diversidade de madeiras tropicais utilizadas na fabricação de instrumentos musicais é enorme, reflexo da vasta flora local em diferentes culturas de manufatura ao redor do mundo. A autora ressalta que os estudos sobre as propriedades acústicas da madeira concentram-se majoritariamente em um número reduzido de espécies de instrumentos clássicos ocidentais, geralmente europeias de zona temperada,

havendo pouca conexão entre as abordagens que investigam a diversidade de espécies utilizadas e aquelas que analisam suas propriedades vibracionais. Essa desconexão resulta em uma lacuna significativa no conhecimento, pois a maioria das espécies, com distribuição geográfica delimitada, permanece pouco estudada sob a perspectiva acústica.

No estudo que Brémaud (2012) fez, coletando a porcentagem de espécies que analisou, um gráfico (Figura 1), onde foi observado que a maioria das espécies que tinham melhores aspectos acústicos, ligados à propriedade Eficiência de Conversão Acústica, foram de Madeiras Coníferas, seguidos por uma amostragem reduzida de Madeiras Folhosas Tropicais.

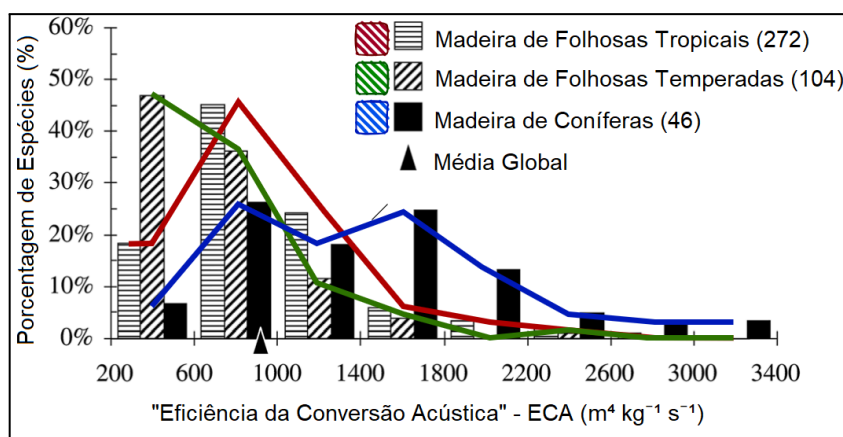


Figura 1. Distribuição da Eficiência de Conversão Acústica (ECA) por categoria de madeira, com porcentagens representando a proporção de espécies no banco de dados de Brémaud (2012) (Adaptado de Brémaud, 2012).

Esse cenário torna-se ainda mais crítico devido à forte dependência de importações no setor de luteria no Brasil. Conforme aponta Portela (2014), o país gastava anualmente uma quantia expressiva (acima de R\$100 milhões) para adquirir madeiras destinadas à produção de instrumentos de corda e de sopro, enquanto a fabricação nacional representava apenas uma parcela reduzida (25%) desse mercado.

Estudos envolvendo alternativas às madeiras importadas com espécies nativas da Amazônia têm sido desenvolvidos no Brasil desde 1983 (SOUZA, 1983). Em cima disso, as madeiras importadas já desde essa época apresentam altíssimo valor econômico, desestimulando a produção de instrumentos no país. Assim, a inércia do mercado e a preferência cultural por essências tradicionais por vezes se tornam um empecilho à adoção de alternativas.

Iniciativas pioneiras, como as conduzidas por Slooten & Souza (1993), identificaram mais de 50 madeiras candidatas para substituir a longa tradição de uso de madeiras importadas ou sob restrição legal, contrastando uma tradição também de uso de madeiras consagradas – muitas das quais, como o pau-brasil (*Paubrasilia echinata* Lam.) e o jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra*), têm seu corte expressamente proibido por lei devido ao risco de extinção. Nesse contexto, a investigação sistemática de madeiras tropicais alternativas continua sendo um caminho estratégico para preencher lacunas científicas, reduzir a pressão sobre espécies ameaçadas e promover a soberania tecnológica da luteria no Brasil.

2.2.1. Cedro (*Cedrela spp.*)

O gênero *Cedrela*, popularmente conhecido como cedro, caracteriza-se por produzir uma madeira de coloração rosada, baixa densidade e aroma distintivo, dotada de notável resistência natural ao ataque de cupins, brocas e fungos. Possui aplicação na luteria, utilizada geralmente para braços e corpos de guitarras, também em tampos, fundos e laterais de violão. Também constitui na confecção de instrumentos de percussão, como congas e atabaques. (SOUZA, 2009). A Figura 2 demonstra os aspectos da sua madeira.



Figura 2. Diferentes faces de corte do Cedro (IPT, 2023)

Estudos genéticos recentes revelam que a identificação morfológica tradicional do gênero *Cedrela* é notoriamente difícil, e torna-se ainda mais desafiadora no comércio de madeira serrada, onde a ausência de estruturas reprodutivas elimina caracteres diagnósticos cruciais, levando à frequente declaração incorreta de muitas das madeiras do gênero como *Cedrela odorata* no mercado (FICH *et al.*, 2022). Do ponto de vista taxonômico, três espécies se destacam no Brasil: *Cedrela odorata*, predominante na Amazônia; *Cedrela angustifolia*, associada à Mata Atlântica; e *Cedrela fissilis*, típica de formações florestais mais secas da região Centro-Sul. A correta identificação dessas espécies é frequentemente complexa devido à sobreposição de suas áreas de ocorrência e à grande similaridade entre suas madeiras (SOUZA, 2009).

Com base nas propriedades físicas analisadas por Mendoza *et al.* (2015), a madeira de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) apresenta características que a tornam particularmente adequada para aplicações acústicas, especialmente na fabricação de instrumentos musicais. O estudo destaca que o coeficiente de anisotropia médio da madeira de cedro foi de 1,39, valor que, segundo a classificação de Nock *et al.* (1975), a enquadra como uma madeira de excelente qualidade, com baixa tendência ao empenamento (AMORIM *et al.*, 2022). Essa estabilidade dimensional é uma característica importante para construção de instrumentos musicais, uma vez que garante a manutenção da integridade estrutural e das propriedades vibratórias ao longo do tempo, mesmo sob variações de umidade.

2.2.2. Freijó (*Cordia goeldiana*)

A espécie *Cordia goeldiana* Huber (Boraginaceae), conhecida regionalmente como freijó, destaca-se por sua multiplicidade de usos e excelente valor comercial, sendo frequentemente empregada em programas de reflorestamento (SANTOS *et al.*, 2017). Nativa da região neotropical, essa espécie possui potencial para a formação de plantios comerciais, dada sua alta produtividade de biomassa, durabilidade natural e resistência a pragas e doenças (MASCARENHAS *et al.*, 2021). A Figura 3 apresenta os aspectos da madeira de Freijó.

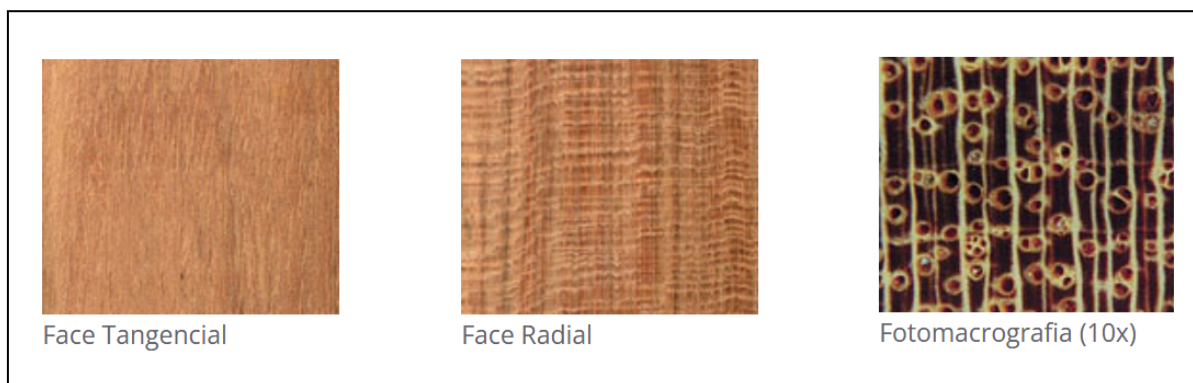


Figura 3. Diferentes faces de corte do Freijó (IPT, 2023)

No contexto específico da luteria, o freijó apresenta propriedades físicas e mecânicas que o tornam adequado para a fabricação de instrumentos musicais, sendo utilizada em partes como o tampo de violinos, violas e violões (SLOOTEN & SOUZA, 1993). Essa aptidão pode ser confirmada por GUILHON *et al.* (2021), cujos estudos comparativos de propriedades mecânicas, de espécies mundialmente usadas e tropicais nativas, demonstraram que as propriedades mecânicas do freijó são muito próximas às da *Picea sitchensis* — uma das espécies mundialmente usadas para a confecção de tampos. Seus resultados também apontaram uma aptidão seletiva da madeira, sendo recomendada para a confecção de braço, fundo e laterais, porém inapta para os componentes de escala e cavalete. Os autores atribuem esse perfil de aplicação à sua grã regular e fácil trabalhabilidade, concluindo que o freijó pode ser razoavelmente utilizado em instrumentos musicais (GUILHON *et al.*, 2021).

Em síntese, a combinação entre durabilidade, características acústicas favoráveis e aceitação no mercado aponta o freijó como uma matéria-prima de grande potencial para a indústria de instrumentos musicais, desde que consideradas as suas limitações específicas para certos componentes.

2.2.3. Marupá (*Simarouba amara*)

Estudos indicam que o marupá (*Simarouba amara*) apresenta propriedades físicas e acústicas adequadas para uso na fabricação de tampos de instrumentos de corda, posicionando-se como uma alternativa viável a espécies tradicionais (Slooten & Souza, 1993). Na Figura 4 há a aparência da madeira em suas diferentes direções de corte.

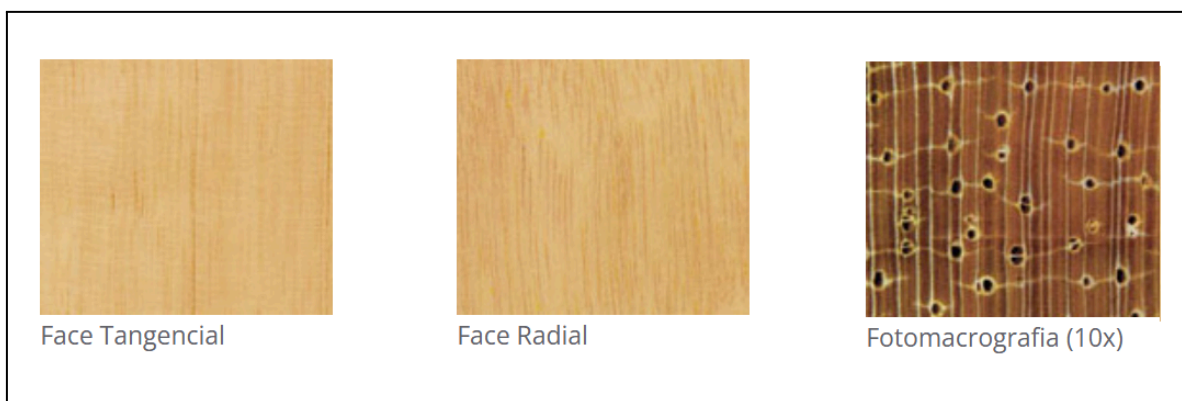


Figura 4. Diferentes faces de corte do Marupá (IPT, 2023).

Segundo um estudo feito Marques *et al.* (2005), essa madeira tropical é indicada para a aplicação de instrumentos musicais, uma vez que sua densidade, módulo de elasticidade, decremento logarítmico e frequência de vibração assemelham-se às da madeira de abeto (*Picea abies*), amplamente consagrada na luteria. Os autores observaram uma melhoria nas propriedades acústicas através de secagem em estufa da madeira de marupá, com redução na capacidade de absorção de vibração, o que, em termos práticos, se traduz em uma melhor propagação do som, apontando a uma otimização do material para fins acústicos.

A validação do marupá para essa finalidade específica é reforçada pelo trabalho de Portela (2014), que o compara não apenas com o abeto (*Picea abies*), mas também com o cedro canadense (*Thuja plicata*), outra referência do setor. A pesquisa concluiu que o comportamento vibratório do marupá o coloca em pé de igualdade com essas espécies tradicionais. É importante salientar, conforme destaca Portela (2014), que embora a previsão de propriedades mecânicas não seja um pré-requisito absoluto para a construção de bons instrumentos, apenas madeiras dentro de faixas específicas de propriedades possuem o potencial para se tornarem tampos de qualidade. O marupá atendeu a todos esses requisitos objetivos, performance que foi comprovada não apenas em testes de laboratório, mas também na análise dos modos de vibração de um violão clássico finalizado, validando seu desempenho em um instrumento real.

2.2.4. Panorama das Madeiras Utilizadas neste estudo

A anisotropia de contração e inchamento é uma propriedade fundamental da madeira, caracterizada pela variação dimensional em resposta à perda ou ganho de água higroscópica. Essa alteração ocorre entre o estado anidro e o Ponto de Saturação das Fibras, que geralmente se situa próximo de 30% de umidade. A intensidade da contração é influenciada por fatores como teor de umidade, orientação estrutural (radial, tangencial e longitudinal) e massa específica. Tipicamente, a contração na direção tangencial é cerca de duas vezes maior que na direção radial. A relação entre essas duas contrações é denominada coeficiente de anisotropia, um índice crucial que geralmente varia de 1,5 a 2,5. Madeiras com um coeficiente de anisotropia elevado possuem maior tendência ao empenamento e ao fendilhamento, sendo, portanto, menos indicadas para usos que exigem alta estabilidade dimensional, como na fabricação de móveis, portas, janelas e instrumentos musicais (MIRANDA et al., 2012).

Para interpretar esse índice, Klitzke (2007) propõe uma classificação em que um coeficiente de anisotropia inferior a 1,5 caracteriza a madeira como muito estável; entre 1,6 e 2,0, de média estabilidade; entre 2,1 e 2,5, de média instabilidade; e superior a 2,6, como muito instável.

Tabela 1. Valores de densidade, contração e módulo de elasticidade das espécies Cedro, Freijó e Marupá segundo o IPT e LPF.

Espécie	Densidade (g/cm ³)	Coeficiente de Anisotropia					E (kgf/cm ²)
		Contração Tangencial	Contração Radial	T/R (IPT)	T/R (LPF)	Classificação Klitzke (2007)	
Cedro	0,43	6,2 %	4,0 %	1,55	1,41	Estável / Muito Estável	81.000
Freijó	0,48	6,7 %	3,2 %	2,09	1,61	Média Instabilidade/ Média Estabilidade	104.000
Marupá	0,37	6,8 %	4,8 %	1,42	1,42	Muito Estável	74.000

Fonte: IPT e LPF.

Com base nos dados apresentados, as madeiras de marupá e cedro apresentam alta estabilidade dimensional (coeficiente de anisotropia de 1,42 e 1,55, respectivamente), característica procurada para componentes de instrumentos musicais como tampos e laterais. O freijó, embora apresente moderada instabilidade dimensional (coeficiente de 2,09), compensa esta característica com seu elevado módulo de elasticidade (104.000 kgf/cm²). O presente estudo avança além dessas propriedades físicas, investigando as características acústicas dessas três espécies tropicais para determinar seu potencial na produção de instrumentos musicais, complementando assim o panorama técnico necessário para sua validação na luteria.

2.3. Método de Excitação por Impulso para Propriedades Acústicas

Atividades de pesquisa científica recentes focam em desenvolver métodos de previsão rápida e confiável de propriedades de madeiras termicamente modificadas, exemplos desses métodos podem incluir com base em medições de cor (BRISCHKE et al., 2007), espectroscopia no infravermelho (BÄCHLE et al., 2010), espectroscopia de ressonância de spin eletrônico (ALTGEN et al., 2012) ou composição elementar (INARI et al., 2009). Tais métodos poderiam ser usados em processos de controle e qualidade para diferentes produtos modificados termicamente, sendo um dos desafios emergentes então a implementação desses métodos no processo de produção industrial. (Militz et al, 2014). Nesse sentido de métodos alternativos para inferir resultados de propriedades de madeiras termicamente modificadas, o método de excitação por impulso também é relevante.

O método de Excitação por Impulso de Vibração é uma técnica não destrutiva amplamente utilizada para a determinação das propriedades elásticas dinâmicas de materiais, como o módulo de Young dinâmico, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson. Essa técnica baseia-se no princípio de que corpos de prova com geometria definida, quando excitados mecanicamente por um impacto breve, vibram em suas frequências naturais de ressonância, as quais estão diretamente relacionadas com suas propriedades elásticas, massa e dimensões (ASTM E1876, 2001).

Materiais sólidos possuem um conjunto característico de frequências de ressonância mecânica (fr), que estão relacionadas à massa, dimensões e propriedades elásticas do material. Assim, estando as propriedades do material relacionadas à sua frequência de ressonância, o decaimento da amplitude da vibração livre pode então ser relacionado ao atrito interno

(dissipação da energia de vibração no corpo de prova, ou amortecimento). (SWARNAKAR *et al*, 2007)

De acordo com a norma ASTM E1876-01, o método é aplicável a materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos em temperatura ambiente, podendo também ser adaptado para uso em condições criogênicas ou de alta temperatura. O procedimento consiste em excitar mecanicamente o corpo de prova por meio de um impacto elástico, utilizando um impulsor, e capturar as vibrações resultantes com um transdutor – que pode ser do tipo contato (como um acelerômetro) ou sem contato (como um microfone). O sinal é então analisado para identificar a frequência de ressonância fundamental, que é utilizada no cálculo dos módulos elásticos por meio de equações analíticas específicas para cada geometria (barra retangular, cilíndrica ou disco). O arranjo da Figura 5 representa esse conjunto.

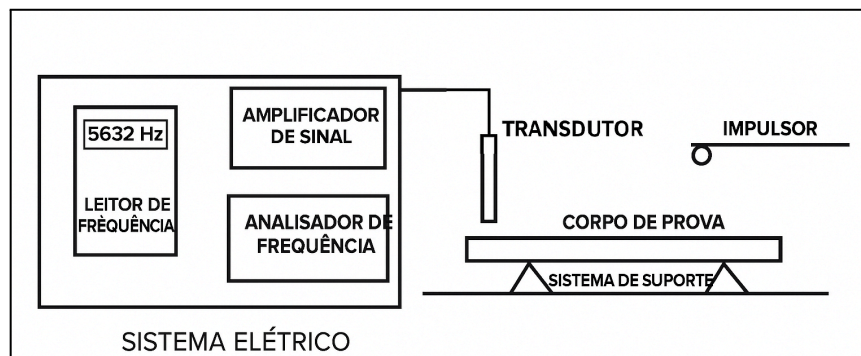


Figura 5. Diagrama em bloco de um típico aparelho de teste do método de excitação por impulso. (Adaptado de ASTM E1876-01, 2001)

A norma ressalta a importância do posicionamento adequado dos apoios, do ponto de impacto e do transdutor, de modo a garantir a excitação e medição do modo de vibração desejado, evitando interferências de modos indesejados.

Em um estudo recente, CARBAJO *et al.* (2022) propuseram uma abordagem alternativa ao método padrão, utilizando um único atuador eletrodinâmico para atuar simultaneamente como excitador e sensor de vibrações. Os autores acoplaram o atuador a corpos de prova do tipo viga com seção retangular, fabricados em pedra natural, mármore, madeira e alumínio, e mediram a impedância elétrica de entrada do sistema (Figura 6). A partir da identificação da frequência fundamental de flexão, foi possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico com erro inferior a 10% em comparação com o método ASTM E1876.

Essa abordagem mostrou-se vantajosa por simplificar o setup experimental, reduzindo a quantidade de equipamentos necessários e permitindo a realização de medições com equipamentos de baixo custo. No entanto, os autores destacam a importância do acoplamento adequado do atuador ao corpo de prova e a influência do efeito de massa adicionada, especialmente em materiais com baixa densidade.

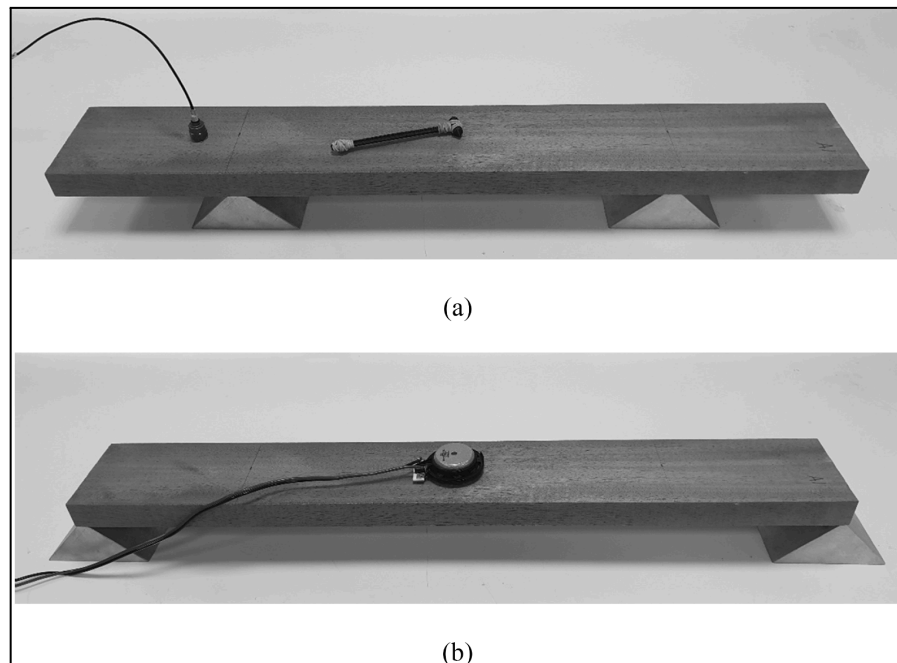


Figura 6. Visão geral dos arranjos experimentais utilizados: (a) Norma ASTM E1876; (b) Abordagem proposta por Carbajo et al, (2022). (Carbajo et al, 2022)

Ambos os métodos – o padronizado pela ASTM e a proposta alternativa – validam a confiabilidade da técnica de excitação por impulso para a caracterização elástica de materiais, sendo amplamente aplicáveis em desenvolvimento de materiais, controle de qualidade e geração de dados para projetos de engenharia.

Para a coleta dos dados necessários ao cálculo do Módulo de Elasticidade Dinâmico, utilizou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), um algoritmo cuja função primordial é converter um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência (NTI AUDIO, s.d.). Esta conversão é essencial, pois decompõe o complexo sinal de vibração da madeira—capturado como uma amplitude que varia ao longo do tempo por um acelerômetro—em seus componentes espectrais individuais, revelando as frequências puras que o constituem (Figura 7). Nesta representação no domínio da frequência, a frequência de ressonância fundamental do corpo de prova é identificada diretamente como o pico de maior amplitude no espectro gerado, permitindo seu registro preciso para os cálculos dinâmicos.

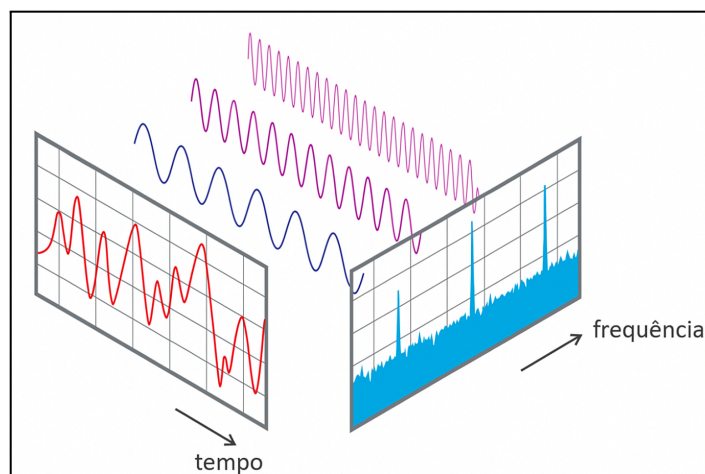


Figura 7 - Visualização de um sinal no domínio do tempo e da frequência (NTi Audio, [s.d.])

Para a quantificação do amortecimento interno do material, o decremento logarítmico (δ) é determinado a partir da própria resposta em frequência. Utilizando o método da banda larga a meia altura, o decremento é calculado pela relação representada na Equação 1, as constituintes podem ser melhores vistas na Figura 8:

$$\delta \simeq \pi \cdot \left(\frac{\Delta f}{f_n} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde Δf é a largura de banda do pico de ressonância no ponto de meia potência e f_n é a sua frequência central.

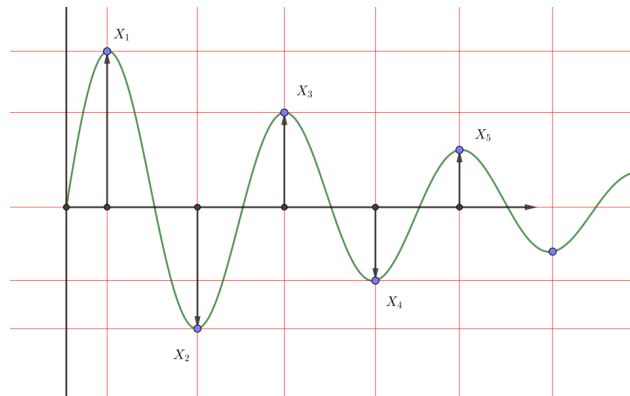


Figura 8 - Visualização do decremento logarítmico em uma onda amortecida (Wikipedia, 2023).

Dessa forma, a análise FFT fornece de maneira eficiente os dois parâmetros dinâmicos para a caracterização vibracional da madeira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Preparo das amostras

Para a realização dos ensaios, foram selecionadas amostras de madeira das espécies Cedro (*Cedrela spp.*), Freijó (*Cordia goeldiana*) e Marupá (*Simarouba amara*), compradas em madeireira local e armazenadas em laboratório.

Dentre os corpos de prova produzidos no laboratório de processamento mecânico da madeira, no instituto de Florestas da UFRRJ com auxílio de uma máquina de corte a disco de bancada. Foram escolhidas peças de madeira que apresentavam maior homogeneidade visual, considerando parâmetros como cor, textura e grã uniformes. Foi também requisito a ausência de quaisquer defeitos que pudessem interferir nas propriedades mecânicas ou físico-mecânicas a serem avaliadas, tais como: nós, rachaduras, ataques por insetos ou deterioração parcial por fungos. O lote de madeira foi processado na marcenaria do instituto.

Os corpos de prova foram preparados com dimensões de aproximadamente 320 mm (comprimento) x 35 mm (largura) x 12 mm (espessura).

Para cada uma das três espécies de madeira, foram preparadas 20 amostras, as quais foram distribuídas igualmente entre as duas orientações de corte:

- 10 amostras provenientes de corte radial;
- 10 amostras provenientes de corte tangencial.

A demonstração da direção de corte na madeira é apresentada na Figura 9.

Cada combinação de espécie e orientação foi submetida às quatro condições de tratamento (equilíbrio, 70°C, 103°C e 160°C), com réplicas adequadas para cada tratamento, totalizando 240 unidades experimentais. Esse grupo que passou por esses tratamentos descrito ficou denominado como “grupo principal”.

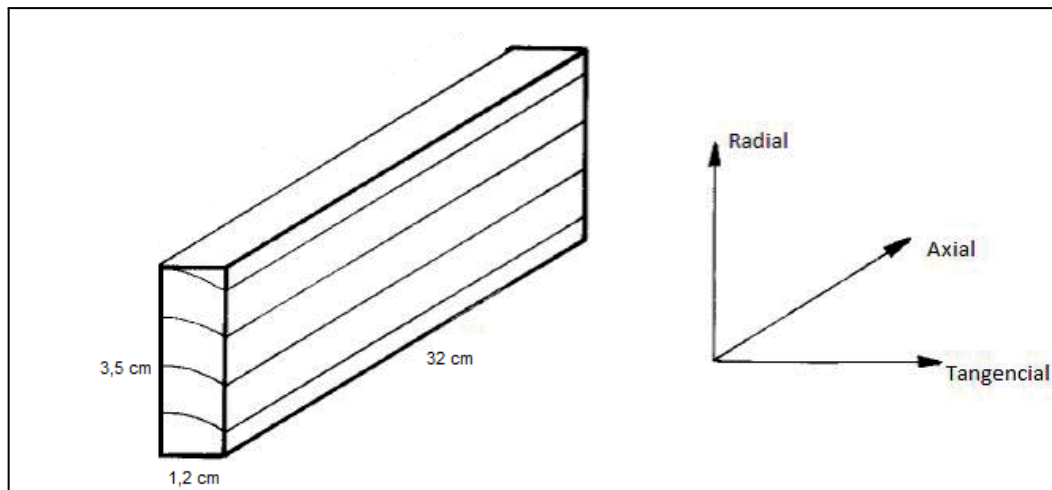


Figura 9 - Ilustração dimensional dos corpos de prova, com esquematização das direções anatômicas da madeira. À esquerda um exemplo de uma peça radial. (Adaptado de HURTADO DE MENDOZA; BORGES; SILVA, 2015).

Paralelamente, para cada espécie, foi estabelecido um lote de controle composto por 10 amostras (5 de corte radial e 5 de corte tangencial). A definição desse número amostral teve como base o princípio de representatividade estatística mínima, permitindo a realização de análises comparativas confiáveis, bem como a possibilidade de descarte de eventuais outliers sem comprometer a robustez dos dados. Este grupo de controle foi mantido em condições ambientais estáveis, sem ser submetido aos tratamentos térmicos sequenciais de 70 °C e 103 °C, servindo como referência basal para a análise comparativa específica durante a secagem final a 160 °C, conforme detalhado no protocolo do item 3.2.

3.2. Protocolo de Tratamento Térmico e Avaliações

O material foi submetido a tratamentos térmicos sequenciais, que contém três etapas de secagem distintas (70 °C, 103 °C e 160 °C). As amostras do grupo principal e as amostras-controle foram submetidas ao seguinte protocolo, esquematizado na Figura 10:

1. Condição Inicial: Todas as amostras (grupo principal e controle) foram caracterizadas quanto a massa, espessura, largura e comprimento em seu estado de equilíbrio inicial, com ambiente na temperatura média de 22°C e UR=65%. Com a espessura e largura sendo feitas medições em três segmentos (inicial, meio e final) da peça.
2. Pré-tratamentos Térmicos Sequenciais (Aplicados apenas ao grupo principal):
 - 70 °C por 12 horas;
 - 103 °C por 12 horas.
3. Tratamento Térmico Final (Aplicado a todos os grupos):
 - 160 °C por 12 horas.

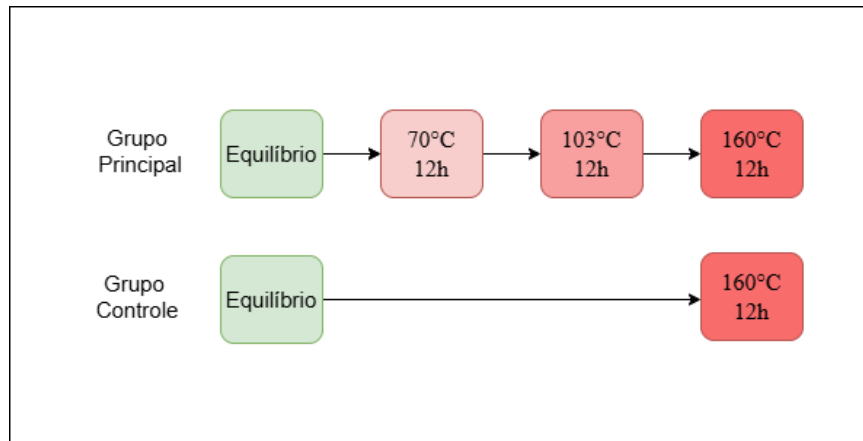


Figura 10 - Fluxograma mostrando as etapas do tratamento térmico para cada grupo e sequência. (O autor).

O equipamento usado para a secagem (tratamento) das madeiras foi uma estufa a vácuo SL 104 da SOLAB, acoplada a uma bomba de vácuo NT-613 da Novatecnica Equipamentos para Laboratórios.

O material foi submetido à vácuo tanto no pré-tratamento como no tratamento. Após cada etapa de tratamento térmico (70 °C, 103 °C e 160 °C), as amostras foram transferidas para uma câmara climatizada e mantidas até atingirem nova condição de equilíbrio higroscópico, estabilizada a na faixa próxima de 22 °C e 65% de umidade relativa do ar. Os períodos de reaclimação tiveram duração média de duas a três semanas. A estufa a vácuo pode ser observada na Figura 11 mostrando a madeira em fase de absorção de umidade e ao lado no momento antes da madeira passar pelo tratamento térmico final de 160 °C.

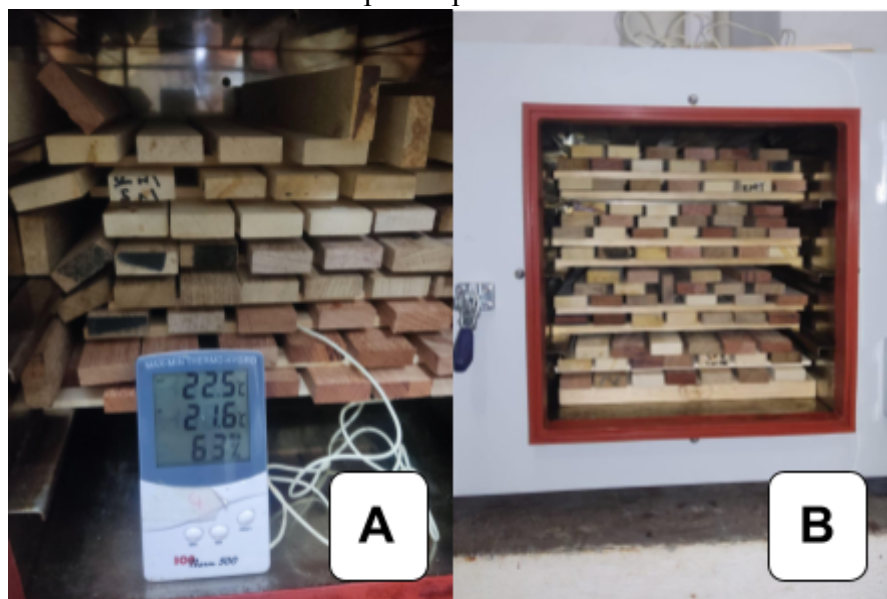


Figura 11. Demonstração das amostras de madeira dentro da estufa a vácuo: A - Madeira em condição na condição de reabsorver água para atingir equilíbrio de umidade dentro da estufa; B - Todas as amostras adicionadas à estufa (grupo principal e controle) para o tratamento final de 160 °C. (O Autor)

A caracterização das propriedades físicas, mecânicas e acústicas foi realizada somente após a completa estabilização da massa. Esse procedimento de condicionamento e medição foi repetido de forma idêntica após cada etapa do ciclo térmico, permitindo a análise comparativa da influência de cada temperatura de secagem nas propriedades da madeira. A inclusão do lote de controle no tratamento final permitiu isolar os efeitos específicos da temperatura mais severa por não ter sofrido os pré-tratamentos.

3.3. Propriedades físicas

3.3.1. Massa seca estimada ($M_{sec}Est$)

$$M_{sec}Est = \frac{M_{úmida}}{1 + \left(\frac{TU\%}{100}\right)} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

$M_{úmida}$ é a massa inicial da amostra (g)

TU% é o teor de umidade da amostra com relação à massa seca.

3.4. Propriedades mecânicas

Foram feitos no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, no Instituto de Florestas da UFRRJ, ensaios de flexão estática (figura 12 e 13) e testes vibracionais (Figura 14).

3.4.1. Máquina de Ensaio Universal

Para o experimento, foi utilizada uma máquina de ensaios universal mecânica modelo capacidade 30 TF UMC 300, fabricado pela marca Contenco, com uma célula de carga de 20 kgf, conforme Figura 12.

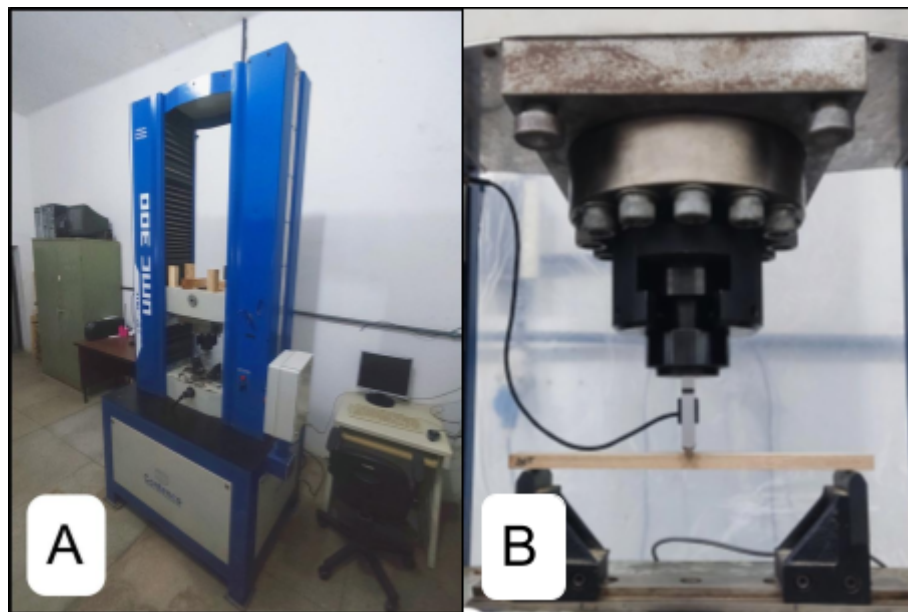


Figura 12. Equipamento para Ensaios de Flexão: A - Máquina de Ensaio Universal Contenco UMC 300 do laboratório de Propriedades Mecânicas da Madeira, da UFRRJ; B - Demonstração da amostra apoiada em dois pontos para ensaios de flexão. (O Autor)

No ensaio de flexão estática, as amostras de madeira foram inseridas em dois apoios articulados móveis, com a força aplicada na parte central da peça, conforme é visto na Figura 13. O vão do experimento foi fixo 287 mm.

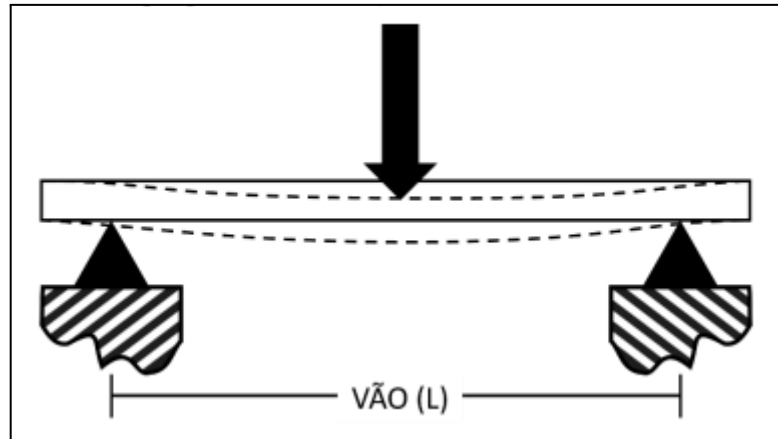


Figura 13. Esquema da barra (amostra) sofrendo flexão (Santos, 2021)

3.4.1.1. Módulo de Elasticidade em máquina de ensaio universal

O Módulo de Elasticidade Estático (E) foi determinado na máquina de ensaios universal, através da equação descrita na Equação 4.

$$E_E = \frac{8 \cdot \Delta P \cdot L^3}{384 \cdot I \cdot \Delta \delta} \text{ e } I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

ΔP = Variação de carga entre resistência à flexão abaixo do limite de proporcionalidade (cm);

L = vão usado no ensaio (28,7 cm);

I = Momento de inércia do objeto (cm⁴);

$\Delta \delta$ = Variação da flecha formada, para o mesmo intervalo de carga (cm);

b = base (cm);

h = altura ou espessura da amostra (cm).

3.4.2. Testes Vibracionais - Técnica de Excitação por Impulso

Para a análise acústica das amostras foi utilizado um equipamento do Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira da UFRRJ proposto e construído por Laudares (2022). Esse equipamento visa um posicionamento automático à amostra e uma homogeneização da intensidade dos impactos proferidos à peça de madeira, proporcionando valores mais precisos e homogêneos.

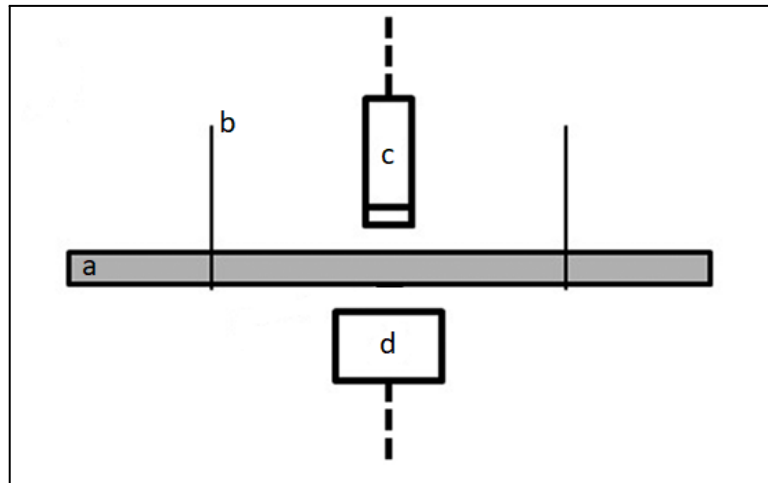


Figura 14. Ilustração do teste vibracional. (a) amostra de madeira; (b) fio de suporte; (c) microfone; (d) impulsor elétrico. (Adaptado de Obataya et al, 2020).

O tipo de ensaio também seguiu a norma E1876-22 (2022) da American Society for Testing and Materials, denominada “Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration” (Método de Ensaio Padrão para Módulo de Elasticidade Dinâmico, Módulo de Cisalhamento e Coeficiente de Poisson por Excitação por Impulso de Vibração), que descreve o método de vibração livre-livre. Nele é definido que a amostra fique suspensa sobre os pontos nodais: dois pontos de apoio paralelos entre si e a uma distância das extremidades livres de 0,224 do comprimento longitudinal da amostra. Os pontos nodais estão apresentados na Figura 15. A definição desses pontos pela norma são referentes aos pontos nodais para o primeiro harmônico (LAUDARES, 2022).

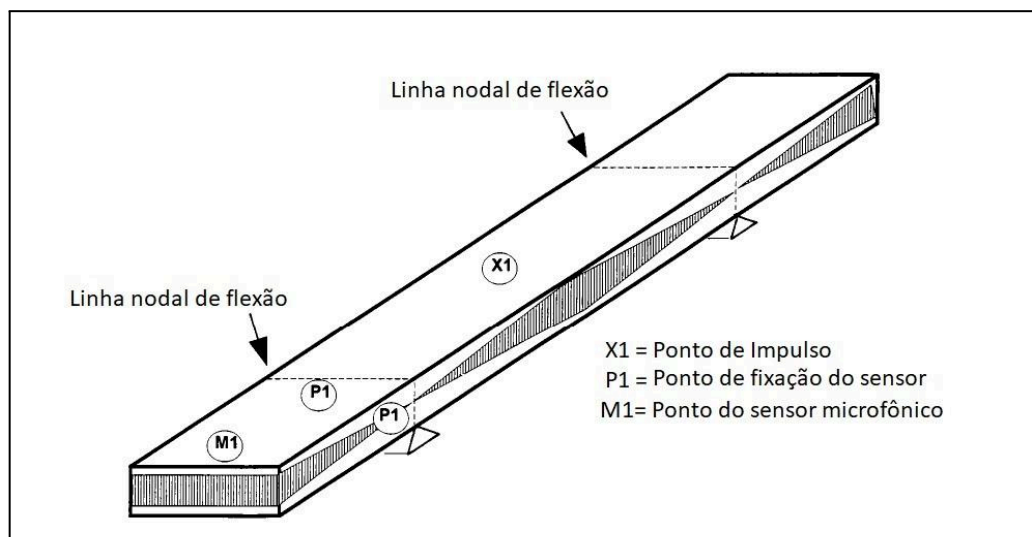


Figura 15. Arranjo de teste para método não destrutivo vibracional (excitação por impulso). (Adaptado de ASTM E1876-01, 2001).

No ensaio foi utilizado o software FFT (Fast Fourier Transform), que é capaz de captar o sinal de vibração e decompor em frequências componentes, encontrando assim a frequência de ressonância (Fr) e o decaimento logarítmico (dl).

O módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) foi determinado mediante a técnica de excitação por impulso de vibração descrita acima, conforme a norma ASTM E1876-01, utilizando a Equação 5:

$$E_{din} = 0.9465 \cdot \left(\frac{m \cdot f_f^2 \cdot L^3}{b \cdot h^3} \right) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

m = massa do corpo de prova;
 f_f = frequência de ressonância fundamental em flexão;
 L = comprimento do corpo de prova;
 b = largura do corpo de prova;
 h = altura do corpo de prova.

(ASTM E1876-01, 2001).

A Eficiência da Conversão Acústica (ECA) constituiu um parâmetro fundamental nesta análise, uma vez que quantifica a capacidade de um material em transformar energia vibracional mecânica em energia sonora radiada. Este índice é definido, em essência, pela relação entre o coeficiente de radiação do som e o amortecimento interno (ou atenuação acústica) característico do material em questão.

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

Em que:

E_{din} = Módulo de elasticidade dinâmico da madeira;
 dl = Decaimento logarítmico;
 ρ = Densidade (g/cm^3)

Para uma avaliação mais precisa da eficiência mecânica da madeira, foi determinado o módulo de elasticidade dinâmico específico, calculado pela relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a densidade aparente do material. Esta correção é feita para eliminar a influência direta da massa específica nas propriedades de rigidez, permitindo assim comparar a qualidade e desempenho mecânico real das diferentes madeiras, independentemente de suas densidades naturais. Tal parâmetro é relevante para avaliar a eficácia dos tratamentos térmicos, pois possibilita distinguir entre uma simples redução de massa e uma eventual degradação da estrutura da parede celular, indicando se as alterações observadas no módulo de elasticidade dinâmico são proporcionais ou não às mudanças na densidade.

$$E_{esp} = \frac{E_{din}}{\rho} \quad (\text{Equação 7})$$

3.5. Análises Estatísticas

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), utilizando um esquema fatorial $3 \times 2 \times 4$. Para as análises estatísticas, foi utilizado o software Statistica 7. A

aderência das variáveis quantitativas à distribuição normal foi verificada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov, adotando-se um nível de significância de 5%. A homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo teste de Brown-Forsythe.

Com base nesses testes, as variáveis que atenderam aos pressupostos de normalidade e homogeneidade foram submetidas à Análise de Variância (ANOVA) em esquema de medidas repetidas, considerando os fatores tipo de corte e temperatura de tratamento para cada espécie. Quando significativos, os efeitos foram desdobrados e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, com a representação dos grupos estatísticos por letras.

Para as variáveis que não atenderam aos pressupostos paramétricos, aplicou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste post-hoc de Dunn quando significativo ($p < 0,05$), utilizando o software RStudio.

Na apresentação dos resultados, os dados foram inicialmente sumarizados em tabelas contendo médias, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) para todas as variáveis e tratamentos, seguidos das análises de comparação de médias e testes não paramétricos específicos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Geral do Efeito do Tratamento Térmico e da Espécie nas Propriedades da Madeira

A seguir se apresenta os dados para os três tratamentos térmicos das espécies, mostrando também os valores do controle (antes e depois de 160 °C). Os tratamentos térmicos sequenciais (70 °C, 103 °C e 160 °C) promoveram uma redução progressiva na densidade das três espécies, conforme evidenciado na Tabela 2.

Para o Cedro, observou-se densidade intermediária em relação a marupá e freijó, com módulos de elasticidade estático e dinâmico em faixa mediana e parâmetros acústicos (frequência de ressonância e eficiência de conversão acústica) também situados entre os valores das demais espécies. O Cedro apresentou redução de 5,9% (de 0,572 para 0,538 g/cm³), o Freijó 4,3% (de 0,490 para 0,469 g/cm³) e o Marupá 3,6% (de 0,446 para 0,430 g/cm³) após o tratamento final a 160 °C. Esta redução é consistente com a degradação térmica de componentes da parede celular, particularmente hemiceluloses, sendo mais pronunciada à medida que a temperatura aumentou de 70 °C para 160 °C.

A análise do Coeficiente de Variação (CV) da densidade revela padrões distintos entre as espécies. O Cedro mostrou-se notavelmente homogêneo em todos os tratamentos (CV entre 3,80% e 4,97%), enquanto o Freijó apresentou maior variabilidade (CV entre 12,64% e 14,21%), refletindo sua conhecida heterogeneidade anatômica. O Marupá ocupou uma posição intermediária (CV entre 5,16% e 9,85%).

Tabela 2. Valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) das propriedades físico-mecânicas e acústicas das madeiras de Cedro, Freijó e Marupá submetidas a diferentes condições de tratamento térmico.

Variável	Tratamento	Cedro			Freijó			Marupá		
		Média		CV-%	Média		CV-%	Média		CV-%
Densidade	Equilíbrio	0,572	0,0250	4,37	0,490	0,0666	13,59	0,446	0,0424	9,50
	T 70	0,560	0,0244	4,36	0,482	0,0656	13,62	0,436	0,0422	9,67
	T 103	0,557	0,0253	4,54	0,481	0,0662	13,76	0,437	0,0412	9,43
	T 160	0,538	0,0245	4,56	0,469	0,0667	14,21	0,430	0,0423	9,85
	Controle	0,568	0,0216	3,80	0,524	0,0672	12,82	0,436	0,0232	5,32
	Controle T 160	0,534	0,0266	4,97	0,504	0,0637	12,64	0,417	0,0215	5,16
E.e	Equilíbrio	98.601	5.456	5,53	94.633	16.257	17,18	78.602	14.578	18,55
	T 70	104.298	6.476	6,21	100.509	15.410	15,33	81.397	14.616	17,96
	T 103	100.131	5.355	5,35	97.053	15.724	16,20	76.674	13.312	17,36
	T 160	99.654	5.315	5,33	97.055	15.651	16,13	80.876	13.277	16,42
	Controle	101.900	5.442	5,34	105.922	20.133	19,01	83.311	7.542	9,05
	Controle T 160	101.354	6.687	6,60	106.715	15.552	14,57	81.369	7.139	8,77
E.d	Equilíbrio	123.229	8.076	6,55	121.623	22.235	18,28	93.800	19.692	20,99
	T 70	127.370	8.229	6,46	125.483	22.616	18,02	96.698	19.760	20,43
	T 103	126.394	8.717	6,90	125.350	23.350	18,63	95.503	19.141	20,04
	T 160	124.816	8.221	6,59	123.704	23.160	18,72	95.620	19.204	20,08
	Controle	128.999	13.022	10,09	131.505	25.490	19,38	97.370	11.380	11,69
	Controle T 160	128.747	12.890	10,01	134.204	24.937	18,58	97.435	10.853	11,14
E.esp	Equilíbrio	215.416	13.253	6,15	247.554	22.552	9,11	208.742	28.100	13,46
	T 70	222.633	13.091	5,88	255.478	22.674	8,88	215.272	28.090	13,05
	T 103	226.896	13.828	6,09	259.694	23.890	9,20	217.013	28.086	12,94
	T 160	232.101	13.379	5,76	262.773	23.087	8,79	221.122	27.515	12,44
	Controle	227.002	20.150	8,88	249.228	22.978	9,22	223.109	20.993	9,41
	Controle T 160	240.759	19.389	8,05	264.636	23.489	8,88	233.389	20.053	8,59
E.C.A	Equilíbrio	1.137	113	9,96	1.923	303	15,78	1.353	207	15,27
	T 70	1.293	121	9,36	2.238	390	17,41	1.474	179	12,15
	T 103	1.299	120	9,24	2.281	372	16,32	1.489	182	12,22
	T 160	1.322	118	8,93	2.322	407	17,53	1.522	169	11,10
	Controle	1.257	113	9,01	1.920	247	12,85	1.630	220	13,48
	Controle T 160	1.334	132	9,91	2.083	242	11,63	1.757	173	9,82
Fr	Equilíbrio	564	41	7,27	631	39	6,11	580	41	7,06
	T 70	574	41	7,12	641	39	6,01	589	41	6,99
	T 103	575	42	7,27	642	39	6,13	590	42	7,08
	T 160	579	41	7,07	643	38	5,87	594	41	6,97
	Controle	599	48	8,08	627	41	6,51	595	36	6,05
	Controle T 160	613	48	7,76	641	42	6,61	604	34	5,68
DI	Equilíbrio	22,6	1,3	5,81	17	1,5	8,81	24,2	3,2	13,07
	T 70	20,1	1	4,91	14,8	1	6,61	22,4	2,5	11,31
	T 103	20,8	1	4,86	14,9	1,1	7,16	22,7	2,3	9,91
	T 160	21,4	1	4,73	15,1	1	6,66	22,8	1,9	8,47
	Controle	21,1	1,8	8,71	15,6	2,4	15,45	21,1	2,4	11,27
	Controle T 160	21,8	1,5	7,06	15,7	2	12,77	20,8	2,2	10,58

Nos resultados da Figura 16, os valores de densidade da madeira de Cedro das amostras em condição de equilíbrio higroscópico (0,572 g/cm³) situam-se na porção superior da faixa documentada por Brémaud (2012) de 0,45–0,55 g/cm³. Para Marupá, os valores de densidade aparente obtidos neste estudo enquadram a espécie na faixa de madeiras leves, com módulo de elasticidade estático e dinâmico compatíveis com uso acústico. Esses resultados são coerentes com trabalhos que avaliaram o efeito da secagem e de tratamentos térmicos na espécie, nos quais se observaram densidades baixas, pequena variação do módulo estático após secagem em estufa e leve aumento da frequência natural de vibração, acompanhado da redução do amortecimento interno e de melhoria da resposta acústica para uso em tampos de instrumentos musicais (MARQUES et al., 2005; DEL MENEZZI et al., 2014).

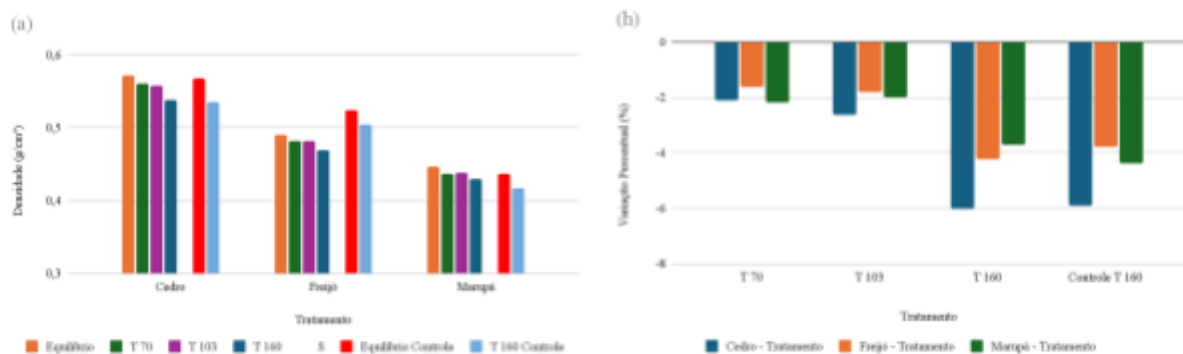


Figura 16 - Resultados de densidade para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de densidade nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de densidade por tratamento.

Quanto às propriedades mecânicas, o Módulo de Elasticidade Estático (E.e) e o Módulo de Elasticidade Dinâmico (E.d) apresentaram comportamentos similares frente ao aumento gradual da temperatura. Ambos mostraram um ligeiro aumento após o tratamento a 70 °C, seguido de estabilização ou pequena redução nos tratamentos subsequentes a 103 °C e 160 °C. O Módulo de Elasticidade Estático aumentou no tratamento de 70 °C para as três espécies. Para cedro e freijó houve uma tendência de queda até os 160 graus enquanto que para o marupá houve uma queda brusca em 103 °C, seguida por um aumento em 160 °C. Os tratamentos secagem branca antes dos 160 °C, permitiu uma melhora no resultado final quando comparado com o controle de todas as espécies mas em especial para o Marupá, que obteve uma diferença de ganho muito diferente, com as amostras tendo um ganho maior em rigidez estática enquanto que o tratamento que não sofreu pré secagem foi o que teve uma perda maior, conforme é possível observar nos gráficos da Figura 17 e Figura 18.

O Freijó destacou-se com os maiores valores absolutos de E.d (acima de 120.000 kgf/cm² em todos os tratamentos), porém com variabilidade considerável (CV entre 14,57% e 19,38%), indicando que parte das amostras respondeu de forma mais acentuada ao tratamento térmico.

O Módulo de Elasticidade Dinâmico (E.d) inicial do Cedro, de 123.229 kgf/cm², posiciona-se dentro do intervalo de variabilidade feita por Brémaud (2012), que foi entre 71.000 e 132.000 kgf/cm². Em comparação com as amostras de controle, os resultados foram bem próximos aos descritos para o estático, com a ressalva que houve uma maior perda da variável para o cedro que não passou pela pré- secagem e, para o freijó, um ganho no controle próximo ao da pré-secagem (Figura 18).

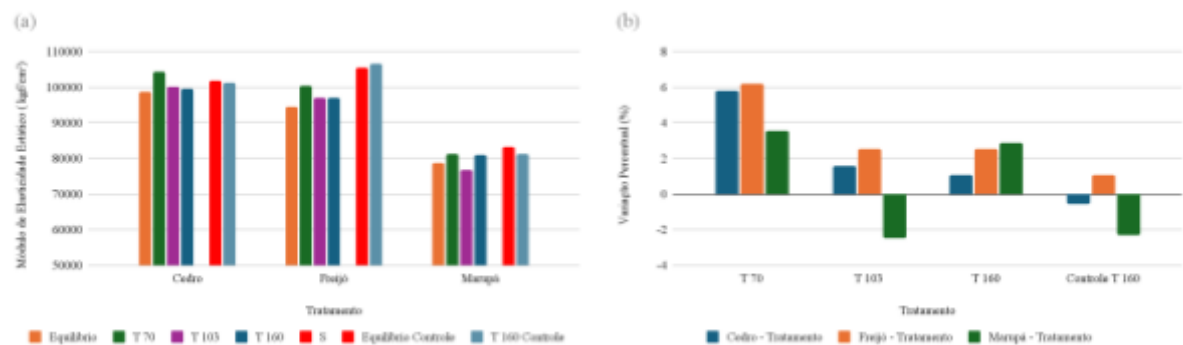


Figura 17 - Resultados de Módulo de Elasticidade Estático para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Módulo de Elasticidade Estático nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Módulo de Elasticidade Estático por tratamento.

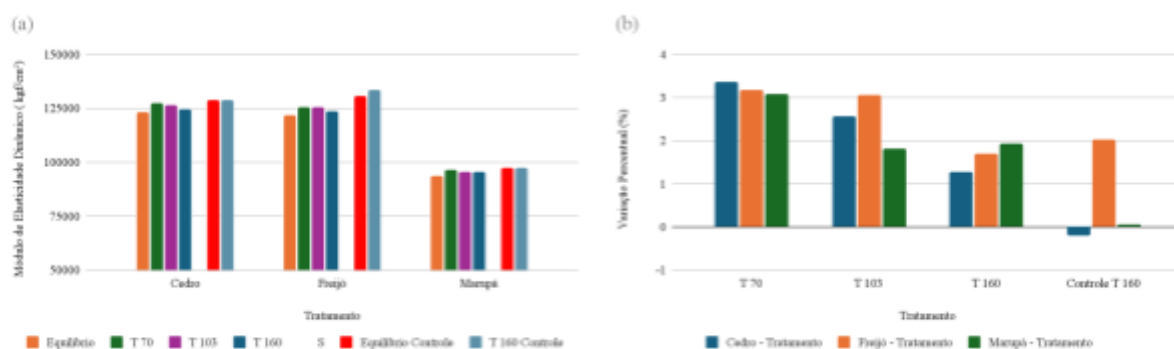


Figura 18 - Resultados de Módulo de Elasticidade Dinâmica para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Módulo de Elasticidade Dinâmica nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Módulo de Elasticidade Dinâmica por tratamento.

O Módulo de Elasticidade Dinâmico Específico (E.esp) mostrou aumento consistente com a elevação da temperatura em todas as espécies (Figura 19). O Cedro apresentou o maior ganho percentual (7,7% entre Equilíbrio e 160 °C), seguido pelo Freijó (6,2%) e Marupá (5,9%). É interessante notar que o grupo Controle submetido diretamente a 160 °C apresentou valores de E.d esp superiores aos do grupo que passou pelos tratamentos sequenciais (240.759 em comparação a 232.101 para o Cedro), sugerindo que a pré-secagem sequencial pode ter influenciado diferentemente a resposta final da madeira.

O Módulo de Elasticidade Específico do Cedro apresentou valor de 215.416 kgf/cm² em condição basal, dentro da faixa de 183.000–224.000 kgf/cm² consolidada por Brémaud, o que corrobora a eficiência mecânica da madeira em estudo.

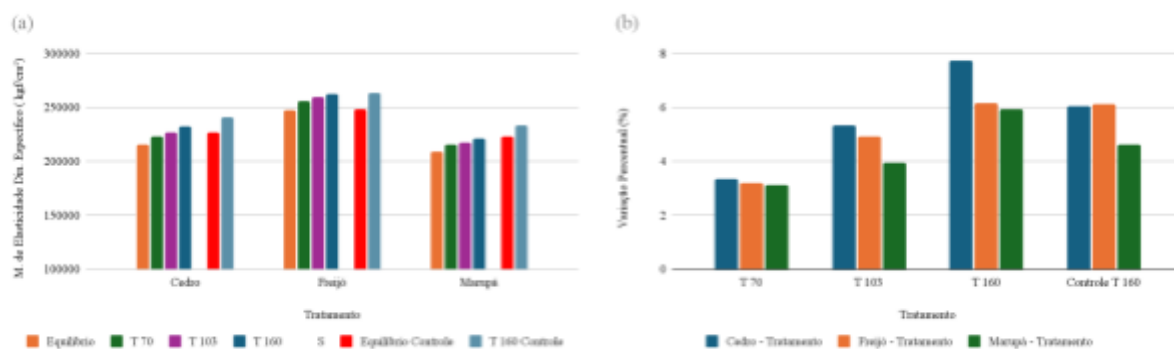


Figura 19 - Resultados de Módulo de Elasticidade Específico para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Módulo de Elasticidade Específico nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Módulo de Elasticidade Específico por tratamento.

A frequência de ressonância (Fr) aumentou progressivamente com a temperatura em todas as espécies, refletindo o aumento da rigidez dinâmica. Conforme os dados da Tabela 2, o Freijó apresentou as maiores frequências em todos os tratamentos (acima de 640 Hz a 160 °C), enquanto o Marupá e o Cedro mostraram respostas mais moderadas. A baixa variabilidade da Fr no Freijó (CV entre 5,87% e 6,61%) confirma a consistência deste parâmetro mesmo sob tratamento térmico progressivo. Para a variável, os dados mostraram uma variação muito próxima, todas de ganho pequeno em que a pré-secagem mostrou ligeiramente maior ganho que o controle para Cedro e Marupá. Já para o freijó foi diferente, com um maior aumento, é bem significativo, para a madeira de controle que não passou pela pré-secagem, visto na Figura 20.

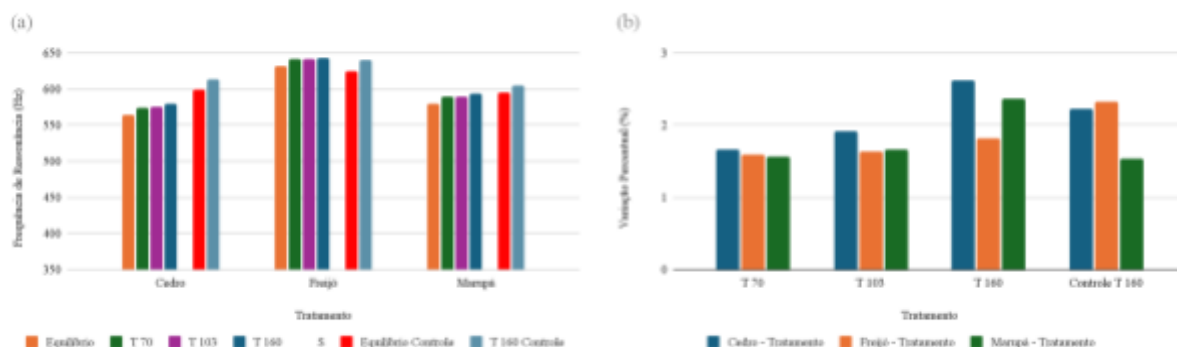


Figura 20 - Resultados de Frequência de Ressonância para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Frequência de Ressonância nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Frequência de Ressonância por tratamento.

O decaimento logarítmico (dl) foi reduzido com o aumento da temperatura em todas as espécies. O Freijó apresentou a maior redução relativa (11,2% entre Equilíbrio e 160 °C) e os menores valores absolutos, consolidando-se como a madeira com menor dissipação de energia. O Marupá, embora tenha tido uma redução percentual menor (5,8%), partiu de um valor inicial mais alto (24,2), o que ainda representa uma melhoria significativa. A variabilidade do dl, conforme mostrado na Tabela 2, foi maior no grupo controle do Freijó (CV de 15,45%), indicando uma resposta mais homogênea após o tratamento térmico sequencial. Também, as madeiras que passaram pela pré-secagem obtiveram maiores perdas que as amostras de controle, o que favorece diretamente seu ganho acústico. É possível também observar (Figura 21) uma tendência de crescimento para a variável nas amostras de pré secagem, com os menores valores obtidos na pré secagem de 70 graus. A madeira que mais perdeu decaimento logarítmico em 160 graus foi o freijó. Já a que teve piores resultados foi o cedro do controle, que ganhou mais decaimento logarítmico após a secagem de 160 graus. O freijó também teve um aumento mínimo da variável.

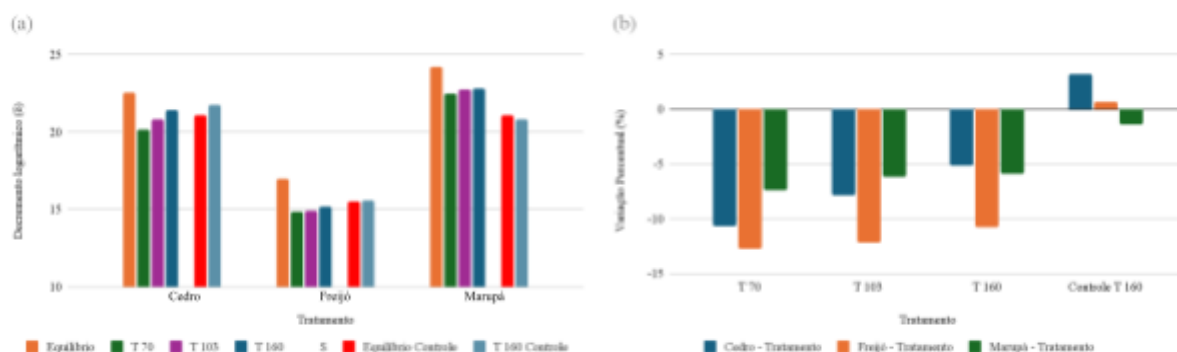


Figura 21 - Resultados de Decaimento Logarítmico para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de Decaimento Logarítmico nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de Decaimento Logarítmico por tratamento.

A Eficiência de Conversão Acústica (ECA) aumentou progressivamente com a elevação da temperatura (Figura 22). Os dados da Tabela 2 mostram que o Freijó apresentou os maiores valores absolutos em todos os tratamentos (acima de 2.300 a 160 °C), enquanto o Cedro e o Marupá tiveram ganhos percentuais expressivos (16,3% e 12,5%, respectivamente, entre Equilíbrio e 160 °C). A comparação com o grupo Controle 160 °C revela que o tratamento sequencial (70 °C → 103 °C → 160 °C) resultou em valores de ECA ligeiramente superiores no Freijó e no Cedro, sugerindo um possível efeito positivo da pré-secagem sequencial na qualidade acústica final.

O ECA do Cedro apresentou valor inicial de 1.137, o que se insere no intervalo de 700 a 1.250 documentado por Brémaud (2012). Leandro (2024) mostra que freijó e marupá apresentam módulo dinâmico elevado e ECA alta em comparação com outras espécies, recomendando-as, junto com coníferas, para tampos e partes que exigem grande rigidez com massa moderada conforme a hierarquia observada nos seus resultados.

Para o ECA, os maiores ganhos foram nas amostras que passaram pela pré-secagem, com as amostras de controle variando pouco após 160 graus. A espécie que mais se destacou foi o freijó da pré-secagem, seguido pelo cedro e o marupá. Também é possível observar uma tendência de crescimento em ECA para cada tratamento.

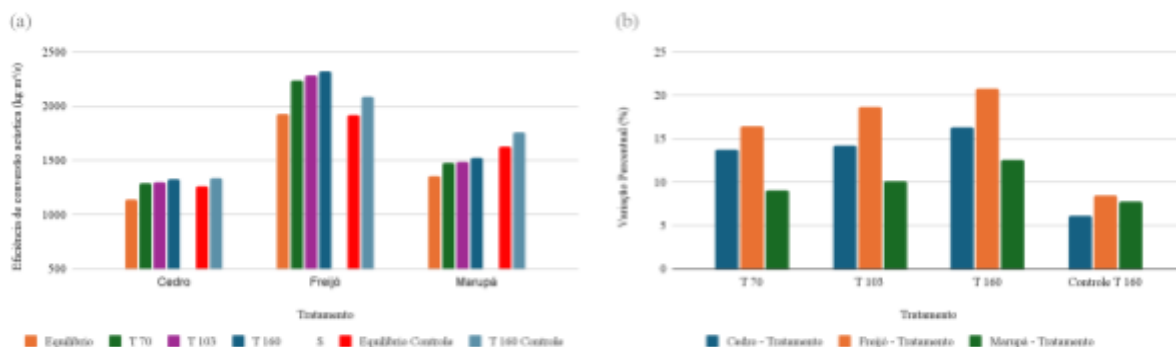


Figura 22 - Resultados Eficiência de Conversão Acústica (ECA) para cada espécie de madeira e tratamento utilizado: (a) média de ECA nos tratamentos para cada espécie; (b) Ganho percentual de ECA por tratamento.

4.2. Influência do Tipo de Corte nas Propriedades das Espécies

4.2.1. Cedro

Os resultados da Tabela 3 demonstram padrões distintos de comportamento entre as propriedades avaliadas em função do tipo de corte e das temperaturas de secagem. A densidade apresentou resposta significativa aos tratamentos térmicos, particularmente no corte tangencial, onde se observou redução progressiva com o aumento da temperatura, atingindo o valor mínimo (0,524 g/cm³) a 160°C. No corte radial, apenas a secagem a 160°C promoveu redução significativa em relação à madeira não tratada.

O módulo de elasticidade estático (E.e) mostrou-se mais sensível ao tipo de corte do que à temperatura de secagem. Amostras de corte radial tenderam a apresentar valores superiores aos do tangencial, embora com menor variação entre as temperaturas. Destaca-se que o tratamento a 70°C no corte radial resultou no maior valor de E.e (107.602 MPa), aproximadamente 10% superior ao menor valor registrado no corte tangencial a 160°C.

Tabela 3 -Agrupamento de médias pelo teste de Tukey (ANOVA) e teste de Dunn (Kruskal-Wallis) para sete propriedades físico-mecânicas da madeira de Cedro em função do tipo de corte e temperatura de secagem

Corte	Secagem	Densidade	E.e	E.d	E.esp	fr	dl	ECA
Radial	Não	0,590 ^a	99.515 ^{ab}	124.502 ^a	211.320 ^b	561,8 ^a	22,9 ^a	1075 ^c
	70°C	0,578 ^a	107.602 ^{ab}	129.002 ^a	218.720 ^{ab}	571,6 ^a	20,7 ^{cd}	1247 ^b
	103°C	0,575 ^a	101.002 ^{ab}	128.402 ^a	223.420 ^{ab}	572,6 ^a	21,4 ^{bc}	1214 ^b
	160°C	0,552 ^b	101.802 ^{ab}	125.902 ^a	228.320 ^{ab}	575,8 ^a	21,9 ^{abc}	1252 ^b
Tangencial	Não	0,555 ^b	97.687 ^b	121.902 ^a	219.620 ^{ab}	566,6 ^a	22,2 ^{ab}	1198 ^b
	70°C	0,543 ^b	101.002 ^{ab}	125.802 ^a	226.620 ^{ab}	575,6 ^a	19,6 ^d	1421 ^a
	103°C	0,540 ^{bc}	99.214 ^{ab}	124.402 ^a	230.420 ^{ab}	577,5 ^a	20,2 ^d	1383 ^a
	160°C	0,524 ^c	97.498 ^b	123.702 ^a	235.920 ^a	582,2 ^a	20,9 ^{cd}	1393 ^a

Legenda: E.e = módulo de elasticidade estático; E.d = módulo de elasticidade dinâmico; E.esp = módulo dinâmico relativo ou específico; dl = decaimento logarítmico da onda sonora; ECA = eficiência de conversão acústica; fr = frequência de ressonância.

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=5\%$) para dados paramétricos. Para a variável não paramétrica fr (frequência de ressonância), utilizou-se o teste de Dunn ($\alpha=5\%$) após Kruskal-Wallis ($H=5,4983$; $p=0,599$).

O módulo de elasticidade dinâmico (E.d) e a frequência de ressonância (fr) não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, indicando que estas propriedades mantiveram-se estáveis frente às variações de corte e temperatura. Esta estabilidade sugere que tais parâmetros podem ser menos sensíveis às alterações estruturais promovidas pelos processos de secagem avaliados.

O decaimento logarítmico (dl) revelou comportamento inversamente relacionado à temperatura de secagem no corte tangencial, com redução progressiva e significativa dos valores à medida que a temperatura aumentou, indicando uma melhora acústica para a madeira. No corte radial, essa tendência foi menos pronunciada, com diferenças significativas observadas principalmente entre os extremos de temperatura.

A eficiência de conversão acústica (ECA) apresentou a resposta mais marcante aos tratamentos, com aumento significativo nos cortes tangenciais submetidos à secagem térmica. Os valores de ECA no corte tangencial a 70°C, 103°C e 160°C foram aproximadamente 32% superiores aos do corte radial não tratado, sugerindo que a combinação entre corte tangencial e secagem térmica potencializa esta propriedade acústica.

O módulo dinâmico específico (E.d esp) mostrou tendência de aumento com a elevação da temperatura em ambos os cortes, atingindo o valor máximo no corte tangencial a 160°C. Este comportamento pode estar associado a alterações na estrutura celular da madeira que influenciam a relação entre as propriedades dinâmicas e a densidade do material.

De modo geral, os resultados indicam que o corte tangencial combinado com secagem em temperaturas moderadas a elevadas (70-160°C) tende a melhorar as propriedades acústicas da madeira de cedro, enquanto a densidade e algumas propriedades mecânicas podem ser mais preservadas no corte radial com tratamentos térmicos menos intensos.

4.2.2. Freijó

Os resultados (Tabela 4) revelam padrões distintos de influência do corte e da secagem térmica nas propriedades do Freijó, com respostas marcantes nas propriedades acústicas. A

densidade apresentou comportamento homogêneo entre os tratamentos, sem diferenças estatísticas significativas, indicando estabilidade desta propriedade frente às variações de corte e temperatura.

Tabela 4 - Agrupamento de médias pelo teste de Tukey (ANOVA) e teste de Dunn (Kruskal-Wallis) para sete propriedades físico-mecânicas da madeira de Freijó em função do tipo de corte e temperatura de secagem.

Corte	Secagem	Densidade	E.e	E.d	E.esp	fr	dl	ECA
Radial	Não	0,496 ^a	92.927 ^a	117.100 ^a	236.200 ^c	611,7 ^b	17,4 ^a	1781 ^b
	70°C	0,486 ^a	99.427 ^a	120.700 ^a	243.500 ^c	621,1 ^b	15,2 ^{ab}	2139 ^{ab}
	103°C	0,486 ^a	94.761 ^a	120.400 ^a	247.800 ^c	620,9 ^b	15,2 ^{ab}	2135 ^{ab}
	160°C	0,474 ^a	97.157 ^a	119.200 ^a	251.200 ^{bc}	622,6 ^b	15,5 ^{ab}	2159 ^{ab}
Tangencial	Não	0,485 ^a	96.169 ^a	125.700 ^a	257.800 ^{abc}	649,2 ^a	16,6 ^{ab}	2050 ^{ab}
	70°C	0,479 ^a	101.500 ^a	129.800 ^a	266.200 ^{ab}	659,8 ^a	14,5 ^b	2429 ^a
	103°C	0,477 ^a	99.116 ^a	129.800 ^a	270.400 ^a	660,5 ^a	14,7 ^b	2413 ^a
	160°C	0,465 ^a	96.964 ^a	127.800 ^a	273.200 ^a	661,2 ^a	14,8 ^b	2468 ^a

Legenda: E.e = módulo de elasticidade estático; E.d = módulo de elasticidade dinâmico; E.esp = módulo dinâmico relativo ou específico; dl = decaimento logarítmico da onda sonora; ECA = eficiência de conversão acústica; fr = frequência de ressonância.

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=5\%$) para dados paramétricos (fr e E.d esp). Para as variáveis não paramétricas, utilizou-se o teste de Dunn ($\alpha=5\%$) após Kruskal-Wallis: Densidade (H=3,5743; p=0,8270); E.e (H=2,3704; p=0,9370); E.d (H=3,8641; p=0,795); dl (H=29,2909; p=0,0001); ECA (H=21,2983; p=0,0034).

As propriedades mecânicas (E.e e E.d) demonstraram notável consistência, mantendo-se estatisticamente equivalentes em todos os tratamentos. Esta estabilidade sugere que a estrutura mecânica do Freijó possui resistência significativa às alterações induzidas pelos diferentes cortes e tratamentos térmicos aplicados.

O módulo dinâmico específico (E.d esp) apresentou resposta diferenciada, com valores progressivamente superiores no corte tangencial em relação ao radial. No corte tangencial, observou-se aumento significativo com a elevação da temperatura, atingindo o valor máximo (273,200) a 160°C, enquanto no radial os valores permaneceram inferiores e estatisticamente equivalentes até 103°C.

A frequência de ressonância (fr) demonstrou clara distinção entre os tipos de corte, com valores significativamente superiores no tangencial em todas as temperaturas. Esta diferença chega a aproximadamente 8% entre os cortes na mesma condição de secagem, indicando que a orientação das fibras no corte tangencial favorece a propagação de ondas sonoras.

O decaimento logarítmico (dl) apresentou a resposta mais significativa aos tratamentos, com redução progressiva nos valores à medida que a temperatura de secagem aumentou. No corte tangencial, os tratamentos térmicos promoveram reduções significativas no dl, com valores mínimos entre 14,5 e 14,8, contrastando com o maior valor de 17,4 no radial não tratado.

A eficiência de conversão acústica (ECA) destacou-se como a propriedade mais sensível aos tratamentos, com aumentos significativos proporcionados pela combinação do corte tangencial com secagem térmica. Os valores de ECA no tangencial a 70-160°C foram

aproximadamente 38% superiores aos do radial não tratado, demonstrando o potencial de melhoria das propriedades acústicas através desta combinação.

Nota-se que o corte tangencial, particularmente quando associado a tratamentos térmicos, tende a otimizar as propriedades acústicas do Freijó, enquanto o corte radial manteve características mais conservadoras. A estabilidade das propriedades mecânicas frente aos tratamentos aplicados sugere que o Freijó possui boa resistência estrutural, mantendo suas características fundamentais mesmo sob diferentes condições de processamento.

Os resultados indicam que para aplicações onde propriedades acústicas são prioritárias, o corte tangencial com secagem térmica entre 70-160°C apresenta vantagens significativas, particularmente para a ECA e fr, enquanto para aplicações estruturais ambos os cortes mostraram equivalência nas propriedades mecânicas avaliadas.

4.2.3. Marupá

Os resultados do Marupá revelam uma nítida influência do tipo de corte sobre as propriedades avaliadas, com o corte tangencial apresentando desempenho consistentemente superior ao radial na maioria dos parâmetros (Tabela 5). A densidade demonstrou diferenças significativas entre os tratamentos, com valores marcadamente superiores no corte tangencial, que apresentou densidade média aproximadamente 10% maior que a do corte radial.

Tabela 5 - Agrupamento de médias pelo teste de Tukey (ANOVA) e teste de Dunn (Kruskal-Wallis) para sete propriedades físico-mecânicas da madeira de Marupá em função do tipo de corte e temperatura de secagem

Corte	Secagem	Densidade	E.e	E.d	E.esp	fr	dl	ECA
Radial	Não	0,423 ^{ab}	77.006 ^a	85.256 ^a	201.600 ^a	572,3 ^a	25,8 ^a	1310 ^a
	70°C	0,414 ^{ab}	75.884 ^a	88.095 ^a	208.300 ^a	581,8 ^a	24,0 ^{ab}	1470 ^a
	103°C	0,416 ^{ab}	71.698 ^a	87.585 ^a	210.700 ^a	582,5 ^a	24,2 ^{ab}	1446 ^a
	160°C	0,409 ^b	76.031 ^a	86.668 ^a	212.100 ^a	584,3 ^a	23,7 ^{ab}	1501 ^a
Tangencial	Não	0,467 ^a	83.638 ^a	101.500 ^a	215.100 ^a	587,3 ^a	22,8 ^{bc}	1391 ^a
	70°C	0,456 ^{ab}	86.359 ^a	104.400 ^a	221.500 ^a	596,1 ^a	21,0 ^d	1575 ^a
	103°C	0,456 ^{ab}	81.153 ^a	102.600 ^a	222.700 ^a	596,4 ^a	21,4 ^{cd}	1531 ^a
	160°C	0,450 ^{ab}	84.27 ^a	103.000 ^a	227.000 ^a	600,8 ^a	21,9 ^{cd}	1536 ^a

Legenda: E.e = módulo de elasticidade estático; E.d = módulo de elasticidade dinâmico; E.d esp = módulo dinâmico relativo ou específico; dl = decaimento logarítmico da onda sonora; ECA = eficiência de conversão acústica; fr = frequência de ressonância.

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=5\%$) para dados paramétricos (E.e, E.d esp, dl, ECA). Para as variáveis não paramétricas, utilizou-se o teste de Dunn ($\alpha=5\%$) após Kruskal-Wallis: Densidade (H=20,8056; p=0,0041); E.d (H=9,9397; p=0,192); fr (H=14,7498; p=0,0393).

As propriedades mecânicas mostraram respostas distintas entre os módulos de elasticidade. Enquanto o módulo estático (E.e) manteve-se estatisticamente equivalente entre os tratamentos, o módulo dinâmico (E.d) apresentou valores significativamente superiores no corte tangencial, com diferenças que atingem cerca de 20% em relação ao corte radial na mesma condição de secagem. Este comportamento sugere que a orientação das fibras no corte tangencial favorece particularmente as propriedades dinâmicas do material.

O módulo dinâmico específico (E.d esp) apresentou tendência de aumento com a elevação da temperatura em ambos os cortes, porém com valores basais significativamente

superiores no tangencial. A diferença entre os cortes chega a aproximadamente 7% na madeira não tratada, indicando que a estrutura do Marupá responde de forma distinta às solicitações dinâmicas conforme a orientação do corte.

A frequência de ressonância (fr) mostrou comportamento crescente com o aumento da temperatura de secagem, particularmente no corte tangencial, onde atingiu o valor máximo de 600,8 Hz a 160°C. Esta progressão sugere que os tratamentos térmicos promovem alterações estruturais que influenciam positivamente a propagação de ondas mecânicas no material.

O decaimento logarítmico (dl) apresentou resposta significativa aos tratamentos, com redução progressiva nos valores conforme aumentou a temperatura de secagem. No corte tangencial, observou-se a maior redução, com valores entre 21,0 e 21,9 nos tratamentos térmicos, contrastando com 25,8 no radial não tratado. Esta redução indica menor dissipação de energia vibratória nos tratamentos com maior temperatura.

A eficiência de conversão acústica (ECA) demonstrou valores superiores nos tratamentos com secagem térmica, embora sem diferenças estatísticas significativas entre eles. Nota-se tendência de melhoria nas propriedades acústicas com a aplicação de calor, particularmente no corte tangencial a 70°C, que apresentou o maior valor de ECA (1575).

De modo geral, os resultados evidenciam que o corte tangencial do Marupá apresenta vantagens significativas na maioria das propriedades avaliadas, especialmente aquelas relacionadas ao comportamento dinâmico e acústico da madeira. Os tratamentos térmicos demonstraram efeitos positivos principalmente na redução do decaimento logarítmico e no aumento da frequência de ressonância, sugerindo melhorias nas características de vibração do material.

A estabilidade do módulo de elasticidade estático frente aos diferentes tratamentos indica que as propriedades mecânicas fundamentais do Marupá são preservadas, enquanto as propriedades dinâmicas e acústicas mostram-se mais sensíveis às variações de corte e temperatura, oferecendo oportunidades de otimização para aplicações específicas

4.3. Visão geral

Os tratamentos térmicos sequenciais promoveram melhorias significativas nas propriedades acústicas das três espécies, com respostas distintas conforme suas características anatômicas. O Cedro destacou-se pela homogeneidade e comportamento previsível, com o corte tangencial potencializando suas propriedades acústicas. O Freijó apresentou o melhor desempenho acústico absoluto, especialmente em corte tangencial com secagem térmica, confirmando seu potencial para instrumentos musicais de alta qualidade. O Marupá demonstrou sensibilidade ao tipo de corte, com o tangencial proporcionando vantagens consistentes nas propriedades dinâmicas e acústicas. A pré-secagem sequencial mostrou-se superior ao tratamento direto a 160°C, promovendo transformações estruturais mais controladas e resultados mais homogêneos.

5. CONCLUSÃO

Os tratamentos térmicos sequenciais influenciaram positivamente nas propriedades físico-mecânicas e acústicas das madeiras estudadas, com variações dependentes da espécie e do tipo de corte. O Cedro caracterizou-se pela homogeneidade aos tratamentos. O Freijó destacou-se com as melhores propriedades acústicas, especialmente quando processado em corte tangencial e submetido à secagem sequencial até 160°C. O Marupá mostrou ser sensível à orientação de corte, com o tangencial proporcionando melhor desempenho geral. A pré-secagem demonstrou vantagens sobre o tratamento térmico direto, promovendo melhorias mais equilibradas e reduzindo a variabilidade entre amostras para alguns casos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos para a seleção e emprego adequado das espécies Cedro, Freijó e Marupá em aplicações específicas. Recomenda-se o Cedro para usos que priorizem uniformidade e estabilidade dimensional, o Freijó para aplicações acústicas de maior demanda por eficiência acústica, e o Marupá para situações que exigem equilíbrio entre propriedades mecânicas e acústicas. A adoção do corte tangencial associado à pré-secagem sequencial mostrou ser positivo para a otimização das propriedades acústicas nas três espécies. Estudos futuros podem investigar os mecanismos microestruturais responsáveis pelas diferenças observadas entre os tipos de corte, bem como avaliar o comportamento das madeiras em condições de umidade relativa variável.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G.; HERNÁNDEZ, R. E. Changes in physical properties of tropical and temperate hardwoods below and above the fiber saturation point. **Wood Science and Technology**, v. 40, p. 599-613, 2006.

ALTGEN, Michael; WELZBACHER, Christian; HUMAR, Miha; MILITZ, Holger. **ESR-spectroscopy as a method for the quality control of thermally modified wood**. Em: COST ACTION FP0904 CONFERENCE, Nancy, France, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876-01: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2001.

AMORIM, Erick Phelipe; PAES, Juarez Benigno; NICÁCIO, Marcos Alves. Anisotropia da contração e inchamento da madeira: uma abordagem tecnológica. In: EVANGELISTA, W. V. (Org.). **Madeiras Nativas e Plantadas do Brasil: Qualidade, Pesquisas e Atualidades**. v. 2. Guarujá: Editora Científica Digital, 2022. p. 82-100.

BÄCHLE, Helmut; ZIMMER, Bernhard; WINDEISEN, Elisabeth; WEGENER, G. Evaluation of thermally modified beech and spruce wood and their properties by FT-NIR spectroscopy. **Wood Science and Technology**, v. 44, n. 3, p. 421–433, 2010.

BRASILEIRO, Serviço Florestal. Laboratório de Produtos Florestais. ***Cedrela sp.*** Brasília, DF, Brasil. Disponível em: https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/?option=com_madeirasbrasileiras&view=especieestudada&especieestudadaid=60. Acesso em: 13 dez. 2025.

BRASILEIRO, Serviço Florestal. Laboratório de Produtos Florestais. ***Cordia goeldiana*** Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/component/madeirasbrasileiras/especieestudada?especieestudadaid=73&Itemid=>. Acesso em: 13 dez. 2025.

BRASILEIRO, Serviço Florestal. Laboratório de Produtos Florestais. ***Simarouba amara*** Brasília, DF, Brasil. Disponível em:

<https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/component/madeirasbrasileiras/especieestudada?especieestudadaid=231&Itemid=>. Acesso em: 13 dez. 2025.

BRÉMAUD, Iris. Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 1, p. 807-818, 2012.

BRISCHKE, Christian; WELZBACHER, Christian R.; BRANDT, Karin; RAPP, Andreas Otto. Quality control of thermally modified timber: interrelationship between heat treatment intensities and CIE Lab color data on homogenized wood samples. **Holzforschung**, Berlin; New York: Walter de Gruyter, v. 61, p. 19–22, 2007.

CARBAJO, J. *et al.* Determination of dynamic elastic modulus of materials under a state of simple stresses by using electrodynamic actuators in beam-type mechanical elements. **Materials Letters**, [S. l.], v. 320, p. 132383, 2022.

DANIHELOVÁ, Anna *et al.* Thermal modification of spruce and maple wood for special wood products. **Polymers**, v. 14, n. 14, p. 2813, 2022.

DEL MENEZZI, C. H. S. *et al.* Evaluation of thermally modified wood by means of stress wave non-destructive testing. **Materials Science (Medžiagotyra)**, Kaunas, v. 20, n. 4, p. 487-492, 2014.

ESTEVEZ, Bruno M.; PEREIRA, Helena M. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, v. 4, n. 1, 2009.

FERREIRA, Mayra Daniela *et al.* Propriedades físicas e mecânicas da madeira de angelim-pedra submetida a tratamento térmico. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 16, n. 1, p. 3-7, 2019.

FICH, K. N.; JONES, F. A.; CRONN, R. C. Cryptic species diversity in a widespread neotropical tree genus: The case of *Cedrela odorata*. **American Journal of Botany**, v. 109, n. 10, p. 1622–1640, 2022.

GARCIA, Rosilei A *et al.* Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. **Wood Science and Technology**, v. 46, p. 41–52, 2012. DOI: 10.1007/s00226-010-0387-6.

GIBSON, L. J. The hierarchical structure and mechanics of plant materials. **Journal of the Royal Society Interface**, 9(76): 2749-2766, 2012.

GRININS, Juris *et al.* Chemical composition and mechanical properties of wood after thermal modification in closed process under pressure in nitrogen. **Materials**, v. 17, n. 7, p. 1468, 2024.

GUILHON, David; GUIMARAES, Karoline de Lourdes Monteiro; LOURENÇO, Anna Karen Lima. Avaliação das propriedades tecnológicas das madeiras maranhenses voltadas para a fabricação de violões. **Estudos em Design**, v. 29, n. 2, 2021.

HILL, Callum; ALTTGEN, Michael; RAUTKARI, Lauri. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity. **Journal of Materials Science**, v. 56, n. 11, 2021

HURTADO DE MENDOZA, Z. M. S.; BORGES, P. H. M.; SILVA, É. P. P. da. Propriedades físicas da madeira de cedro - *Cedrela fissilis* Vell. **Multitemas**, Campo Grande, n. 48, p. 1-18, jul./dez. 2015.

IMCE. **Impulse Excitation Technique**. Genk, Bélgica, [s.d.]. Disponível em: <https://imce.eu/impulse-excitation-technique/>. Acesso em: 14/10/2025.

INARI, Gildas Nguila; PÉTRISSANS, Mathieu; PÉTRISSANS, Anélie; GÉRARDIN, Philippe. Elemental composition of wood as a potential marker to evaluate heat treatment intensity. **Polymer Degradation and Stability**, v. 94, n. 3, p. 365–368, mar. 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Cedro**. São Paulo, 2023a. Disponível em: <https://madeiras.ipt.br/cedro/>. Acesso em: 12 dez. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Marupá**. São Paulo, 2023b. Disponível em: <https://madeiras.ipt.br/marupa/>. Acesso em: 12 dez. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Freijó**. São Paulo, 2023c. Disponível em: <https://madeiras.ipt.br/freijo/>. Acesso em: 12 dez. 2025.

JONES, Dennis; SANDBERG, Dick; GOLI, Giacomo; TODARO, Luigi. **Wood Modification in Europe: a state-of-the-art about processes, products and applications**. Firenze University Press, 2019.

KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira**. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, N. (Orgs.). Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda., v. 1, p. 271-366, 2007.

LAUDARES, Francisco Antonio Lopes. **Efeito do Tratamento Térmico nas Características das Madeiras de Marupá e Freijó para Uso em Instrumentos Musicais**. 2022. 197 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2022.

LEANDRO, G. I. C. **Propriedades acústicas e o efeito da radiação UV nas cores de madeiras nativas e exóticas**. 2024. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2024.

MARQUES, Márcia Helena Bezerra *et al.* Efeito da secagem nas propriedades acústicas da madeira de marupá (*Simarouba amara* Aubl.). **Floresta e ambiente**, v. 12, n. 2, p. 57-64, 2005.

MASCARENHAS, Adriano Reis Prazeres *et al.* Physico-mechanical properties of the wood of freijó, *Cordia goeldiana* (Boraginaceae), produced in a multi-stratified agroforestry system in the southwestern Amazon. **Acta Amazonica**, v. 51, n. 2, p. 171-180, 2021.

MENDOZA, Z. M. S. H.; BORGES, P. H. M.; SILVA, E. P. P. Propriedades físicas da madeira de cedro – *Cedrela fissilis* Vell. **Multitemas**, Campo Grande, MS, n. 48, p. 165-178, jul./dez. 2015.

MILITZ, H.; ALTTGEN, M. Processes and properties of thermally modified wood manufactured in Europe. **Deterioration and protection of sustainable biomaterials**. Washington, DC: ACS, 2014. p. 269-285.

MIRANDA, M. C.; CASTELO, P. A. R.; MIRANDA, D. L. C.; RONDON, E. V. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Parkia gigantocarpa* Ducke. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, Pelotas, v. 3, n. 2, p. 56-64, nov. 2012.

NOCK, H. P.; RICHTER, H. G.; BURGER, L. M. **Tecnologia da madeira**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais, 1975. 216 p.

NTi Audio. **Transformação rápida de Fourier (FFT) — Noções Básicas**. Disponível em: <https://www.nti-audio.com/pt/suporte/saber-como/transformacao-rapida-de-fourier-fft>. Acesso em: 14/10/2025.

OBATAYA, E.; ONO, T.; NORIMOTO, M. Vibrational properties of wood along the grain. **Journal of Materials Science**, v. 35, n. 12, p. 2993-3001, 2000.

OBATAYA, Eiichi; ZENIYA, Nanami; ENDO-UJIIE, Kaoru. Effects of seasoning on the vibrational properties of wood for the soundboards of string instruments. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 147, n. 2, p. 998, 2020.

PORTELA, M. S. **Estudo das propriedades acústicas da madeira amazônica marupá para tampo de violão**, 2014. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina 2014.

ROWELL, Roger M. *et al.* Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat-treated and acetylated wood. **Wood Material Science and Engineering**, Madison, v. 1, n. 1-2, p. 14-22, 2009

SANTOS, M. A.; DRESCHER, R.; MORA, R.; VENDRUSCULO, D. G. S. Funções de Kozak et al. para afilamento de *Cordia goeldiana* Huber em plantio homogêneo no município de Vilhena - RO. In: PASA, M. C.; DAVID, M. (Ed.). **Múltiplos Olhares Sobre a Biodiversidade**. Cuiabá: Carlini & Caniato Editorial, 2017. p. 306-321.

SANTOS, Rogério Rodrigues dos. **Aplicação dos métodos dinâmicos vibracionais e estático, na determinação das propriedades acústicas e mecânica de madeiras exóticas**. 2021. 40 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2021.

SIKORA, Adam *et al.* Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. **Journal of wood Science**, v. 64, n. 4, p. 406-416, 2018.

SLOOTEN, Harry Jan van der; SOUZA, Mário Rabelo de. **Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para a manufatura de instrumentos musicais**. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 1993.

SOUZA, Maria Helena de; BRASILEIRO–MMA, Serviço Florestal. **Madeiras utilizadas para a fabricação de instrumentos musicais**. 2009.

SOUZA, Mário Rabelo. **Madeiras para instrumentos musicais, Classificação Preliminar**. LPF-IBDF, Ministério da Agricultura. p. 28, 1983.

SWARNAKAR, A. K. et al. Recent Advances in Material Characterization using the Impulse Excitation Technique (IET). **Key Engineering Materials**, v. 333, p. 235-238, 2007.

WIKIPEDIA. **Logarithmic decrement**. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Logarithmic_decrement. Acesso em: 30 out. 2023.

ANEXO A – TESTES DE NORMALIDADE E HOMOGENEIDADE DA VARIÂNCIA

Anexo 1. Teste de normalidade por Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 0,05 de significância para cada espécie de madeira.

Propriedade	Cedro		Freijó		Marupá	
	D Tabelado	D Calculado	D Tabelado	D Calculado	D Tabelado	D Calculado
Massa	0,16028	0,10023	0,15499	0,16947	0,15600	0,11639
Volume	0,16028	0,12355	0,15499	0,08059	0,15600	0,17176
Densidade	0,16028	0,08445	0,15499	0,16962	0,15600	0,21410
E.e	0,16028	0,05785	0,15499	0,07867	0,15600	0,12820
E.d	0,16028	0,08168	0,15499	0,08655	0,15600	0,16593
E.d esp	0,16028	0,10085	0,15499	0,04847	0,15600	0,05970
fr	0,16028	0,21671	0,15499	0,08117	0,15600	0,18842
dl	0,16028	0,09046	0,15499	0,11027	0,15600	0,11376
ECA	0,16028	0,08646	0,15499	0,13100	0,15600	0,07759

Nota: Valores em negrito indicam dados sem normalidade a 5% de significância.

Anexo 2. Teste de Homogeneidade de Variâncias por Brown-Forsythe, ao nível de 0,05 de significância para cada espécie de madeira.

Propriedade	Valor-p		
	Cedro	Freijó	Marupá
Massa	0,12787	0,41694	0,01821
Volume	0,99726	0,90534	0,77278
Densidade	0,13697	0,44752	0,00585
E.e	0,93016	0,00191	0,09052
E.d	0,99966	0,00056	0,03350
E.d esp	0,99999	0,44393	1,00000
fr	0,99959	0,99944	0,99610
dl	0,11832	0,02087	0,87215
ECA	0,25215	0,03719	0,99977

Legenda: Valores-p > 0,05 indicam homogeneidade de variâncias.

Nota: Valores em negrito indicam dados sem homogeneidade.