

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

DISSERTAÇÃO

**PROCESSOS DE TRATAMENTO TÉRMICO EM QUATRO
MADEIRAS CLASSIFICADAS PARA TAMPOS ACÚSTICOS DE
INSTRUMENTOS MUSICAIS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**PROCESSOS DE TRATAMENTO TÉRMICO EM QUATRO
MADEIRAS CLASSIFICADAS PARA TAMPOS ACÚSTICOS DE
INSTRUMENTOS MUSICAIS**

ROGÉRIO RODRIGUES DOS SANTOS

Sob a orientação da Professora

Dr^a. Natália Dias de Souza

Sob coorientação dos Professores

Dr^a. Alexandre Miguel do Nascimento

Dr^a. Renata Nunes Oliveira

Dissertação submetida como requisito
parcial para obtenção do grau de **Mestre em
Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais e Florestais, Área de
Concentração em Ciência e Tecnologia de
Produtos Florestais

Seropédica, RJ
Junho de 2025

R237p Rodrigues dos Santos, Rogério, 1998-
PROCESSOS DE TRATAMENTO TÉRMICO EM QUATRO MADEIRAS
CLASSIFICADAS PARA TAMPOS ACÚSTICOS DE INSTRUMENTOS
MUSICais / Rogério Rodrigues dos Santos. Seropédica,
2025.
75 f.: il.

Orientadora: Natália Dias de Souza.
Coorientador: Alexandre Miguel do Nascimento.
Coorientadora: Renata Nunes Oliveira.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais e Florestais, 2025.

1. Tratamento térmico de madeiras. 2. Madeiras para instrumentos musicais. 3. Tecnologia de produtos florestais. I. Dias de Souza, Natália , 1981-, orient. II. Miguel do Nascimento, Alexandre , 1961-, coorient. III. Nunes Oliveira, Renata , 1984- , coorient. IV Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. V. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

ROGÉRIO RODRIGUES DOS SANTOS

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/06/2025

Natália Dias de Souza. Prof.^a Dr^a. UFRRJ
(Orientadora)

Fabrício Gomes Gonçalves Prof.^o Dr^o. UFES

Roberto Carlos Costa Lelis. Prof.^o Dr^o. UFRRJ



TERMO N° 628/2025 - PPGCAF (12.28.01.00.00.00.27)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 13/08/2025 11:26)

NATALIA DIAS DE SOUZA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)
Matrícula: ###728#2

ASSINANTE EXTERNO
CPF: ####.###.477-##

(Assinado digitalmente em 25/07/2025 10:03)

ROBERTO CARLOS COSTA LELIS
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
IF (12.28.01.26)
Matrícula: ###192#4

(Assinado digitalmente em 28/07/2025 11:48)

FABRICIO GOMES GONÇALVES

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: 628, ano: 2025, tipo:
TERMO, data de emissão: 25/07/2025 e o código de verificação: c21dcd8c75

DEDICATÓRIA

*À Força maior.
À minha família.*

*Aos meus amigos.
Aos meus incentivadores.
Aos luthiers colegas de ofício.*

*Ao Estado da República Federativa do
Brasil.
Aos meus futuros alunos
Aos professores.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Força maior, sem a qual não seria possível a realização desse trabalho;

Aos meus pais, Darciléa e Rogério pelo suporte e apoio necessário;

Aos terapeutas Milene e Maurício pelo suporte psicológico, assim como aos psiquiatras que me atenderam;

Aos meus orientadores oficiais e extraoficiais Alexandre Miguel, Natália Dias, Renata Nunes, Renato Robert e Francisco Laudares;

Aos colegas de laboratório Jaqueline Rocha, Iuri Gabriel, Natália Tambasco e Caroline da Silva;

Aos técnicos de laboratório José e Mário;

Aos clientes no campo da luteria;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

SANTOS, Rogério Rodrigues dos. **Processos de tratamento térmico em quatro madeiras classificadas para tampos acústicos de instrumentos musicais.** 2025. 75p Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais, Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais). Instituto de Florestas, Departamento de Produtos Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

O principal material utilizado para a construção de instrumentos musicais é a madeira, não somente, mas essencialmente madeira de qualidade superior, originando um grupo classificado como “madeiras tonais” (tonewood ou Tonholz). O grupo de madeiras utilizadas com esse fim, com maior exigência em termos de suas propriedades acústicas, é o tampo de ressonância. Com o aumento das restrições de corte de madeiras de florestas naturais e intensificação de pragas em espécies consolidadas para fins acústicos, surge a necessidade de estudos do material madeira, visando elevar a qualidade do produto. Dentre essas pesquisas destaca-se o tratamento térmico que consiste no aquecimento da madeira a temperaturas que modifiquem ou degradem componentes físicos e químicos da madeira. Esse trabalho teve como objetivo verificar o efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas, acústicas, mecânicas, químicas e estéticas das madeiras de Abeto europeu (*Picea abies L.*), Kiri japonês (*Paulownia tormentosa*), Marupá (*Simarouba amara*) e Cedro Rosa (*Cedrela Odorata*). As espécies foram acondicionadas em locais com umidade e temperatura controlados, visando à obtenção do teor de umidade de 0% e 12%. Após, o material foi aquecido sob vácuo às temperaturas de 140°C e 160°C por 20h, com taxa de aquecimento de 0,45°C/min, e após finalização do processo, foi resfriado por 24h. Posteriormente todo material foi acondicionado em ambiente com umidade relativa de 65% e temperatura média de 22°C. Após climatização, foram realizados ensaios acústicos por método vibracional de barras livres, por onde foram determinados frequência de ressonância, atenuação acústica, módulo de elasticidade dinâmico, velocidade do som e eficiência na conversão acústica; ensaios físicos para determinar a retratabilidade, coeficientes de inchamento; ensaios químicos por FTIR para caracterizar as alterações dos polímeros da madeira; ensaios mecânicos para determinar módulo de elasticidade; ensaios de caracterização colorimétrica (cor). Os resultados mostraram que as madeiras de kiri, para decaimento logarítmico e eficiência na conversão acústica, e cedro rosa, para densidade aparente, com teor de umidade igual a 0%, obtiveram melhores resultados quando aquecidas na temperatura de 140°C. Para madeiras de Abeto europeu e Marupá, os melhores resultados foram obtidos quando tratadas à 160°C e 12% para as variáveis decaimento logarítmico e eficiência na conversão acústica. Concluiu-se que o tratamento térmico altera as propriedades físicas, acústicas, mecânicas, químicas e colorimétricas das madeiras classificadas para tampos acústicos de instrumentos musicais.

Palavras-chave: madeiras tonais, modificação química, tampo harmônico

ABSTRACT

SANTOS, Rogério Rodrigues dos. **Thermal treatment processes in four tonewoods classified for acoustic soundboards of musical instruments.** 2025. 75p. Dissertation (Master of Science in Environmental and Forest Sciences, Forest Products Science and Technology). Institute of Forest Sciences, Department of Forest Products, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

The primary material used in the construction of musical instruments is wood—specifically, high-quality wood—leading to a category known as "tonewoods" (*Madeiras tonais* or *Tonholz*). Among these, the wood used for soundboards requires the highest acoustic performance. Due to increasing restrictions on harvesting wood from natural forests and the intensification of pests affecting well-established acoustic wood species, there is a growing need for research on wood materials aimed at improving product quality. One such research focus is thermal modification, which involves heating wood to temperatures that alter or degrade its physical and chemical components. This study aimed to evaluate the effects of thermal treatment on the physical, acoustic, mechanical, chemical, and aesthetic properties of European spruce (*Picea abies* L.), Japanese kiri (*Paulownia tomentosa*), marupá (*Simarouba amara*), and pink cedar (*Cedrela odorata*). The specimens were conditioned in environments with controlled temperature and humidity to reach moisture contents of 0% and 12%. They were then heated under vacuum at 140°C and 160°C for 20 hours, with a heating rate of 0.45°C/min, and subsequently cooled for 24 hours. After the process, the material was stored under conditions of 65% relative humidity and an average temperature of 22°C. Following acclimatization, acoustic tests were conducted using the free-vibration bar method to determine resonance frequency, acoustic attenuation, dynamic modulus of elasticity, speed of sound, and acoustic conversion efficiency. Physical tests were performed to assess shrinkage and swelling coefficients. FTIR chemical analyses were carried out to characterize changes in the wood polymers. Mechanical tests were conducted to determine the modulus of elasticity, and colorimetric characterization tests assessed changes in wood color. The results showed that *Paulownia tomentosa* exhibited the best performance at 140°C and 0% moisture for logarithmic decay and acoustic conversion efficiency. *Cedrela odorata* showed optimal results for apparent density under the same conditions. For *Picea abies* and *Simarouba amara*, the best results for logarithmic decay and acoustic conversion efficiency were obtained at 160°C and 12% moisture content. It was concluded that thermal treatment alters the physical, acoustic, mechanical, chemical, and colorimetric properties of woods classified for use as soundboards in musical instruments.

Keywords: Tonewood, Chemical modification, soundboard.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO GERAL	3
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1 MADEIRAS UTILIZADAS PARA CONSTRUÇÃO DE INSTRUMENTOS DE CORDA	4
3.2 TRATAMENTO TÉRMICO.....	5
3.3 PROPRIEDADES DA MADEIRA AFETADAS PELO TRATAMENTO TÉRMICO	6
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
4.1 AQUISIÇÃO, DESDOBRO E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	9
4.2. ESCOPO DO EXPERIMENTO	10
4.3 CLIMATIZAÇÃO E UMIDADE DO MATERIAL	12
4.4 TRATAMENTO TÉRMICO DAS MADEIRAS	12
4.5 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	12
4.6 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE	13
4.7 DETERMINAÇÃO DA PERDA DE MASSA.....	13
4.8 PROPRIEDADES FÍSICAS – INCHAMENTO	13
4.8.1 <i>Inchamento linear máximo tangencial</i>	14
4.8.2 <i>Inchamento linear máximo radial</i>	14
4.8.3 <i>Inchamento linear máximo longitudinal</i>	14
4.8.4 <i>Coeficiente de anisotropia de Inchamento</i>	14
4.9 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS	14
4.9.1 <i>Coordenadas do sistema CIE L*a*b*</i>	14
4.9.2 <i>Pontos de coleta de cor</i>	15
4.9.3 <i>Saturação e Ângulo de tinta</i>	16
4.9.4 <i>Determinação das propriedades acústicas</i>	16
4.9.4.1 <i>Frequência de ressonância e decaimento logarítmico</i>	16
4.9.5 <i>Eficiência de conversão acústica (ECA)</i>	17
4.9.6 <i>Determinação das propriedades mecânicas</i>	17
4.9.7 <i>Módulo de elasticidade dinâmico e módulo relativo</i>	17
4.10 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS.....	17

4.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA	18
4.12 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	18
5. RESULTADOS	19
5.1 CEDRO ROSA (<i>CEDRELA ODORATA</i>)	19
5.1.1 <i>Propriedades mecânicas e acústicas</i>	19
5.1.2 <i>Propriedades físicas</i>	22
5.1.2.1 Perda de massa, densidades, umidade de equilíbrio e propriedades anisotrópicas	22
5.1.3 <i>Propriedades colorimétricas</i>	25
5.1.4 <i>Propriedades químicas</i>	28
5.2 KIRI (<i>PAULOWNIA TOMENTOSA</i>)	30
5.2.1 <i>Propriedades mecânicas e acústicas</i>	30
5.2.2 <i>Propriedades físicas</i>	31
5.2.2.1 Perda de massa, densidades, umidade de equilíbrio e propriedades anisotrópicas	31
5.2.3 <i>Propriedades colorimétricas</i>	34
5.2.4 <i>Propriedades químicas</i>	37
5.3 ABETO (<i>PICEA ABIES</i>)	38
5.3.1 <i>Propriedades mecânicas e acústicas</i>	39
5.3.2 <i>Propriedades físicas</i>	40
5.3.2.1 Perda de massa, densidades, umidade de equilíbrio e propriedades anisotrópicas	40
5.3.3 <i>Propriedades colorimétricas</i>	42
5.3.4 <i>Propriedades químicas</i>	45
5.4 MARUPÁ (<i>SIMAROURA AMARA</i>)	47
5.4.1 <i>Propriedades mecânicas e acústicas</i>	47
5.4.2 <i>Propriedades físicas</i> :	48
5.4.2.1 Perda de massa, densidades, umidade de equilíbrio e propriedades anisotrópicas	48
5.4.3 <i>Propriedades colorimétricas</i>	50
5.4.4 <i>Propriedades químicas</i>	53
6. CONCLUSÕES.....	55

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS.....	63
TABELA ANEXO I. QUADROS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA	63
ANEXO II. TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV (KS).....	64
ANEXO III. TESTE DE VERIFICAÇÃO SE AS VARIÂNCIAS SÃO HOMOGÊNEAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por madeiras para fins acústicos com propriedades tecnológicas superiores e oriunda de fontes sustentáveis, justificam os investimentos realizados por empresas como a Yamaha, Taylor Guitars, Regreen e Symbiosis em plantios e manejo de espécies madeiráveis tropicais de alto valor agregado (Caudullo et al, 2016; Música e Mercado, 2022; Cooper, 2024). Os investimentos dessas empresas vão desde pesquisas para seleção de madeiras já disponíveis no mercado, cultivo de espécies escassas até a melhoria das propriedades tecnológicas das madeiras.

A demanda por recursos mais sustentáveis tem efeito direto na oferta de madeiras para usos artísticos de luxo, como em instrumentos musicais. A construção de cordofones (instrumentos de cordas dedilhadas) é dependente das propriedades acústicas das madeiras utilizadas na construção do corpo do instrumento, especialmente do tampo harmônico (Bucur, 2017). Em detrimento à grande diversidade de espécies de madeiras existentes no mundo, poucas são utilizadas para esse componente, em virtude de suas características acústicas. Para que seja considerada “acústica”, é necessário que a madeira detenha certas características, tais como: alta relação entre módulo de elasticidade e densidade e alta eficiência na conversão acústica (Bucur, 2017; Bremaud, 2012; Yoshikawa, 2007). Algumas espécies apresentam essas características; no ocidente, destacam-se as espécies de coníferas do gênero *Picea* e no oriente folhosas do gênero *Paulownia* (Gurau et al. 2023).

A espécie Abeto (*Picea abies*) é uma conífera pertencente à família Pinaceae (Cabalová et al, 2021). É nativa da Europa central, tendo ocorrência em toda a região boreal e subalpina, com plantações extensivas em outras regiões temperadas da Europa (Caudullo et al., 2016). Sua madeira tem coloração branco-creme e densidade variável, de aproximadamente 0,381 a 0,446 g/m³, dependendo da qualidade da madeira e idade da árvore (Dinilica et al., 2021). Muito utilizada para construção civil e produção de celulose, é também comumente aplicada para a construção de instrumentos musicais, especialmente para o tampo harmônico de violinos; porém, a crescente demanda por madeira de alta qualidade para essa aplicação, combinada com a suscetibilidade da espécie a fatores como mudanças climáticas e pragas, representa uma problemática crescente quanto à sua disponibilidade (Caudullo et al., 2016).

A espécie Kiri (*Paulownia tomentosa*) é uma folhosa pertencente à família Paulowniaceae (Barbu et al, 2021; Jakubowski, 2022). É nativa da Ásia, com cultivo abrangendo diversas regiões temperadas do mundo, incluindo a Europa (Jakubowski, 2022).

A madeira de *Paulownia tomentosa* apresenta coloração amarelo-claro a vermelho-claro (Jakuboswski, 2022), densidade baixa, com valores que podem variar de aproximadamente 0,250 a 0,460 g/cm³, a depender de variáveis de condições de cultivo e idade da árvore (Barbu et al, 2021; Jakuboswski, 2022). Muito utilizada para construção civil, produção de celulose, biocombustíveis e embalagens, a madeira de *Paulownia tomentosa* também é aplicada na fabricação de instrumentos musicais, especialmente para o tampo harmônico (Jakuboswski, 2022).

No contexto brasileiro, apesar da grande variedade de espécies nativas, poucas são destinadas à construção de tampos harmônicos. Em pesquisa de mercado com luthiers brasileiros, verificou-se que espécies como *Cedrela odorata* e *Simarouba amara* são difundidas.

A espécie Cedro rosa (*Cedrela odorata*) é uma folhosa pertencente à família Meliaceae, são nativas da região Neotropical e ocorrem amplamente na região amazônica e em mata atlântica. Sua madeira, tem coloração castanho-avermelhada, apresenta densidade que varia de baixa à média, com valores relatados entre 0,340 g/cm³ e 0,510 g/cm³, conforme idade da árvore, espécie e condições ambientais. A espécie *Cedrela odorata* (cedro rosa) é muito utilizada na produção de móveis, e instrumentos musicais (Fernandes et al., 2018; Bremaud, 2012). Suas propriedades acústicas contribuem para a qualidade sonora de instrumentos musicais (Bremaud, 2012). No entanto, o baixo nível de exploração sustentável dessa espécie e a falta de desenvolvimento de práticas de manejo adequadas limitam o conhecimento sobre o potencial uso da madeira de cedro-rosa para fins acústicos.

A espécie Marupá (*Simarouba amara*) é uma folhosa pertencente à família Simaroubaceae. É nativa da América central até a região sudeste do Brasil (regiões norte, nordeste, centro-oeste e sudeste) (Santos, 2019). Sua madeira tem coloração clara e densidade aproximada de 0,400 g/cm³ (Souza et al., 2020). Muito utilizada para a fabricação de móveis, é também comumente aplicada na construção de instrumentos musicais, especialmente para o tempo harmônico, devido à sua leveza e resistência mecânica moderada (Souza et al., 2020).

A maioria do material para finalidade acústica é oriundo de regiões temperadas, chegando ao Brasil à preços elevados em virtude de toda cadeia logística de importação ou restrições ambientais. Essa pesquisa corrobora para preencher essa lacuna ao investigar técnicas que potencializam a qualidade de espécies nativas. Como alternativa, a técnica de modificação térmica proporciona características desejáveis às madeiras tropicais, os ganhos são percebidos

especialmente por melhorias nas propriedades físico-químicas, acústicas e mecânicas (Roohnia, 2016).

O tratamento térmico consiste no aquecimento da madeira com a intenção de resultar em modificações químico-físicas que alterem as propriedades do material, tornando-o mais adequado para certas finalidades, sendo útil para aplicação em partes de instrumentos musicais, elementos estruturais de construção civil e construção de móveis (Roohnia, 2016). Em termos gerais é resultado da exposição da madeira a altas temperaturas, gerando mudanças na cor e nos componentes químicos do material. Suas principais variáveis de controle são a taxa de aquecimento, temperatura de tratamento, duração da exposição, composição da atmosfera e conteúdo de umidade na madeira (Liu, Xin You et al., 2017).

A melhoria acústica do material é oriunda especialmente das modificações químicas que ocorrem durante o processo de tratamento térmico. Após o aquecimento, há degradação dos componentes químicos da madeira, redução no teor de umidade de equilíbrio da madeira, e consequente redução na densidade do material. Essas alterações proporcionam ganhos acústicos à madeira, tais como: aumento da velocidade de propagação do som, incremento na rigidez do material e na eficiência da conversão das ondas mecânicas em som (Liu et al. 2017; Gurau et al., 2023).

Outras características importantes das madeiras utilizadas para construção de instrumento musical são a estabilidade dimensional da madeira, que afeta o dimensionamento e qualidade dos instrumentos e a questão estética associada ao padrão de cor e desenho da madeira que influencia a aderência do público a uma madeira ou outra (Roohnia, 2016).

Diante das possíveis alterações nas propriedades da madeira, busca-se com essa pesquisa avaliar o efeito da modificação térmica nas propriedades físicas, mecânicas, acústicas e químicas de madeiras utilizadas para tampos harmônicos de instrumentos musicais.

2. OBJETIVO GERAL

Esse trabalho teve como objetivo verificar o efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas, acústicas, mecânicas, químicas e estéticas das madeiras de Abeto europeu (*Picea abies L.*), Kiri japonês (*Paulownia tomentosa*), Marupá (*Simarouba amara*) e Cedro Rosa (*Cedrela Odorata*).

2.1 Objetivos Específicos

Determinar as propriedades acústicas (frequência natural, ECA, decaimento, módulo de elasticidade dinâmica (Edin), densidade aparente (Da) e a razão do módulo de elasticidade dinâmica pela densidade (Edin/Da)) das madeiras

Determinar as propriedades físicas (perda de massa, densidades, umidade de equilíbrio e propriedades anisotrópicas) das madeiras; Determinar as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade dinâmico e módulo relativo) das antes e após o tratamento térmico;

Determinar as propriedades colorimétricas (variáveis colorimétricas L, a* e b*) das madeiras antes e após o tratamento térmico;

Determinar as propriedades químicas (Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) das madeiras antes e após o tratamento térmico.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Madeiras utilizadas para construção de instrumentos de corda

A madeira é um material de natureza orgânica, heterogênea, anisotrópica e higroscópica, composto por diferentes formações celulares com funções específicas de transporte, sustentação e armazenamento de energia. A complexidade formativa desse material o confere propriedades características às espécies que o dão origem e consequentemente afetando suas aplicações. (Richter, 2015).

Um dos materiais mais antigos utilizados pela sociedade é a madeira, que conforme suas propriedades e composição é destinada a uma finalidade adequada (Nevin e Sawicki, 2019). Seus usos vão desde ciclagem de nutrientes e queima de energia, usos finos que demandam o máximo de resistência mecânica do material, até fins que dependem de propriedades específicas, como a construção de instrumentos musicais (Bucur, 2017).

Uma grande diversidade de madeiras é utilizada para construção de instrumentos musicais. Isso se deve especialmente à destinação específica de madeiras à cada parte constituinte dos instrumentos (Liu et al., 2020). Devido à diversidade biológica, estrutural e à natureza orgânica da madeira, há distintas propriedades tecnológicas observadas nas diferentes madeiras, especialmente quando vistas à nível de espécie.

Tradicionalmente, se remete espécies à construção de instrumentos e partes específicas. Tampos harmônicos são tradicionalmente construídos em madeiras de coníferas do hemisfério norte, como abeto (*Picea spp.*), cedro canadense (*Thuya plicata*), Sequoia (*Sequoia spp.*). No

hemisfério sul, para tempos harmônicos, em regiões frias, utiliza-se alerce (*Fitzroya* spp.) e araucária (*Araucaria angustifolia*).

Em regiões onde não há ocorrência de coníferas, utilizam-se madeiras alternativas, leves e de cor pouco saturada (tonalidade de vermelho pouco intensa), como cedro rosa (*Cedrela* spp.), marupá (*Simarouba* spp.) e Kiri (*Paulownia* spp.) (Slooten e Souza, 1993). Como instrumentos são artefatos complexos, dependendo da parte do instrumento, a exigência em relação às propriedades mecânicas e acústicas é diferente, havendo demanda por qualidade de madeira compatível com a parte utilizada. Para fundo e laterais de instrumentos de cordas friccionadas por exemplo, há preferência por maples (*Acer* spp.) e faias (*Sycamore* spp.), enquanto para aqueles de cordas pulsadas há preferência por jacarandás (*Dalbergia* spp., *Machaerium* spp. e *Guibourtia* spp.). Já o pau-brasil (*Paubrasilia* spp.) é altamente valorizado na confecção de arcos de instrumentos de cordas devido ao seu baixíssimo amortecimento da onda e alta velocidade de propagação sonora (Pfriem, 2015).

Em grande parte, a origem das madeiras utilizadas para instrumentos musicais é ilegal (as espécies são protegidas pela Convenção para o Comércio Internacional de Espécies Ameaçadas – CITES). Espécies com potencial de exploração sustentável estão sendo estudadas como alternativas e inclusive há aumento em investimentos em tratamentos que melhorem as propriedades de madeiras menos visadas (por exemplo o tratamento térmico) (Pfriem, 2015).

3.2 Tratamento Térmico

Uma grande preocupação de construtores e manufaturas de instrumentos musicais é a redução de características negativas da madeira, como alta higroscopidez e atenuação da onda acústica (PFRIEM, 2015). Processos que melhorem os aspectos indesejáveis da madeira já são investigados há milhares de anos (BUCUR, 2017, RICHER, 2015, PFRIEM, 2015).

Apesar de ser um material heterogêneo, por sua natureza orgânica, é possível alterar e estabilizar as propriedades da madeira através de tratamentos térmicos. Há uma amplitude de tratamentos possíveis; no entanto, tratamentos que têm como variáveis condicionáveis a temperatura, teor de umidade e tempo são considerados ecologicamente sustentáveis (Karami et al., 2020).

Tratamentos térmicos melhoram as propriedades físicas e mecânicas da madeira. No sentido físico, o aumento da estabilidade dimensional e a redução da higroscopidez são as

principais melhorias obtidas e no sentido mecânico, aumento da rigidez do material, assim como da rigidez em relação à densidade (Karami et al., 2020).

O tratamento térmico da madeira é um processo de modificação físico-química realizado por meio da exposição controlada do material a temperaturas elevadas, com o objetivo de alterar suas propriedades estruturais, físicas e funcionais. Esta técnica, simula os efeitos do envelhecimento natural prolongado, conferindo à madeira características desejáveis como maior estabilidade dimensional, redução da higroscopicidade, e melhora das propriedades acústicas (Ali et al., 2021). O processo de modificação é baseado na degradação térmica parcial dos principais componentes poliméricos da madeira, especialmente hemiceluloses e, em menor grau, celulose e lignina, promovendo redução no número de grupos hidroxila disponíveis para ligação com a água. As principais variáveis que interferem nesse processo são a temperatura efetiva de tratamento (geralmente entre 135 °C e 260 °C), o tempo de exposição, a taxa de aquecimento e resfriamento, a atmosfera do ambiente de tratamento. Os resultados são analisados por alteração na cor, perda de massa, modificação na densidade, rigidez e comportamento vibracional da madeira, quando pensada para viés acústico (DANIHELOVÁ et al., 2022).

Diversos estudos investigam as técnicas de tratamento térmico visando melhoria em propriedades físicas, acústicas e mecânicas para instrumentos musicais. Pfriem (2015) afirma que tratamentos térmicos têm a capacidade de melhorar a responsividade acústica da madeira em características mensuráveis de velocidade do som, módulo de elasticidade dinâmico e atenuação acústica. As melhorias do material não se restringem às propriedades acústicas, mas também se estendem à estabilidade dimensional e à redução na interação com a água.

Dentre os fatores que interferem no tempo de tratamento destacam-se a temperatura de tratamento e as dimensões dos corpos de prova. Diversos estudos dividem o tempo de tratamento em três ou mais etapas, sendo a primeira etapa de aquecimento inicial até 100°C, com a finalidade de secar lentamente o material e reduzir defeitos decorrentes de uma secagem abrupta; uma segunda etapa onde se aquece até a temperatura de tratamento desejada, transitando de uma etapa de secagem para uma de tratamento térmico efetivo; e uma terceira de resfriamento, evitando mudança de temperatura abrupta e consequentes defeitos por tensionamentos na madeira. (Todaro et al., 2020)

3.3 Propriedades da madeira afetadas pelo tratamento térmico

As principais variáveis avaliadas para verificar o efeito do tratamento térmico nas madeiras são físicas, acústicas, mecânicas, químicas e colorimétricas (KARAMI et al, 2020).

Gall et al (2020) sugerem que tratamentos térmicos têm efeito tanto em propriedades físicas quanto em propriedades mecânicas, como resultado de modificações que ocorrem em componentes químicos da madeira como lignina, celulose e hemicelulose. Naturalmente, em processos de envelhecimento natural, essas modificações ocorrem como lentamente na presença de vibrações, no entanto podem ser provocadas por envelhecimento artificial, gerando ganhos acústicos de interesse para instrumentos musicais de cordas.

A modificação térmica induz alterações significativas nas propriedades físicas e acústicas da madeira, impactando diretamente sua performance acústica. A exposição controlada ao calor aumenta a velocidade de propagação sonora nas direções longitudinal e radial, o que está relacionado à rigidez e ao módulo de elasticidade dinâmico da madeira. Essas alterações são mais pronunciadas em madeiras classificadas como de alta qualidade (classe A), possivelmente devido à sua estrutura anatômica mais homogênea e à menor densidade inicial. Espera-se a redução da quantidade e variabilidade de microporos, promovendo maior estabilidade dimensional, fator relevante para construção de instrumentos musicais, especialmente em madeiras como o abeto, tradicionalmente empregadas em tampos harmônicos. (GURAU et al, 2023)

Song et al (2023) afirmam que apesar de ganhos em estabilidade dimensional no material, não é recomendado que se trabalhe com grande número de ciclos de secagem, tratamentos térmicos e umidificação, pois há prejuízo na integridade física do material, especialmente nas madeiras macias (softwoods).

Para verificar o efeito nas propriedades acústicas são avaliadas alterações na frequência de ressonância (Fr) e na atenuação acústica ou decaimento logarítmico da onda (DL). Uma razão entre diferentes variáveis acústicas e mecânicas da madeira comumente utilizada para sintetizar a melhoria ou piora ocorrida no material é o índice de eficiência na conversão acústica (ECA) (ROOHNIA, 2016).

A principal variável mecânica de interesse mensurada é o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{din}). Alguns estudos se utilizam também da razão entre módulo de elasticidade dinâmico e densidade para sugerir a aplicabilidade da madeira para cada parte do instrumento. Uma relação maior, indica um material de maior qualidade acústica para instrumentos musicais (BREMAUD, 2012)

A modificação térmica induz alterações significativas nas propriedades químicas. O tratamento térmico, isoladamente ou conjugado a outros tratamentos, provoca alterações químicas, especialmente na degradação da lignina e na oxidação de seus produtos de degradação. As principais alterações químicas podem ser observadas pela técnica de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), através da redução das bandas características da lignina ($1504\text{--}1507\text{ cm}^{-1}$) e aumento na intensidade das bandas associadas a grupos carbonílicos não conjugados (1730 cm^{-1}), indicando processos oxidativos (GURAU et al, 2023). A magnitude dessas mudanças é mais acentuada em madeiras do tipo softwood (macias), que apresentam maior formação de cromóforos com grupos carbonílicos, correlacionando-se com alterações de cor mais intensas. Essas transformações químicas, ao afetar a matriz polimérica da madeira, influenciam diretamente sua resposta vibracional e estabilidade ao longo do tempo (GURAU et al, 2023).

A modificação térmica induz alterações significativas nos parâmetros estéticos, principalmente as variáveis colorimétricas. As variações que permitem identificação da cor de forma quantitativa são observadas nos componentes de luminosidade (L^*), de vermelho-verde (a^*) e azul-amarelo (b^*).

As modificações mais intensas em cor são observadas em madeiras expostas ao calor e à luz ultravioleta. Lopes et al (2014) observaram resultados de modificação em cor de madeira de teca tanto em cerne quanto em alburno, quando tratada à 180 e 200°C por 5h. Já Gurau et al (2023) observaram também modificação de cor em madeira de Maple e abeto expostas à 50°C e luz ultravioleta por 360h. A alteração de cor acontece quando há modificação química de grupos cromóforos, determinantes na coloração da madeira (LOPES et al, 2014). Madeiras claras, tem baixo teor de extractivos e baixa frequência na formação de grupos cromóforos, sugerindo menor grau de modificação na cor desse tipo de madeira. Gall et al (2022) sugere que a modificação de cor é a principal manifestação da degradação da madeira, seguida da redução nas propriedades físicas da madeira (GALL et al, 2022).

A modificação em termos de cor tem como principal efeito observado a redução da luminosidade. Song et al (2023) observaram após tratamentos cíclicos com umidificação e secagem, um aumento das tonalidades escuras na madeira após tratamento, justificado pela degradação da lignina e pela formação de cromóforos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Aquisição, desdobro e confecção dos corpos de prova

As madeiras nativas de *Cedrela odorata*, *Simarouba amara* e *Paulownia sp.* foram adquiridas no comércio local em forma de pranchas de radiais e tangenciais. A madeira de *Picea abies* foi obtida através de importadora especializada em pranchetas de 50 cm x 12 cm x 2,5 cm.

Para o estudo foi necessário produção de amostras ortogonais, tanto para o estudo acústico por vibração do material como para o estudo na anisotropia da madeira. Sarrafos radiais foram cortados com 25 mm de espessura, largura acima de 70mm e 500 mm de comprimento (Figura 1-a).

Para o estudo acústicos foram produzidas amostras (réguas) ortogonais, com 9 mm de espessura e 500 mm de comprimento.

As réguas, para estudo acústico e mecânicos, foram desengrossadas e redimensionadas com dimensões finais de 300 mm x 30 mm x 7 mm. Posteriormente os sarrafos foram cortados em bloco com 50 mm x 30 mm x 20 mm (Figura 1-b), utilizados para determinação de propriedades físicas anisotrópicas.

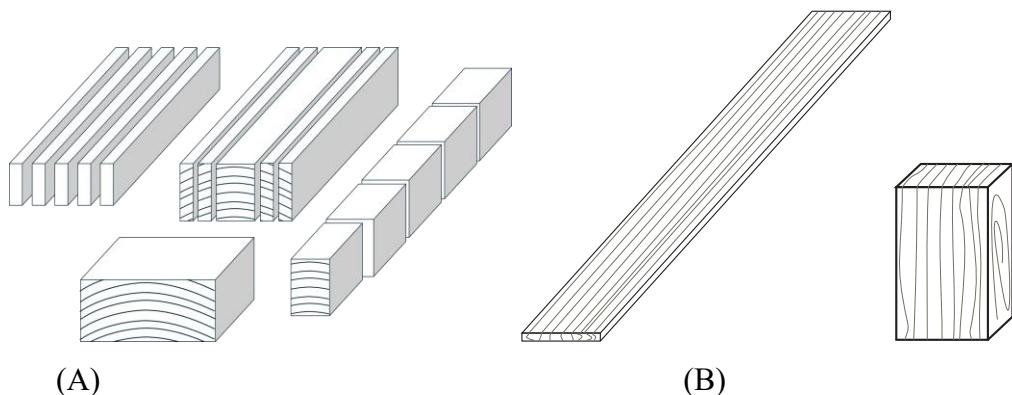


Figura 1a e 1b. Desdobra do material de peças radiais em blocos e réguas (A). Réguas para aferição de frequência (esquerda) e blocos para determinação de propriedades físicas (direita) (B). (Fonte: O autor).

Os cortes foram realizados com serra circular, paralelamente aos anéis de crescimento, garantindo a melhor radialidade. O nivelamento das faces, para uniformidade da espessura, foi realizado utilizando-se plaina desengrossadeira do modelo Makita NB-2012 e posteriormente lixadeira do tipo *drumsander*.

4.2. Escopo do Experimento

As Figuras a seguir dispõem a descrição das etapas do experimento, conforme o formato do corpo de prova, a saber régua (Figura 2) e bloco (Figura 3).

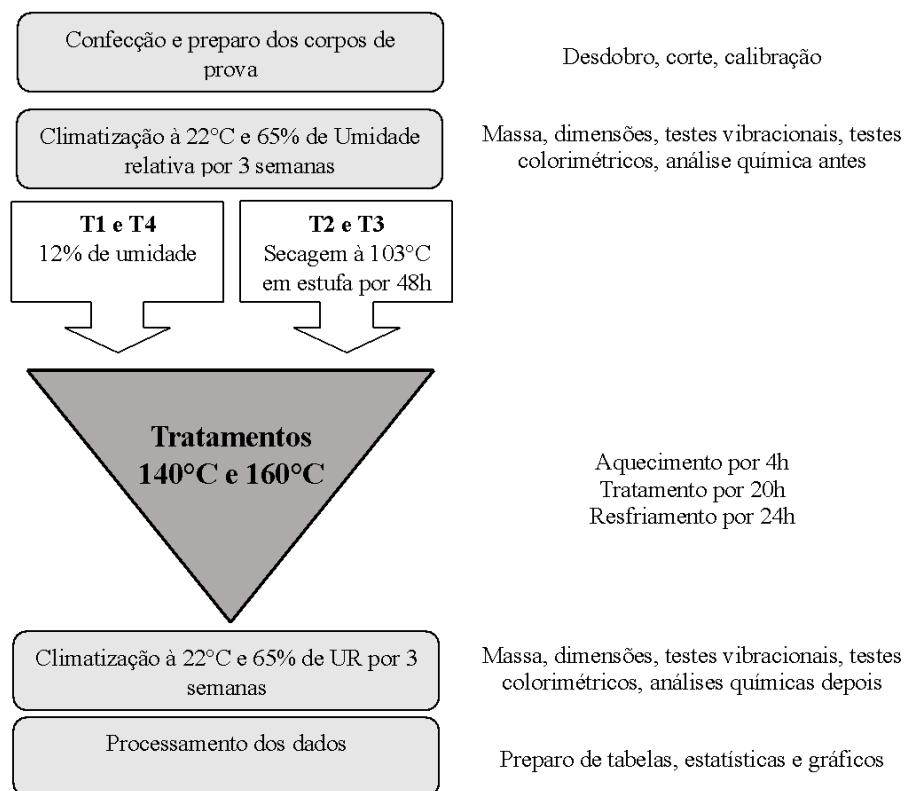


Figura 2. Diferentes etapas do experimento aplicadas às réguas das madeiras de Abeto europeu (*Picea abies L.*), Kiri japonês (*Paulownia tomentosa*), Marupá (*Simarouba amara*) e Cedro Rosa (*Cedrela Odorata*)

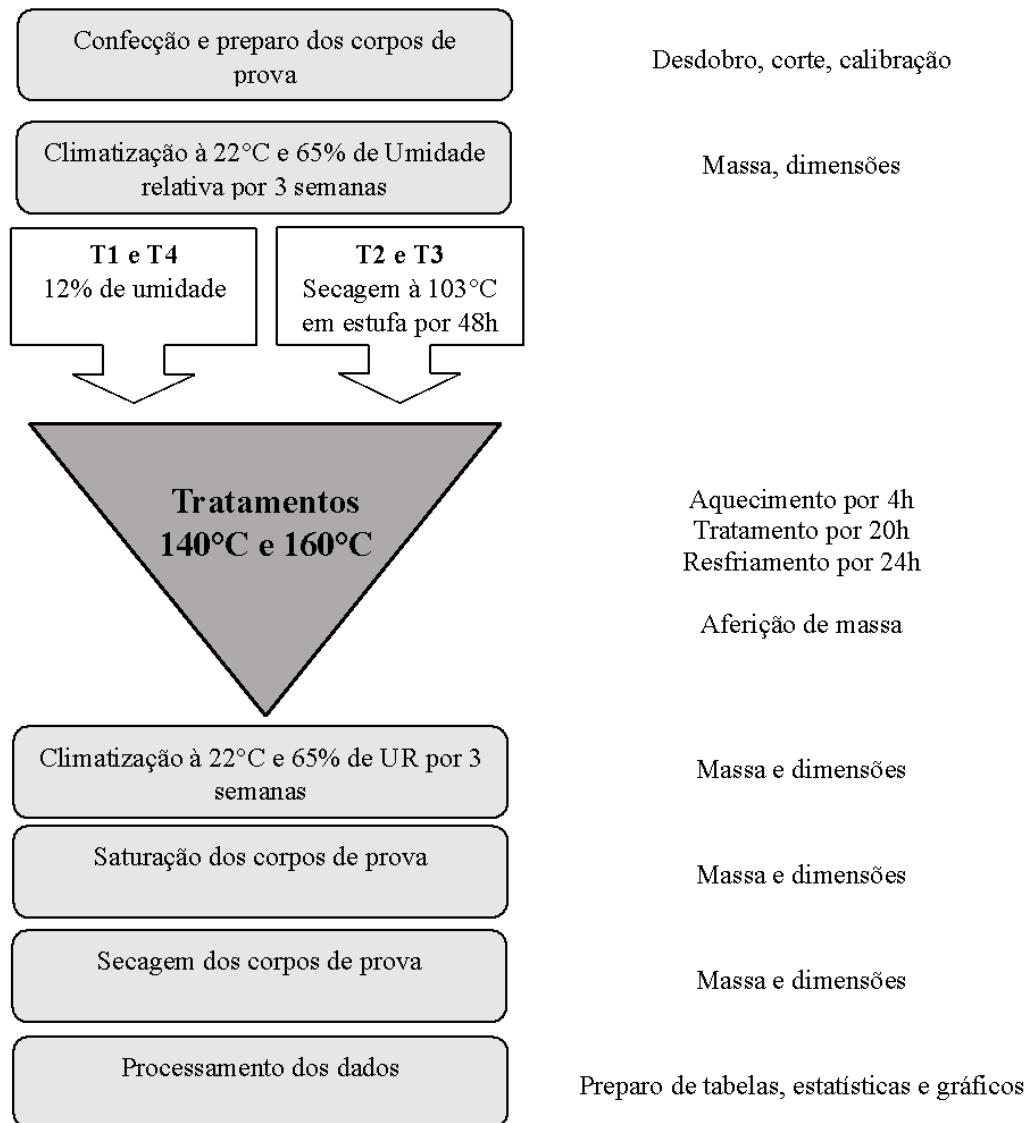


Figura 3. Diferentes etapas do experimento aplicadas aos blocos das madeiras de Abeto europeu (*Picea abies L.*), Kiri japonês (*Paulownia tormentosa*), Marupá (*Simarouba amara*) e Cedro Rosa (*Cedrela Odorata*).

4.3 Climatização e Umidade Do Material

Foi determinado o teor de umidade inicial do material após aquisição comercial, antes da produção dos corpos de prova, sendo aferido com uso do equipamento medidor de umidade AKSO modelo AK840.

Após determinação da umidade inicial das madeiras, os corpos de prova foram acondicionados em ambiente com umidade relativa média de 65% e temperatura média de 22°C, até a massa constante resultando em teor de umidade de equilíbrio de 12%, aproximadamente.

4.4 Tratamento Térmico Das Madeiras

O tratamento foi realizado em estufa a vácuo com amostras em forma de régua travadas por prensas metálicas (Figura 4) e blocos como mostra a Figura 1b. O experimento testou dois níveis de temperaturas e dois níveis de umidade iniciais da madeira, a saber: 140°C e 160°C e umidade próximo de 0% e 12%.

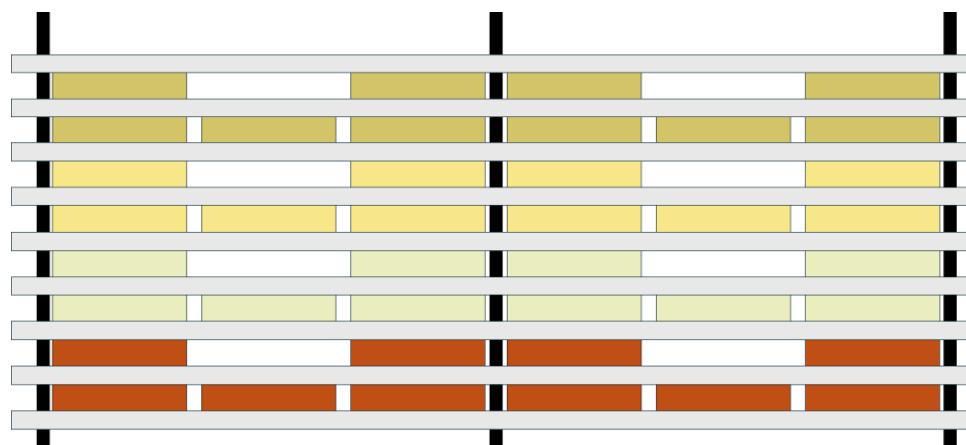


Figura 4. Desenho esquemático da prensa metálica para tratamento térmico com corpos de prova em forma de régua. Onde cinza representa os tabiques metálicos em visão lateral, preto indica os parafusos de aço e as demais cores indicam as réguas em visão frontal.

4.5 Determinação Do Teor De Umidade

O teor de umidade foi determinado, por diferença de massa usando estufa com circulação forçada na temperatura de 103°C+/- 2°C até obter massa constante, tanto para as madeiras que não foram tratadas termicamente assim como para aquelas tratadas nas condições

estabelecidas, após massa constante em ambiente controlado. Foi utilizado a equação abaixo: após climatização da madeira em ambiente controlado,

$$Tue = \frac{M_{tue} - M_{se}}{M_{se}} \times 100$$

Equação 1.

Em que: M_{tue} é a massa da madeira tratada e não tratada após climatização e M_{se} é a massa seca em estufa após massa constante.

4.6 Determinação da Densidade Aparente

A grandeza densidade aparente (g/cm^3) é a razão entre massa e volume de uma amostra obtida num mesmo teor de umidade na.

$$Da(\%) = \frac{M_n}{V_n} \times 100\%$$

Equação 2.

Onde M_n (g) representa a massa de uma amostra qualquer “n”, V_n representa o volume da mesma amostra “n” obtido em um mesmo teor de umidade.

4.7 Determinação da Perda De Massa

Percentual de perda de massa (Mpm), é uma medida que representa o quanto de massa em gramas (g) foi perdida por uma amostra após um tratamento em relação à sua massa inicial, em gramas (g), seca em estufa.

$$Mpm = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100\%$$

Equação 3.

Em que: M_0 (g) representa a massa da amostra após secagem em estufa antes do tratamento, e M_t (g) representa a massa da amostra após o tratamento.

4.8 Propriedades Físicas – Inchamento

Para obtenção do inchamento, as amostras foram saturadas em água por imersão usando dessecador acoplado à bomba de vácuo. Foram realizados três ciclos de vácuo por 15 minutos e manutenção das amostras imersas até que se obtivesse massa constante. A estabilização das massas ocorreu entre 7 e 10 dias após o início do processo. Medidas das dimensões e de massa foram feitas para condição de equilíbrio ao ar, após saturada e após-seca em estufa. Para obtenção das massas e dimensões mínimas, o material foi seco em estufa elétrica a 103°C (+/- 2°C) até massa constante.

Para o teste de inchamento, foram calculadas as seguintes informações:

4.8.1 Inchamento linear máximo tangencial

$$\alpha_T = \left(\frac{T_{saturado} - T_0}{T_{Saturado}} \right) * 100$$

Equação 4.

4.8.2 Inchamento linear máximo radial

$$\alpha_R = \left(\frac{R_{saturado} - R_0}{R_{Saturado}} \right) * 100$$

Equação 5.

4.8.3 Inchamento linear máximo longitudinal

$$\alpha_L = \left(\frac{L_{saturado} - L_0}{L_{Saturado}} \right) * 100$$

Equação 6.

4.8.4 Coeficiente de anisotropia de Inchamento

$$Ca_\alpha = \left(\frac{\alpha_T}{\alpha_R} \right) * 100$$

Equação 7.

4.9 Determinação das propriedades Colorimétricas

4.9.1 Coordenadas do sistema CIE L*a*b*

O sistema CIE L*a*b*, o qual trabalha de acordo com a norma da Commission Internationale de L'Eclairage - CIE (1976) é composto por três coordenadas: L* representando a luminosidade ou claridade no eixo preto-branco, a* e b* representando as coordenadas cromáticas nos eixos verde-vermelho e azul-amarelo, respectivamente (Garcia et al, 2014).

Luminosidade (L*) - É a métrica relacionada a proporção de luminosidade, ou seja, vai do 0 (preto) a 100 (branco). Vermelho – Verde (a*) - Representa a variação cromática entre o verde (-60) e o vermelho (+60). Azul – Amarelo (b*) - Representa a variação entre tonalidades de azul (-60) e de amarelo (+60). A Figura 5 ilustra o sistema em uma composição de eixos englobados em uma esfera, onde é possível visualizar graficamente as componentes cromáticas assim como as métricas que expressam a cor.

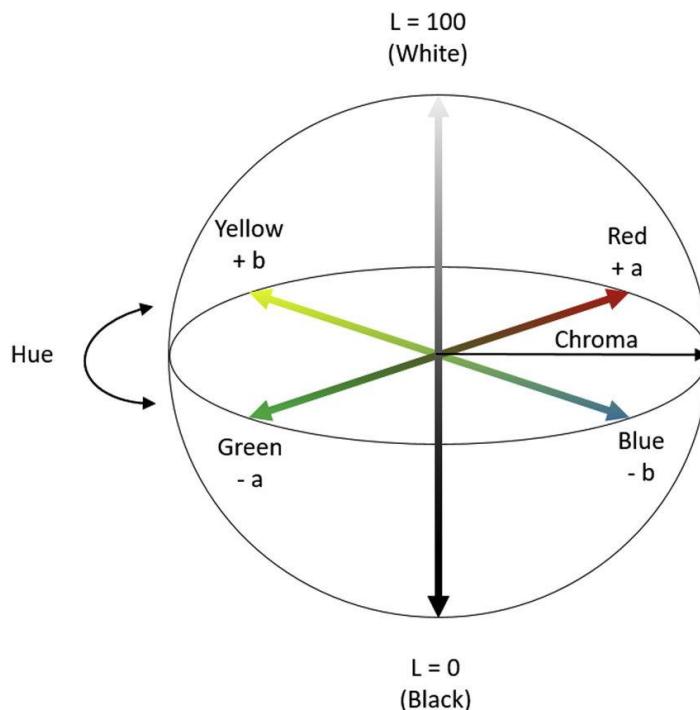


Figura 5. Ilustração gráfica do sistema de cores CIE L*a*b*. (Fonte: LY BAO CHAU et al, 2020)

O ângulo de tinta representa a tonalidade (ou matiz) da cor, sendo calculado a partir das coordenadas a^* e b^* , e indica se a cor tende mais para o vermelho, amarelo, verde ou azul no espaço cromático.

A saturação, expressa pela chroma (C^*), representa a intensidade ou pureza da cor, calculada com base nas coordenadas a^* e b^* , refletindo o quanto a cor se afasta do centro acromático (sem cor).

A variação total de cor é uma métrica que consolida em uma única medida a variação ocorrida na luminosidade e nas pigmentações presentes na madeira, expressa pelo vetor formado pela variação do ponto inicial ao novo ponto obtido após o tratamento.

4.9.2 Pontos de coleta de cor

A análise de cor foi realizada por determinação de coordenadas pelo sistema CIE L*a*b*, conforme Garcia e Marinonio (2016), onde foi adotada a norma ISO 11.664-4:2008 (ISO, 2008) e o equipamento utilizado foi o colorímetro portátil Konica Minolta do modelo CM 2600d.

As coletas das coordenadas foram sistematizadas na face radial das amostras, com leituras em 6 pontos, sendo realizadas repetições de coleta em cada ponto (Figura 6).

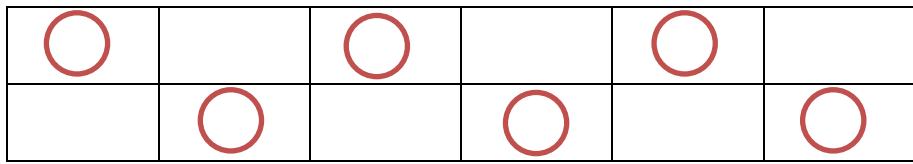


Figura 6. Disposição dos pontos de medição nos corpos de prova em forma de régua.

Para captura das coordenadas de cor, as superfícies das amostras foram raspadas com lâmina de aço removendo a camada superficial oxidada e posteriormente foram submetidas a lixamento com lixas com granulometria 150 e 220.

4.9.3 Saturação e Ângulo de tinta

Saturação (C)

$$C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad \text{Equação 8.}$$

Ângulo de tinta (h^*)

$$h^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad \text{Equação 9.}$$

Variações de cor (Δ)

$$\Delta L = L^*_{NT} - L^*_{T} \quad \text{Equação 10a.}$$

$$\Delta a = a^*_{NT} - a^*_{T} \quad \text{Equação 10b.}$$

$$\Delta b = b^*_{NT} - b^*_{T} \quad \text{Equação 10c.}$$

Variação total de cor (ΔE)

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{Equação 11.}$$

4.9.4 Determinação das propriedades acústicas

4.9.4.1 Frequência de ressonância e decaimento logarítmico

Para obtenção da frequência natural ou de ressonância e do decaimento logarítmico, foi usado o método de vibração transversal e para tal, um impacto é aplicado nas amostras, segundo a Figura 7. As vibrações geradas por impacto no centro das amostras são captadas por um microfone fixado na mesma direção do impacto, e que por meio de software Fast Fourier Analyzer – FFT Analyzer são transformadas em frequências, pela transformada rápida de Fourier. O pico espectral oriundo da transformação corresponde à frequência de ressonância do objeto ensaiado.

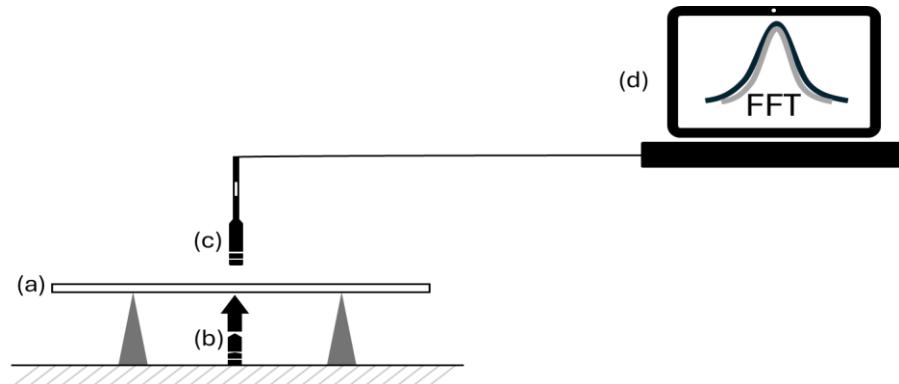


Figura 7. Método vibracional de barras livres: (a) Corpo de prova suspenso à 0,224 de suas extremidades; (b) Impacto gerado ao centro da amostra; (c) Microfone que capta o sinal gerado pelo impacto; (d) Computador com software FFT analyzer que recebe o sinal, apresenta a frequência de ressonância e decaimento logarítmico da onda.

4.9.5 Eficiência de conversão acústica (ECA)

$$ECA = \pi \sqrt{\frac{E_{din}}{\rho^3 dl}} \quad \text{Equação 14.}$$

Onde, dl = é o decaimento logarítmico da onda; ρ = densidade da madeira; E_{din} = módulo de elasticidade dinâmico.

4.9.6 Determinação das propriedades mecânicas

4.9.7 Módulo de elasticidade dinâmico e módulo relativo

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi realizada através da equação descrita segundo a norma ASTM E - 1876 (2007):

$$E_{din} = 0,9465 \left(\frac{\rho L^4 f_1^2}{h^2} \right) \quad \text{equação 12.}$$

Onde, f_n = é a frequência de ressonância na vibração transversal; ρ = densidade da madeira; L = comprimento da amostra; f = frequência de ressonância; h = espessura da madeira.

O módulo relativo é o módulo de elasticidade dinâmico da amostra, dividido por sua densidade aparente, à saber:

$$E_{esp} = E_{din} / Da \quad \text{Equação 13.}$$

4.10 Determinação das propriedades químicas

A análise química foi realizada nos melhores tratamentos, tomando por base os resultados obtidos nas propriedades acústicas e nas propriedades físicas. Foi realizada análise qualitativa por **espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier FTIR**.

Para a análise de espectroscopia FTIR foram utilizadas as madeiras das espécies de Abeto europeu (*Picea abies L.*), Kiri japonês (*Paulownia tomentosa*), Marupá (*Simarouba amara*) e Cedro Rosa (*Cedrela Odorata*) antes e após o tratamento térmico . Os espectros foram registrados em um espectrômetro BRUKER modelo VERTEX 70, software OPUS Versão 6.5, utilizando o modo experimental de Refletância Total Atenuada (ATR) utilizando 4 cm⁻¹ de resolução e amplitude espectral entre 4000-400 cm⁻¹. As análises foram feitas na Central Analítica, do Instituto de Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

4.11 Análise Estatística

Dos dados obtidos foram verificados a homogeneidade das variâncias e a normalidade dos resíduos, respectivamente por Brown-Forsyth e Kolmogorov-Smirnov . Caso as variáveis obtidas atendessem os pressupostos da análise paramétrica, a análise de variância fatorial foi aplicada, testando os fatores temperatura de tratamento e teor de umidade da madeira de tratamento. Não ocorrendo atendimento dos pressupostos, os dados foram analisados no campo da estatística não-paramétrica e foram utilizados a análise de boxplot juntamente com teste de Kruskal-Wallis. Quando necessário teste de média, foi utilizado teste de Tukey. Todos os testes e análises foram feitos ao nível de 5% de significância.

4.12 Delineamento experimental

A Tabela 1 representa o delineamento experimental, com as temperaturas de tratamento e os teores de umidade das madeiras usados antes de entrarem na estufa à vácuo, e o material destinado ao controle.

Tabela 1. Delineamento Fatorial do experimento por espécie, temperatura de tratamento e teor de umidade dos corpos de prova

Espécies	Temperatura de tratamento (°C) e Teor de umidade das amostras (%)				Control e	
	160 °C		140 °C			
	12%	0%	0%	12%		
Kiri (<i>Paulownia tomentosa</i>)	T1	T2	T3	T4	T5	
Abeto (<i>Picea abies</i>)	T1	T2	T3	T4	T5	

Cedro rosa (<i>Cedrela odorata</i>)	T1	T2	T3	T4	T5
Marupá (<i>Simarouba amara</i>)	T1	T2	T3	T4	T5

O delineamento foi realizado considerando os fatores espécie, temperatura de tratamento e teor de umidade de entrada no tratamento (Tabela 1).

5. RESULTADOS

Os resultados estão apresentados divididos por espécie, em três sessões, à saber: Propriedades mecânicas, Propriedades acústicas, Propriedades físicas, Propriedades colorimétricas, e Propriedades químicas. Antes, estão apresentados os teores de umidade de equilíbrio obtidos para o material antes de climatização (Tabela 2).

Tabela 2. Teor de umidade inicial das madeiras de Cedro, Marupá, Kiri e Abeto após desdobra em corpos de prova.

Madeira	Teor de Umidade
Cedro	13,45%
Marupá	10,81%
Kiri	9,44%
Abeto	11,10%

5.1 Cedro Rosa (*Cedrela odorata*)

Das variáveis testadas, aquelas que foram analisadas por análise de variância fatorial, com interação foram: Densidade aparente (Da), Decaimento logarítmico (Dl), eficiência na conversão acústica (ECA), módulo de elasticidade dinâmico (Edin) e módulo de elasticidade relativa (Edin/Da).

As demais variáveis, umidade de equilíbrio e Frequência de ressonância, foram analisadas no campo não paramétrico, a saber: boxplot com Kruskal-Wallis.

5.1.1 Propriedades mecânicas e acústicas

A Tabela 3 apresenta os resultados das propriedades mecânicas e acústicas para a madeira de Cedro rosa (*Cedrela odorata*).

Tabela 3. Propriedades acústicas e mecânicas da madeira cedro rosa (*Cedrela odorata*) em função das temperaturas de tratamento e teores de umidade inicial de tratamento.

Teste	Umidade	Controle	140°C	160°C
Frequência Natural (Hz)	0%	-	367 ^{9a}	364 ^{21a}
	12%	363 ^{15a}	369 ^{17a}	366 ^{7a}
ECA	0%	-	1386 ^{156a}	1233 ^{192a}
	12%	1285 ^{188a}	1275 ^{192a}	1337 ^{117a}
Decaimento	0%	-	20,6 ^{1,98b}	22,8 ^{2,23a}
	12%	21,1 ^{2,30a}	22,0 ^{1,96ab}	22,2 ^{1,50ab}
Edin (kgf.cm ⁻²)	0%	-	119.353 ^{9.285ab}	119.782 ^{13.086ab}
	12%	121.558 ^{9.911a}	121.290 ^{10.407ab}	114.005 ^{6.762b}
D.a (g.cm ⁻³)	0%	-	0,528 ^{0,010b}	0,534 ^{0,02b}
	12%	0,552 ^{0,040a}	0,538 ^{0,030ab}	0,506 ^{0,02c}
Eesp (kgf.cm.g ⁻¹)	0%	-	225.839 ^{15.795a}	224.483 ^{24.653a}
	12%	220.273 ^{17.702a}	225.627 ^{20.644a}	225.293 ^{10.244a}

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas mostram diferenças estatística pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Números sobreescritos são os valores dos desvios-padrão.

Das variáveis estudadas pode-se verificar que os resultados não apresentaram diferenças significativas (Tabela 3 e na Figura 8), com exceção da densidade aparente, ou seja, as temperaturas de tratamento e os teores de umidade não afetaram as propriedades acústicas da madeira de Cedro (*Cedrela odorata*).

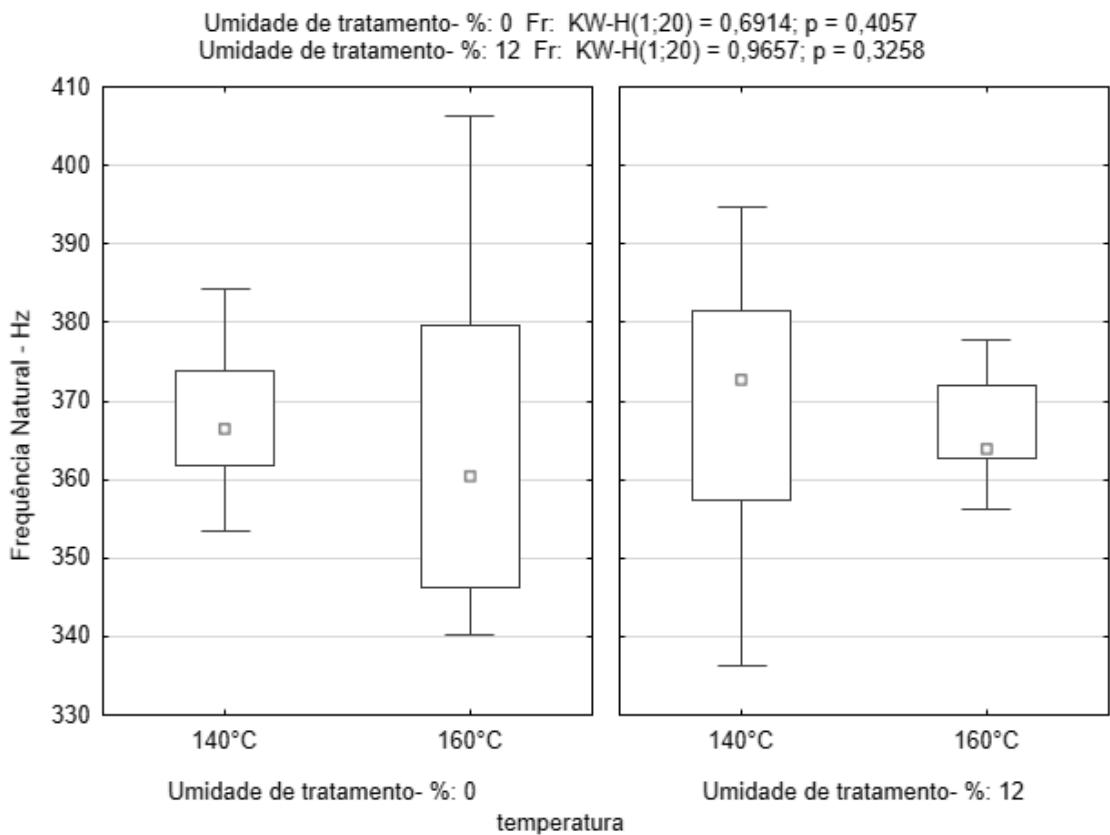


Figura 8. Boxplot apresentando as variações da variável Teor de umidade de equilíbrio (TUE) para madeira Cedro-rosa antes e depois dos tratamentos realizados, a saber 1: Temperatura de 160°C e UR = 12%, 2: Temperatura de 160°C e UR = 0%, 3: Temperatura de 140°C e UR = 0%, 4: Temperatura de 140°C e UR = 0%; 5: Controle. Com teste de K-W.

No caso da densidade, o material tratado à 160°C com teor de umidade de 12% apresentou menor densidade. O material tratado à 0% de teor de umidade também resultou em densidades menores que o controle.

Madeira de cedro rosa *Cedrela odorata* é largamente difundida para outras aplicações além do tampo em instrumentos musicais. Bennett (2016) relata o uso de madeira de cedro rosa para fundo, laterais e braço de violões.

A menor densidade da madeira tratada obtida neste trabalho 0,506 g/cm³ foi superior à apresentada por Bennett (2016), 0,470 g/cm³, assim como o menor módulo de elasticidade obtido para o mesmo material, tratado à 160°C e TU=12%, 114.000 kgf/cm² contra 92.000 kgf/cm³.

Em média, os tratamentos melhoraram ou mantiveram o módulo de elasticidade da madeira de cedro rosa e mesmo o menor valor obtido (114.000 kgf/cm²), correspondente ao material tratado à 160°C e TU=12%, preserva características mecânicas do material ao comparar com a caracterização obtida na literatura. Sotomayor et al (2020) utilizando também

método vibracional transversal, obteveram módulo de elasticidade de 113.000 kgf/cm², inferior aos materiais tratados (tabela 3).

O potencial da madeira de cedro rosa é observado também para a indústria moveleira. Souza et al (2020) em condições de climatização análogas às deste trabalho, fazem essa afirmação ao obter módulo de elasticidade de 82.000 kgf/cm² e densidade básica de 0,440 g/cm³.

A razão Eesp, ou módulo relativo, de todos os materiais tratados neste trabalho são superiores à razão resultante dos valores apresentados por Bennett (2016) (195.745 kgf.cm.g⁻¹) (Tabela 3). Todos os materiais tratados teriam ainda maior potencial de uso acústico, se comparados aos valores de referência (controle).

5.1.2 Propriedades físicas

5.1.2.1 Perda de massa, densidades, umidade de equilíbrio e propriedades anisotrópicas

Os resultados a seguir são advindos das amostras de madeira que tinham dimensões iniciais com 20x30x50 mm, aqueles destinados a estudos da variação dimensional. A perda de massa percentual oriunda dos quatro tratamentos executados para a madeira de Cedro rosa está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Perda de massa, densidade básica, densidade aparente e teor de umidade de equilíbrio da madeira Cedro rosa (*Cedrela odorata*) em função das temperaturas de tratamentos e teores de umidades iniciais.

Teste	Umidade	Controle	140°C		160°C				
Perda de Massa (%)	0%		0,43		1,41				
	12%		0,13		1,04				
Densidade aparente (g.cm ⁻³)	0%		0,533	0,024	a	0,535	0,033	a	
	12%	0,555	0,020	a	0,546	0,020	a	0,535	0,030
Densidade básica (g.cm ⁻³)	0%		0,447	0,015	a	0,446	0,013	a	
	12%	0,458	0,015	a	0,461	0,020	a	0,447	0,015
Umidade de Equilíbrio (%)	0%		9,4	[23,6]		9,0	[26,8]		
	12%	12,3	9,2	[25,2]		8,4	[31,7]		

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas mostram diferenças estatística pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Números sobreescritos são os valores dos desvios-padrão. Valores entre colchetes são diferenças percentuais em relação ao controle. T1 = 160°C e 12% de umidade; T2 = 160°C e 0% de umidade; T3 = 140°C e 0% de umidade; T4 = 140°C e 12% de umidade.

Dos tratamentos observados, aquele que provocou maior perda de massa foi na condição à 160°C e 0% de teor de umidade. Esse resultado era esperado devido à perda.

As variáveis densidade aparente e densidade básica não foram afetadas significativamente pelos tratamentos realizados. Também não foi observado efeito das variáveis temperatura e teor de umidade de entrada quando analisados isoladamente.

Os valores obtidos para densidade básica são equivalentes aos obtidos de densidade básica por Sotomayor et al (2020), que foram em média 0,473 g/cm³ (+/- 19,5%).

O teor de umidade de equilíbrio (Figura 9) obtido do material não tratado se diferenciou de todos os tratamentos realizados. O menor valor de teor de umidade de equilíbrio foi obtido à temperatura de 160°C no teor de umidade de 12% (Tabela 4).

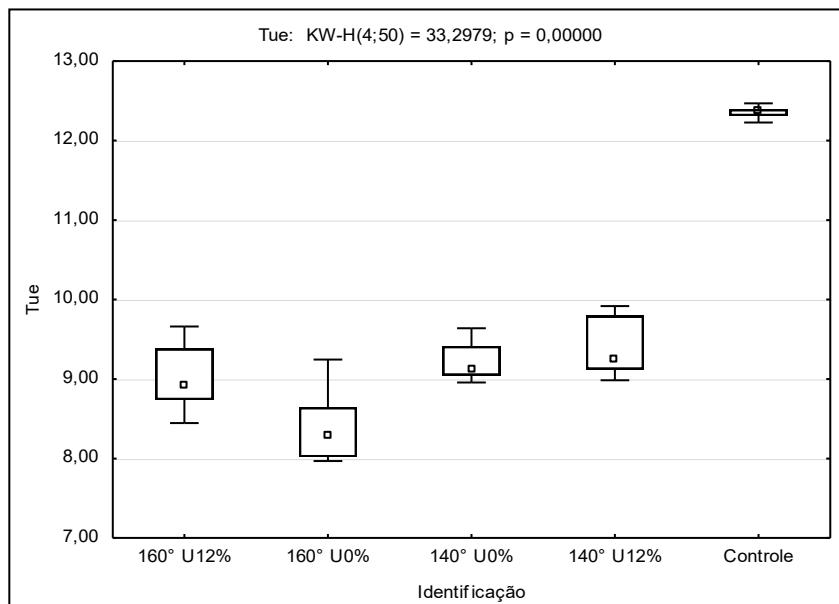


Figura 9. Boxplot apresentando as variações da variável Teor de umidade de equilíbrio (TUE) para madeira Cedro-rosa antes e depois dos tratamentos realizados, a saber 1: Temperatura de 160°C e UR = 12%, 2: Temperatura de 160°C e UR = 0%, 3: Temperatura de 140°C e UR = 0%, 4: Temperatura de 140°C e UR = 0%; 5: Controle. Com teste de K-W.

O inchamento tangencial obtido da madeira tratada anidra foi inferior ao observado na madeira tratada à 12% de teor de umidade. Foi observado também efeito da temperatura, obtendo-se menores valores de inchamento tangencial para madeira tratada à 160°C (Tabela 5).

Foi observado menor valor de inchamento radial para madeira tratada à 0% de teor de umidade, não foi observado efeito significativo dos demais fatores. O melhor resultado de inchamento radial e tangencial foi observado à 0% de teor de umidade à temperatura de 160°C, que apresentou valores inferiores ao controle e aos demais tratamentos (Tabela 5).

Tabela 5. Propriedades de inchamento tangencial (I Tang.) e inchamento radial (I Rad.) para madeira Cedro rosa (*Cedrela odorata*).

Temperatura	ITang.			IRad.		
	Tu=0%	Tu=12%	média	Tu=0%	Tu=12%	média
Controle	--	7,86 a 0,352			5,64 a 0,408	
140°C	8,07 ab 0,451	8,43 a 0,564	8,25 a	4,98 ab 0,464	5,36 a 0,415	5,17 a
160°C	7,56 b 0,220	8,03 ab 0,222	7,79 b	4,72 b 0,453	5,31 a 0,447	5,01 a
média	7,82 B	8,23 A		4,85 B	5,33 A	

Em que: letras minúsculas distintas mostram diferenças entre médias na mesma coluna e letras maiúsculas distintas, na mesma linha, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Em relação ao inchamento volumétrico, observa-se na Tabela 6, o efeito significativo dos fatores temperatura de 160°C e teor de umidade de 0%. O melhor tratamento foi o efeito conjugado dos fatores, diferenciando-se do material tratado à 12% de teor de umidade e do material não tratado. Foi observada equivalência entre os tratamentos realizados à temperatura de 0% de teor de umidade.

Tabela 6. Propriedades inchamento volumétrico (I Vol.) e coeficiente de anisotropia baseado no inchamento radial e tangencial (ICA) para madeira Cedro rosa (*Cedrela odorata*)

Temperatura	IVol.			ICA		
	Tu=0%	Tu=12%	média	Tu=0%	Tu=12%	média
Controle	--	14,46 a 0,697			1,40 b 0,107	
140°C	13,76 ab 0,809	14,61 a 0,946	14,19 a	1,63 a 0,114	1,58 ab 0,095	1,60 a
160°C	12,87 b 1,060	14,34 a 0,853	13,60 b	1,61 a 0,244	1,54 ab 0,103	1,58 a
média	13,31 B	14,48 A		1,62 A	1,56 A	

Em que: letras minúsculas distintas mostram diferenças entre médias na mesma coluna e letras maiúsculas distintas, na mesma linha, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Para o Coeficiente de Anisotropia (ICA) baseado no inchamento, no entanto, não foi observado efeito dos fatores isolados. O resultado obtido para o controle foi equivalente às madeiras que iniciaram o processo de tratamento com 12% de teor de umidade.

Os resultados obtidos nos materiais tratados, incham menos quando comparados aos encontrados na bibliografia, ratificando a qualidade superior do material produzido. Fernandes et al 2018, ao estudar a madeira de cedro rosa encontraram 9,96%, 7,96% e 18,97% para os coeficientes de inchamento tangencial, radial e volumétricos respectivamente, valores esses

superiores aos encontrados para o material tratado à 140°C e TU=0% (Tabela 6) contra os valores 8,07 %, 4,98% e 13,76%, respectivamente, para o material nesse trabalho.

5.1.3 Propriedades colorimétricas

Os dados das variáveis colorimétricas L, a* e b* estão apresentados nas Figuras 10 (L) e 11 (a* e b*), se referem a variação da luminosidade e das coordenadas cromáticas (antes e após tratamento térmico).

Observou-se para variável luminosidade, após o tratamento térmico, que houve redução de luminosidade para todos os tratamentos estabelecidos, sendo os tratamentos 2 (160°C e 0% de umidade) e 3 (140°C e 12% de umidade) aqueles que tiveram maior redução (Figura 10)

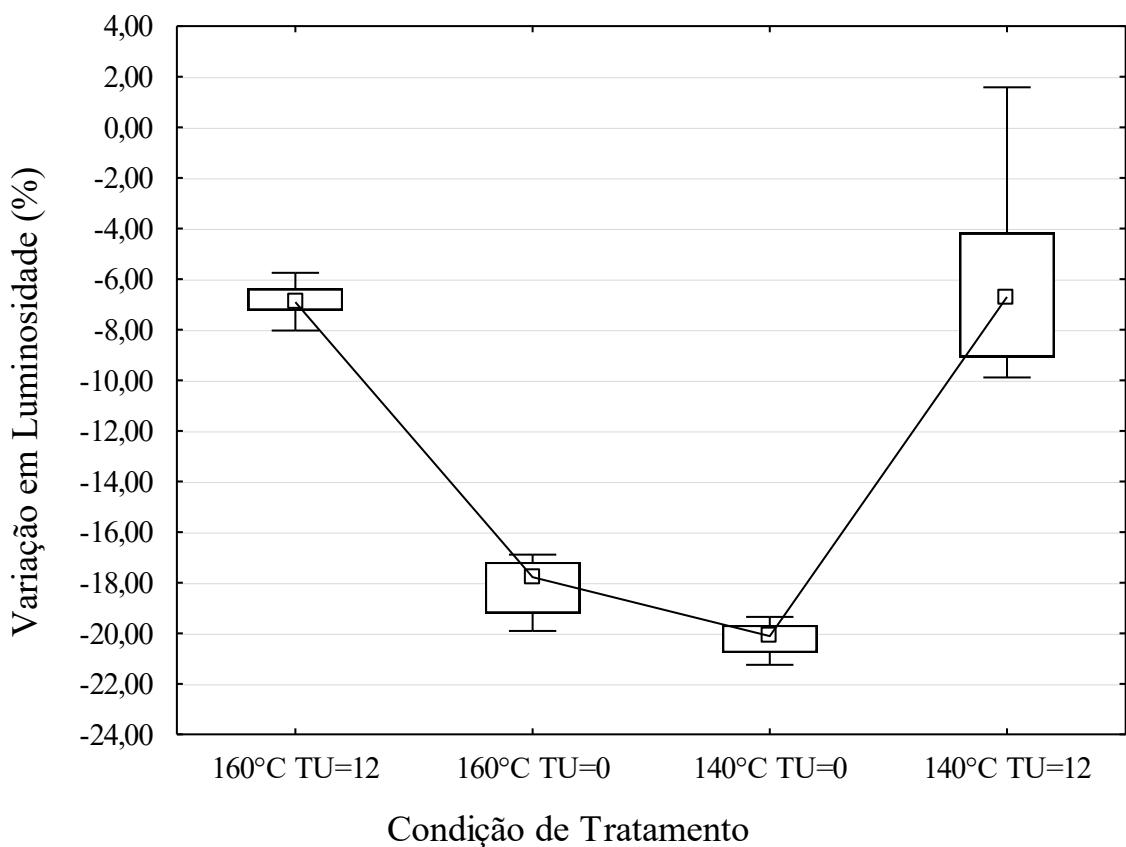


Figura 10. Boxplot da variação percentual de Luminosidade (L*) na madeira de Cedro Rosa (*Cedrela odorata*) em função da temperatura de tratamento e teor de umidade de entrada.

Em relação às componentes cromáticas a* e b* observou-se que as variações provocadas foram inversas, ou seja, variação positiva para componente a*, resultou na redução do valor obtido para componente b* (Figura 11).

Para componente a*, foi observada maior variação ao tratar a madeira à 140°C e 0% de umidade, com variações próximas de 8%, enquanto para os demais tratamentos as variações foram próximas de 5%. Para a componente b*, os tratamentos à 12% de teor de umidade provocaram menores variações. Os tratamentos a 0% de umidade geraram variações cromáticas maiores, variações médias negativas superiores à 10% para madeira tratada nessa condição à 160°C.

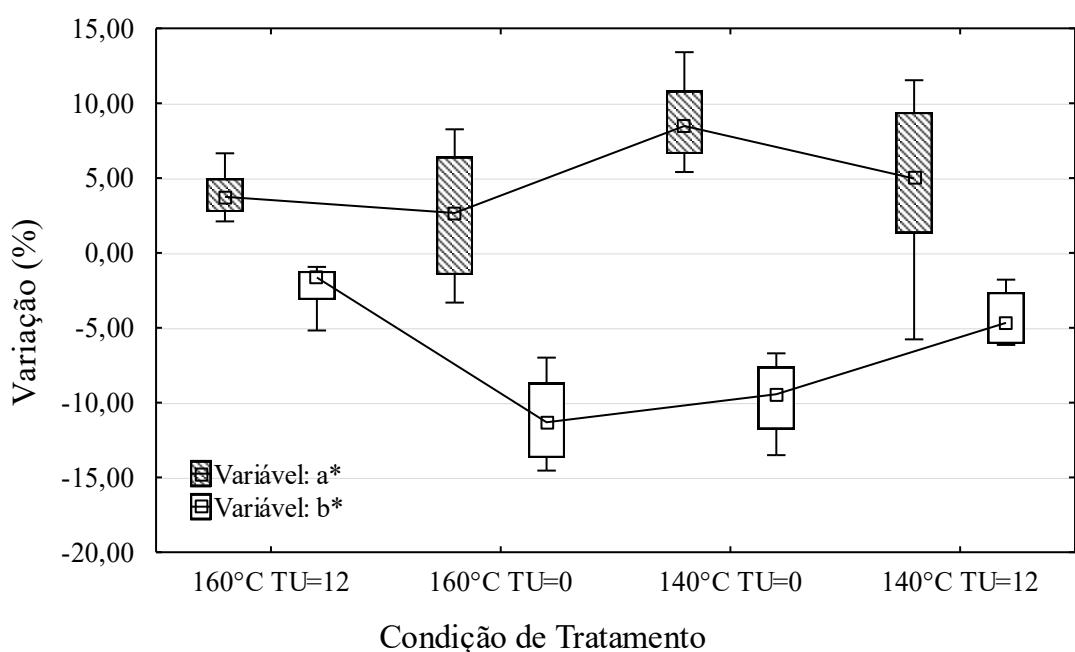


Figura 11. Boxplot da variação percentual nas componentes cromáticas a* e b* na madeira de Cedro Rosa (*Cedrela odorata*) em função da temperatura de tratamento e teor de umidade de entrada.

Em relação aos valores médios de saturação, ângulo de tinta e variação total da cor foram observadas pequenas variações para todos os tratamentos em relação à madeira não tratada (Tabela 7).

Tabela 7. Valores médios das coordenadas cromáticas da madeira Cedro rosa (*Cedrela odorata*) e suas variações percentuais após tratadas nas temperaturas de 140°C e 160°C, antes e após os tratamentos térmicos.

Coordenadas	Etapa	Umidade	140°C		160°C		Variação (%)	
							140°C	160°C
Luminosidade L	Controle		65,6	^{1,05}	65,6	^{1,33}	-	-
	Depois	0%	52,3	^{1,40}	53,9	^{1,14}	- 20,2	- 17,8
		12%	61,4	^{1,64}	60,6	^{1,25}	- 6,3	- 7,6
	Controle		12,5	^{0,45}	12,5	^{0,53}		
Coordenada a*	Depois	0%	13,3	^{0,26}	12,5	^{0,40}	6,5	0,1
		12%	13,3	^{0,50}	13,3	^{0,23}	6,1	6,6
	Controle		24,0	^{0,49}	24,0	^{0,74}		
Coordenada b*	Depois	0%	21,4	^{0,73}	21,0	^{0,92}	- 10,9	- 12,5
		12%	23,3	^{0,35}	23,8	^{0,47}	- 3,2	- 0,8
	Controle		27,1	^{0,58}	27,0	^{0,82}		
Saturação - C	Depois	0%	25,2	^{0,63}	24,4	^{0,97}	- 6,9	- 9,6
		12%	26,8	^{0,42}	27,2	^{0,46}	- 1,1	0,8
	Controle		62,6	^{0,64}	62,5	^{0,77}		
Ângulo de tinta - H	Depois	0%	58,0	^{1,03}	59,2	^{0,63}	- 7,2	- 5,4
		12%	60,3	^{0,95}	60,7	^{0,52}	- 3,7	- 2,9
Variação total - E	Depois	0%	13,8	^{1,10}	12,2	^{0,64}		
		12%	4,5	^{1,86}	4,8	^{1,09}		

Em que: Números sobre escritos são os valores dos desvios-padrão. Variação percentual calculada: valor da coordenada após tratamento menos o valor da coordenada anterior, dividido pelo valor anterior. Valores em negrito são valores das madeiras não tratadas.

Todos os tratamentos provocaram redução no ângulo de tinta e na saturação das amostras. As maiores variações totais de cor foram observadas para madeiras tratadas à 0% de teor de umidade, apresentando valores aproximadamente três vezes superiores aos das madeiras que iniciaram o processo com teor de umidade de 12%.

A variação total da cor pode ser observada na Figura 12. Os tratamentos à 0% de teor de umidade alteraram mais a cor que os tratamentos com a madeira que iniciou o processo de modificação com 12% de teor de umidade. A alteração obtida é inferior a outros tratamentos observados na literatura. Madeira de Larch e Poplar submetidas a tratamento térmico por 2 horas apresentaram variação total de cor mínima de 19,94 e 22,76, respectivamente (Van Nguyen et al, 2018).

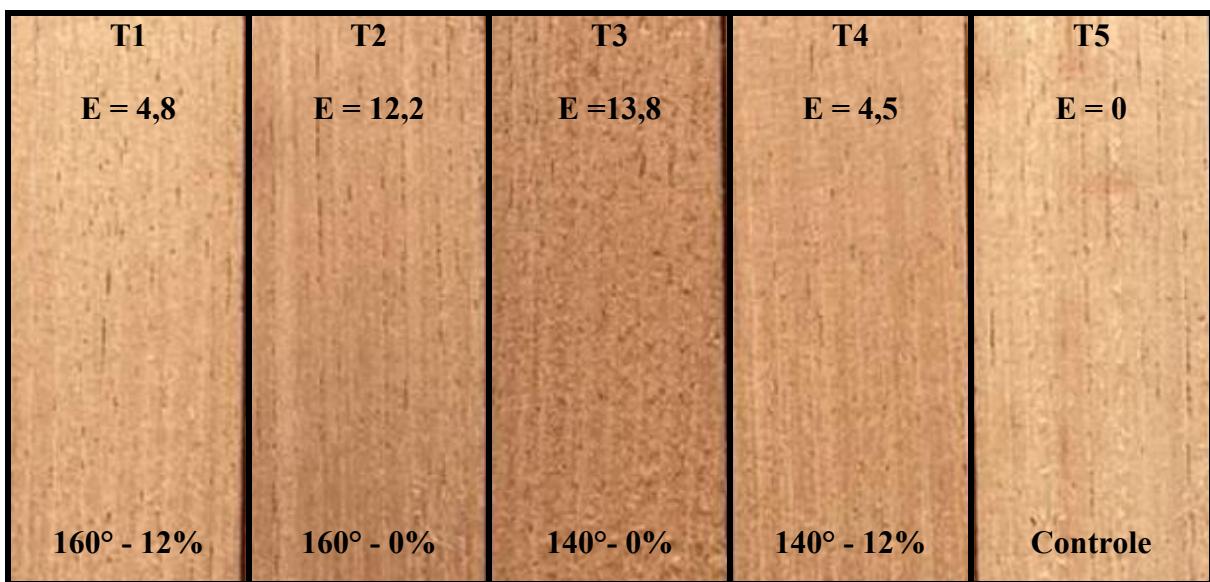


Figura 12. Efeito visual da modificação térmica na madeira de Cedro rosa (*Cedrela odorata*). Fonte: O autor.

5.1.4 Propriedades químicas

Na Figura 13 estão apresentados os espectros obtidos por FTIR-ATR para madeira de Cedro rosa (*Cedrela odorata*) não-tratada (CT0), tratada à 160° e 12% de teor de umidade (CT1) e tratada à 140° com 0% de umidade (CT3). Os tratamentos T1 e T3 foram escolhidos para análise FTIR por apresentarem maiores diferenças nas propriedades físicas e acústicas em relação ao controle para todas as espécies quando comparados aos demais tratamentos.

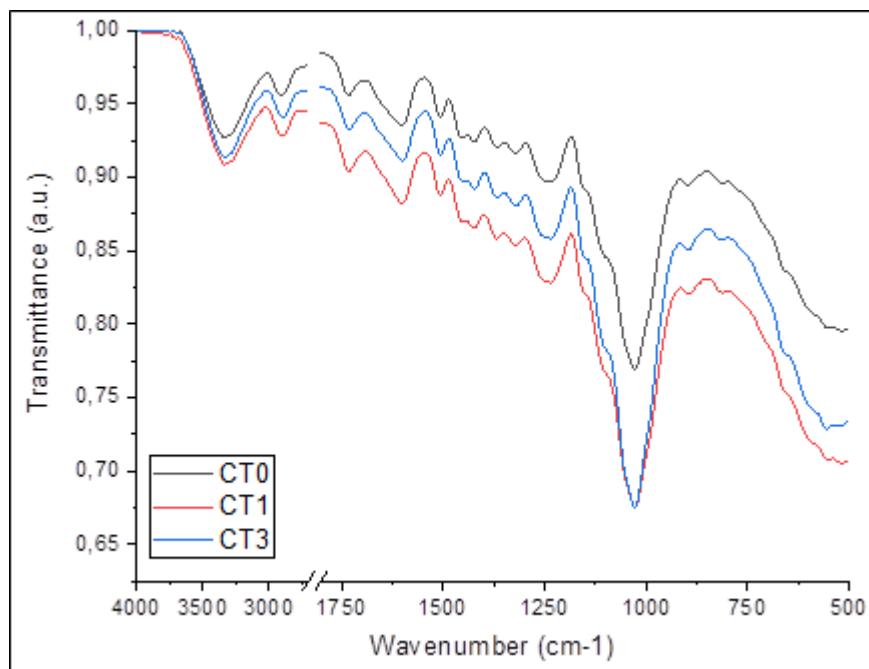


Figura 13. Espectros de FTIR-ATR de madeira de cedro (*Cedrela odorata*) em diferentes condições de tratamento. Fonte: O autor.

Laudares (2023) apresenta uma síntese dos principais intervalos de bandas de infravermelho e seus respectivos grupos funcionais. (Tabela 8)

Tabela 8: Intervalos das bandas de infravermelho (IR) observadas e os grupos funcionais.

Bandas (cm ⁻¹)	Grupo funcional
807–809	Vibração de flexão fora do plano C-H na lignina.
880–897	Deformação aromática C-H fora do plano em celulose e hemiceluloses.
1023– 1060	Alongamento simétrico C-O-C de éteres dialquilicos, vibrações de alongamento de éster C-O em grupos metoxil (celulose e hemicelulose), deformação C=O em celulose, deformação C-H aromática em lignina e ligações β-O-4 em lignina.
1104– 1159	Vibrações de estiramento de ligações C-O-C, vibrações de estiramento C-O em celulose e hemiceluloses e flexão e associação de OH em hemiceluloses e celulose.
1203– 1210	Vibração de estiramento C-O-C em celulose e hemiceluloses, e flexão OH- em celulose.
1229 1238	Anel siringil e estiramento C-O em lignina e xilano; alongamento OH-fenólico; Ligações alquil-aryl-éter, lactonas.
1240 1254	Vibração de estiramento C-O de Ph-O-C acoplada com vibração de anel aromático na lignina, vibração de alongamento C-O em xiloglucano; alongamento do anel siringil
1263– 1271	Alongamento C–O do grupo acetil na lignina.
1319-1333	Vibração C–H em carboidrato, vibração C–O das unidades do anel siringil condensado mais anel de guaiacil, grupo fenol, OH no plano de flexão (celulose).
1368– 1371	Flexão C–H alifático, alongamento em metil -CH ₃ (lignina), -CH ₂ (carboidratos), ligações de complexos de lignina-carboidrato e fenol OH.
1421– 1424	Vibrações das cadeias principais aromáticas em lignina, deformação C–H em lignina e na celulose, deformação de flexão CH ₂ em celulose e carboidratos.
1452– 1459	Ligações C=C e C–H, extrativos, O–H em deformação plana e flexão assimétrica CH ₃ em lignina.
1504– 1508	C=C alongamento do anel aromático em lignina; Vibração da cadeia principal em Lignina e água adsorvida.
1586– 1635	
1641	Vibração de estiramento C=O em carbonila conjugada de lignina
1650– 1663	C=O alongamento das estruturas aromáticas, água absorvida; C–O conjugado em quininos acoplado com alongamento.
1730-1735	C=O alongamento em xilano (hemiceluloses); C=O alongamento de ácido acetil ou carboxílico.
1739 - 1753	C=O banda carbonila, vibrações de alongamento C–O de grupos acetil de galactoglucomanano, carboxil- e aldeídos, aldeídos e ésteres aromáticos/conjugados; C=O alongamento em cetona não conjugada; alongamento C=O do xilema acetilado na hemicelulose.
2970 - 2820	C–H alongamento em grupos metil –CH ₃ e metíleno –CH ₂ .
3296 - 3430	Alongamento OH de álcoois, fenóis e ácidos.

Fonte: Laudares (2023)

Na faixa compreendida entre 1504 e 1508 há vibração da cadeia principal em lignina e da água adsorvida no material. Os Tratamentos T3 e T1 apresentaram menor intensidade de transmitância, sugerindo menor vibração dos componentes e provável degradação da lignina e

menor adsorção de água nos compostos comparados ao material não tratado (T0) (Laudares, 2023).

Um resultado similar foi observado para a faixa de 880-897, onde há deformação aromática C-H fora do plano em celulose e hemiceluloses , com valores menores para os tratamentos T3 e T1, respectivamente. Uma possível interpretação é de degradação parcial dos dessas ligações em virtude da redução de transmitância no material tratado (Laudares, 2023)

5.2 Kiri (*Paulownia tomentosa*)

Todas as variáveis apresentaram resultados com análise de variância significativa. Foi observado efeito significativo por todos os tratamentos (Tabela 9), exceto em Edin.

5.2.1 Propriedades mecânicas e acústicas

Das variáveis testadas aquelas que foram analisadas por análise de variância fatorial, com interação foram: Densidade aparente (Da), Frequência de ressonância, Decaimento logarítmico (Dl), eficiência na conversão acústica (ECA), módulo elasticidade dinâmico (Edin) e módulo de elasticidade relativo (Edin/Da). Das variáveis testadas apenas Dl e ECA tiveram resultados com análise de variância significativa. Foi observado efeito significativo por todos os tratamentos (Tabela 9), exceto em Edin.

A Tabela 9 apresenta os resultados das propriedades mecânicas e acústicas para a madeira de Kiri (*Paulownia tomentosa*).

Tabela 9. Propriedades acústicas da madeira Kiri (*Paulownia tomentosa*) em função das temperaturas de tratamento e teores de umidade inicial de tratamento.

Teste	Umidade	Controle	Variação (%)			
			140°C	160°C	140°C	160°C
Frequência Natural (Hz)	0%	-	336 ^{16a}	327 ^{15ab}	4,7	1,9
	12%	321 ^{13b}	333 ^{11a}	336 ^{13a}	3,7	4,7
ECA	0%	-	2.019 ^{143a}	1.810 ^{234b}	68,8	51,3
	12%	1.196 ^{197d}	1.568 ^{180c}	1.855 ^{319ab}	31,1	55,1
Decaimento	0%	-	21,8 ^{1,45c}	24,2 ^{2,23a}	-36,4	-29,4
	12%	34,3 ^{4,18a}	27,6 ^{1,75b}	24,5 ^{1,36c}	-19,5	-28,6
Edin (kgf.cm ⁻²)	0%	-	51.753 ^{6.244a}	48.993 ^{4.803a}	4,6	-1,0
	12%	49.480 ^{4.998a}	50.856 ^{4.108a}	53.169 ^{7.546a}	2,8	7,5
D.a (g.cm ⁻³)	0%	-	0,298 ^{0,015ab}	0,295 ^{0,018b}	-4,2	-5,1
	12%	0,311 ^{0,014a}	0,301 ^{0,014ab}	0,300 ^{0,051ab}	-3,2	-3,5
Eesp (kgf.cm.g ⁻¹)	0%	-	173.041 ^{11.994ab}	166.037 ^{13.180bc}	8,9	4,5
	12%	158.854 ^{13.079c}	169.264 ^{11.995ab}	178.167 ^{13.180a}	6,6	12,2

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas mostram diferenças estatística pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Números sobreescritos são os valores dos desvios-padrão.

O material tratado à 140°C e 0% de teor de umidade e 160°C e 12% de umidade apresentaram valores de frequência de ressonância e ECA superiores aos demais tratamentos (Tabela 9) No caso do ECA, o fato de tratar a madeira a 0% de umidade foi mais eficiente que tratar a madeira à 12%; além disso, todos os tratamentos resultaram em ganho quando comparados ao controle.

O decaimento da madeira tratada à 0% de teor de umidade foi inferior ao obtido em madeira tratada à 12% de teor de umidade. Foram observados ganhos por todos os tratamentos em relação ao controle, especialmente no material tratado à 140°C e 0% de teor de umidade (Tabela 9).

O tratamento à 160°C e 0% de teor de umidade provocou redução na densidade aparente do material. Trabalho com modificação térmica e pressão de madeira de Paulownia revelou que tratamentos à 150 e 170°C apresentaram redução na densidade aparente (Candan et al, 2013).

O maior valor de Edin/da foi obtido em madeira tratada à 160°C e 12% de teor de umidade (Tabela 9). Esse resultado sugere que o material de Kiri tratado nessas condições é mais adequado ao uso em tampos harmônicos de instrumentos musicais em relação ao material não tratado.

Madeira de Kiri tratada é objeto de estudos em diversas partes do mundo. Plantada na Itália apresentou valores de rigidez equivalentes antes e depois de tratada à temperatura de 160°C, à semelhança do presente trabalho. Os valores obtidos para densidade das madeiras do experimento citado estavam abaixo madeira utilizada nesse trabalho (0,226 g/cm³ e 0,311 g/cm³, respectivamente). Os resultados de densidade da madeira tratada e não-tratada são equivalentes, com redução no tratamento à 160°C e 12% de teor de umidade (0,295 g/cm³) (Nocetti et al, 2024).

5.2.2 Propriedades físicas

5.2.2.1 Perda de massa, densidades, umidade de equilíbrio e propriedades anisotrópicas

Os resultados a seguir são advindos das amostras de madeira que tinham dimensões iniciais com 20x30x50 mm, aqueles destinados a estudos da variação dimensional. A perda de massa percentual oriunda dos quatro tratamentos executados para a madeira de Kiri está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10. Perda de massa, densidade básica, densidade aparente e teor de umidade de equilíbrio da madeira Kiri (*Paulownia tomentosa*) em função das temperaturas de tratamentos e teores de umidades iniciais.

Teste	Umidade	Controle	140°C		160°C	
Perda de Massa (%)	0%			0,38	1,29	
	12%			0,00	1,47	
Densidade aparente (g.cm ⁻³)	0%			0,305 0,033 a	0,283 0,013 a	a
	12%	0,299 0,013 a	0,304 0,020 a		0,298 0,023 a	
Densidade básica (g.cm ⁻³)	0%			0,261 0,026 a	0,253 0,012 a	a
	12%	0,252 0,012 a	0,259 0,018 a		0,261 0,021 a	
Umidade de Equilíbrio (%)	0%			9,2 [30,30]	7,2 [45,45]	
	12%	13,2 a	12,3 [6,82]		9,1 [31,61]	

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas mostram diferenças estatística pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Números sobreescritos são os valores dos desvios-padrão. Valores entre colchetes são diferenças percentuais em relação ao controle. Os valores de controle foram analisados no teor de umidade de 12%. T1 = 160°C e 12% de umidade; T2 = 160°C e 0% de umidade; T3 = 140°C e 0% de umidade; T2 = 140°C e 12% de umidade.

Os maiores valores de perda de massa foram resultantes de tratamentos à 160°C, com destaque ao material que entrou com teor de umidade de 12%. O material tratado à 140°C e 0% de umidade manteve sua massa, com perdas desprezíveis (Tabela 10)

Para as variáveis Da e Db da madeira de Kiri não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, ou seja, eles foram estatisticamente equivalentes tanto em relação à densidade aparente, quanto em relação à densidade básica (Tabela 10). Nocetti et al., 2024 observaram que o tratamento de madeira do gênero Paulownia a temperaturas de até 160°C não necessariamente indicam uma tendência à mudança de densidade básica.

Para os teores de umidade de equilíbrio (Tabela 10), a maioria dos tratamentos apresentou diferenças estatísticas significativas, com exceção de T1 (160°C e 12% de teor de umidade) e T3 (140°C e 0% de teor de umidade), que apresentaram teores de umidade relativa equivalentes. O tratamento com maior teor de umidade de equilíbrio foi T5 (controle). O menor valor observado fora para T2 (160°C e 0% de teor de umidade).

Para as variáveis de inchamento I Rad e I Tang, observou-se valores equivalentes para os tratamentos tratados em relação ao controle. Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos tratados e isoladamente as variáveis de tratamento não tiveram efeito distinto entre si (Tabela 11)

Tabela 11. Propriedades de inchamento tangencial (I Tang.) e inchamento radial (I Rad.) para madeira Kiri (*Paulownia tomentosa*).

Temperatura	ITang.			IRad.		
	Tu=0%	Tu=12%	média	Tu=0%	Tu=12%	média
Controle	--	4,99 b 0,358			1,71 a 0,179	
140°C	5,87 a 0,431	5,73 a 0,512	5,80 a	1,82 a 0,230	1,79 a 0,134	1,80 a
160°C	5,81 a 0,814	5,79 a 0,728	5,80 a	1,92 a 0,153	1,93 a 0,246	1,92 a
média	5,84 A	5,76 A		1,87 A	1,86 A	

Em que: letras minúsculas distintas mostram diferenças entre médias na mesma coluna e letras maiúsculas distintas, na mesma linha, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Em relação ao inchamento no sentido tangencial, observa-se maior valor em todos os grupos tratados em detrimento ao grupo de controle. Não foram observadas diferenças significativas entre os grupos tratados e isoladamente as variáveis de tratamento não tiveram efeito distinto entre si.

O inchamento volumétrico apresentou valor médio distinto para o controle pelo teste de Kruskal-Wallis em relação aos demais grupos (Tabela 12 e Figura 14). Conforme pode ser observado na Figura 14, o grupo com menor valor de inchamento volumétrico foi o controle, sugerindo efeito de aumento do I Vol após os tratamentos.

Para variável ICA, os valores obtidos foram estatisticamente equivalentes, ou seja, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. Em média, a madeira que iniciou o processo à 0% de teor de umidade apresentou maiores valores de coeficiente de anisotropia.

Tabela 12. Propriedades inchamento volumétrico (I Vol.) e coeficiente de anisotropia baseado no inchamento radial e tangencial (ICA) para madeira Kiri (*Paulownia tomentosa*)

Temperatura	IVol.			ICA		
	Tu=0%	Tu=12%	média	Tu=0%	Tu=12%	média
Controle	--	6,82 0,485			2,94 a 0,241	
140°C	7,94 1,408	7,66 0,389	7,80	3,28 a 0,664	3,23 a 0,460	3,26 a
160°C	7,99 0,604	7,97 0,674	7,98	3,06 a 0,574	3,04 a 0,382	3,05 a
média	7,96	7,81		3,17 A	3,14 A	

Em que: letras minúsculas distintas mostram diferenças entre médias na mesma coluna e letras maiúsculas distintas, na mesma linha, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Valores não acompanhados de letras não atenderam aos pressupostos do teste, e foram analisados por boxplot.

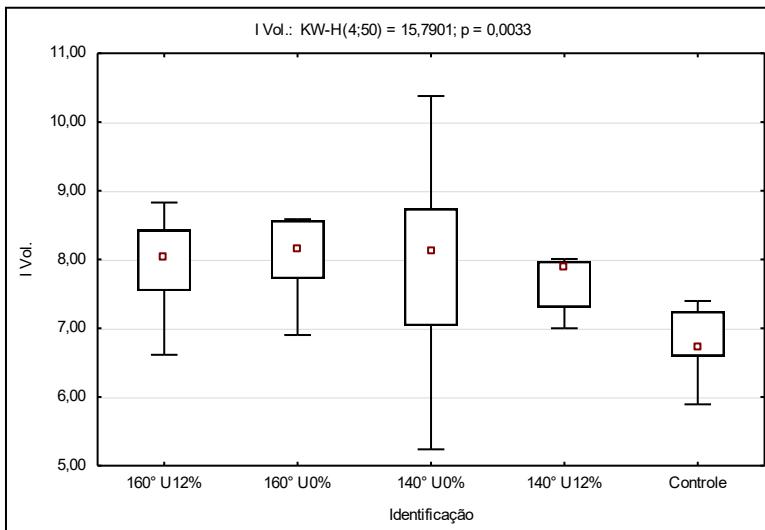


Figura 14. Boxplot apresentando as variações da variável Inchamento Volumétrico (IV) para madeira Kiri antes e depois dos tratamentos realizados, a saber 1: Temperatura de 160°C e UR = 12%, 2: Temperatura de 160°C e UR = 0%, 3: Temperatura de 140°C e UR = 0%, 4: Temperatura de 140°C e UR = 0%; 5: Controle.

As propriedades físicas de inchamento e contração da madeira de Paulownia podem divergir entre si. Estudos comparando propriedades físicas e mecânicas de madeira de Kiri cultivada na Itália, sugerem que há uma relação inversa entre estabilidade dimensional e contração da madeira (Nocetti et al 2024).

5.2.3 Propriedades colorimétricas

Os dados das variáveis colorimétricas L, a* e b* para a madeira de Kiri estão apresentados nas Figuras 15 (L) e 16 (a* e b*), referente aos tratamentos aplicados antes e depois dos tratamentos térmicos.

Observa-se na Figura 15, que após o tratamento térmico, houve redução de luminosidade para todos os tratamentos estabelecidos, sendo os tratamentos 2 (160°C e 0% de umidade) e 3 (140°C e 12% de umidade) aqueles que tiveram maior redução. Esses resultados estão de acordo com Todaro et al (2021). Maiores temperaturas de tratamento geram maiores reduções na luminosidade.

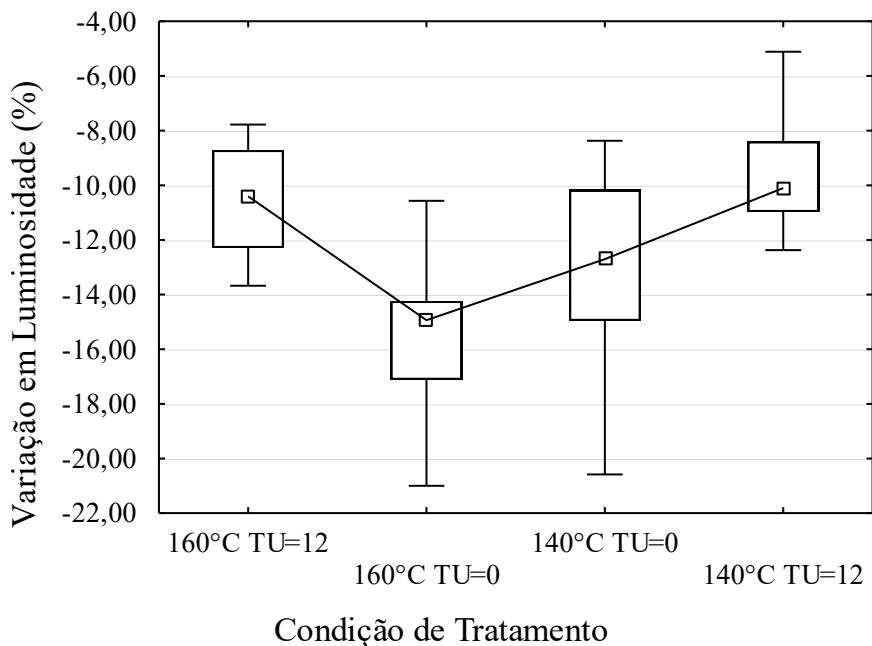


Figura 15. Boxplot da variação percentual de Luminosidade (L^*) na madeira de Kiri (*Paulownia tomentosa*) em função da temperatura de tratamento e teor de umidade de entrada.

A mudança de luminosidade na madeira é resultado de mudanças químicas ocorridas durante o processo de modificação térmica, que pode acontecer no decorrer do tempo (envelhecimento natural) ou por indução (processos artificiais de modificação). Em estudo sobre o efeito de processos de modificação com madeiras de Abeto (*Picea abies*) e Maple (*Acer spp.*), Gurău et al (2023) observou reduções entre 8 e 10% na componente de luminosidade L^* , corroborando com os resultados obtidos na figura 15 para madeira de Kiri que tem cor similar.

Observa-se na Figura 16 variação positiva nas componentes a^* e b^* após todos os tratamentos. Os tratamentos 2 (160°C e 0% de umidade) e 3 (140°C e 12% de umidade) provocaram as maiores variações para componente a^* , com aumentos, em média, superiores a 40% do valor original. Para componente b^* , a madeira tratada à 160°C sofreu efeito inferior à tratada à 140°C. O aumento nas componentes a^* e b^* é esperado para madeira tratada termicamente (Todaro et al, 2021; Godinho et al, 2024).

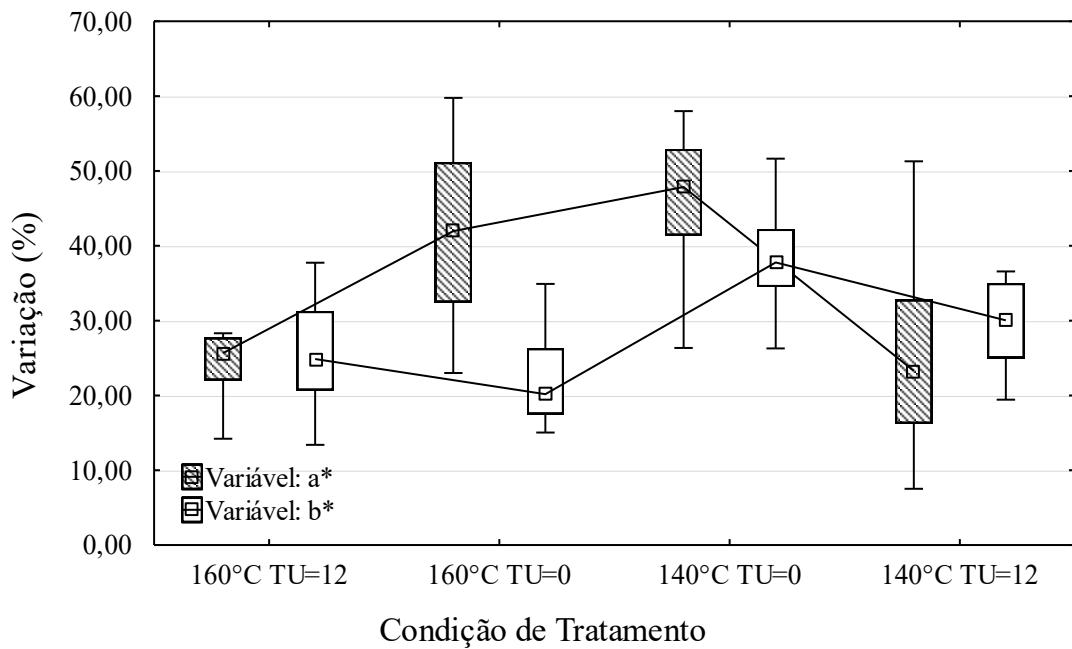


Figura 16. Boxplot da variação percentual nas componentes cromáticas a^* e b^* na madeira de Kiri (*Paulownia tomentosa*) em função da temperatura de tratamento e teor de umidade de entrada.

Os valores de saturação, ângulo de tinta e variação total de cor estão dispostos na Tabela 13. Todos os tratamentos provocaram aumento na saturação das amostras de Kiri.

Tabela 13. Propriedades colorimétricas de Saturação (C), ângulo de tinta (h^*) e Variação total de cor (E) obtidas para madeira de Kiri.

Grupo		C	h^*	E
160°C e TU=12%	NT	19,41 ^{1,02}	73,51 ^{1,31}	
	T	24,23 ^{0,68}	73,61 ^{1,21}	9,43 ^{1,51}
160°C e TU=0%	NT	20,06 ^{1,06}	74,45 ^{0,42}	
	T	24,81 ^{0,42}	72,16 ^{1,28}	12,97 ^{2,53}
140°C e TU=0%	NT	19,25 ^{0,99}	74,24 ^{1,06}	
	T	26,64 ^{0,98}	73,02 ^{1,66}	12,53 ^{2,74}
140°C e TU=12%	NT	19,41 ^{0,78}	74,51 ^{0,93}	
	T	25,02 ^{0,86}	75,07 ^{1,11}	9,29 ^{1,76}

Em que: NT = não tratado; T = Tratado. Valores sobreescritos são equivalentes às variâncias.

O tratamento à 160°C e 12% de teor de umidade, onde o ângulo de tinta não provocou mudanças significativas no ângulo de saturação, preservando a tonalidade da madeira, no entanto para os outros tratamentos foi possível observar médias superiores nos valores obtidos para as madeiras tratadas (Tabela 13).

O material tratado à 12% de umidade apresentou variação total de cor (Figura 17) inferior ao material tratado à 0% de teor de umidade, o que sugere que o efeito do teor de umidade de entrada é superior ao efeito da temperatura na variação total de cor. A variação observada é pequena quando comparada às alterações observadas em outros tratamentos descritos na bibliografia. (Todaro et al, 2021; Godinho et al 2024)

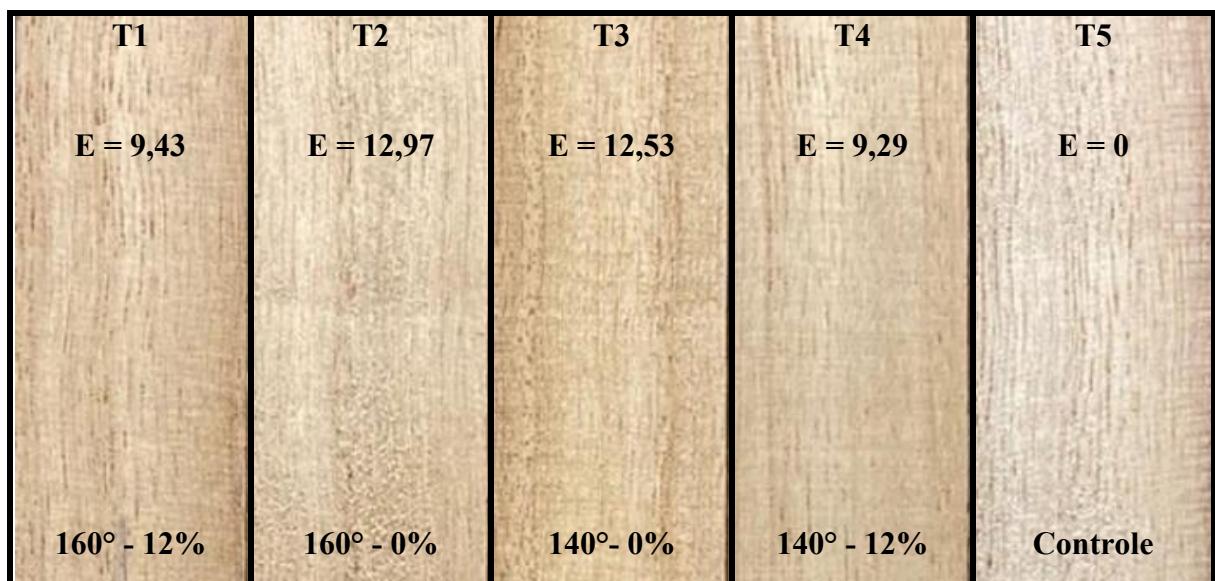


Figura 17. Efeito visual da modificação térmica na cor da madeira Kiri (*Paulownia tomentosa*).

5.2.4 Propriedades químicas

Na Figura 18 estão apresentados os espectros obtidos por FTIR-ATR para madeira de Kiri (*Paulownia tomentosa*) não- tratada (KT0), tratada à 160° e 12% de teor de umidade (KT1) e tratada à 140° com 0% de umidade (KT3). Os tratamentos T1 e T3 foram escolhidos para análise FTIR por apresentarem maiores diferenças nas propriedades físicas e acústicas em relação ao controle para todas as espécies quando comparados aos demais tratamentos.

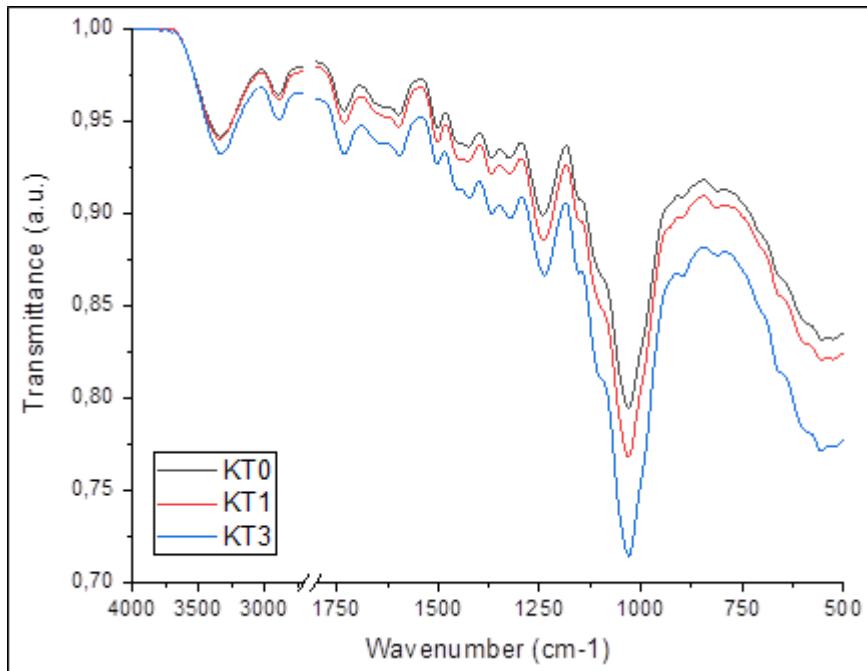


Figura 18. Espectros de FTIR-ATR da madeira Kiri (*Paulownia tomentosa*) em diferentes condições de tratamento. Fonte: O autor.

Na faixa compreendida entre 1504 e 1508 há vibração da cadeia principal em lignina e da água absorvida no material. Os Tratamentos T1 e T3 apresentaram menor intensidade de transmitância, sugerindo menor vibração dos componentes e provável degradação da lignina e menor adsorção de água nos compostos se comparados ao material não tratado (T0).

Um resultado similar foi observado para a faixa de 880-897, onde há deformação aromática C-H fora do plano em celulose e hemiceluloses, com valores menores para os tratamentos T1 e T3, respectivamente. Uma possível interpretação é de degradação parcial dessas ligações em virtude da redução de transmitância no material tratado.

Entende-se que para madeira de Kiri há maior degradação de compostos de holocelulose ao tratar a madeira anidra à 140°C e 0% de teor de umidade.

5.3 Abeto (*Picea abies*)

Das variáveis testadas, foram analisadas por análise de variância fatorial, com interação.

A Tabela 15 contém os dados referentes à média de Frequência natural, ECA, Decaimento, Módulo de elasticidade dinâmico (Edin), densidade aparente (Da) e a razão do módulo de elasticidade dinâmico pela densidade (Edin/Da).

5.3.1 Propriedades mecânicas e acústicas

Das variáveis testadas, foram analisadas por análise de variância fatorial, com interação.

A Tabela 15 apresenta os resultados das propriedades mecânicas e acústicas para a madeira de Abeto (*Picea abies*).

Tabela 15. Propriedades acústicas da madeira Abeto (*Picea abies*) em função das temperaturas de tratamento e teores de umidade inicial de tratamento.

Teste	Umidade	Controle	140°C	160°C
Frequência Natural (Hz)	0%	-	457 13,6a	462 15,3a
	12%	462 16,3a	457 16,7a	460 20,4a
ECA	0%	-	2.122 178bc	2.087 145bc
	12%	2188 213b	1.958 144c	2.362 145bc
Decaimento	0%	-	20,8 1,5bc	21,9 1,6ab
	12%	20,3 1,6c	22,8 1,9a	20,9 1,6bc
Edin (kgf.cm ⁻²)	0%	-	124.828 10.796a	122.920 11.059a
	12%	124.816 14.100a	119.301 13.160a	121.110 14.456a
D.a (g.cm ⁻³)	0%	-	0,400 0,014a	0,388 0,016a
	12%	0,399 0,021a	0,390 0,019a	0,367 0,020b
Eesp (kgf.cm.g ⁻¹)	0%	-	311.593 18.826ab	316.406 17.215ab
	12%	312.515 23.060b	305.001 21.107b	328.729 24.041a

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas mostram diferenças estatística pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Números sobreescritos são os valores dos desvios-padrão.

Das variáveis estudadas observou-se diferenças significativas entre as médias de ECA, do Dl (Decaimento), Da e Edin/Da, ou seja, as temperaturas de tratamento e os teores de umidade de tratamento afetaram as variáveis citadas anteriormente. No caso do ECA, o material tratado à 160°C com teor de umidade de 12% apresentou maior eficiência na conversão acústica.

Para a variável Dl, o tratamento menos eficiente foi de 140°C e 12% de teor de umidade, pois aumentou o valor da atenuação. Os resultados obtidos ao tratar a madeira à 140° e 0% de teor de umidade e à 160°C e 12% de teor de umidade são equivalentes aos obtidos no controle.

Quanto à densidade aparente, houve redução ao tratar a madeira a 160°C e 12% de teor de umidade. Isoladamente, os fatores temperatura de 160°C e teor de umidade de 12% ocasionaram redução na densidade aparente da madeira.

A razão Eesp sofreu efeito isolado da temperatura de 160°C. O resultado obtido após tratamento à 160°C e 12% de teor de umidade se diferenciou e foi superior ao controle e ao

resultado observado no material tratado à 140°C sobre a mesma condição de umidade de entrada.

Outros trabalhos investigaram a relação entre propriedades físicas, acústicas e mecânicas da madeira de Abeto. Halachan et al (2017) observaram para madeira de Abeto com 0,400g/cm³, módulo de elasticidade dinâmico ao longo da grã de 130.000 Kgf/cm², além de decaimento de 25, afirmando ser um valor baixo se comparado a madeira de Larch, que varia entre 30 e 50. Apesar dos resultados dos tratamentos em relação ao módulo de elasticidade dinâmico serem inferiores ao obtido por Halachan et al (2017) variando de 119.301 a 124.828 Kgf/cm², os valores de decaimento são melhores, especialmente no tratamento à 140°C e TU=0%, sugerindo potencial acústico no material tratado.

O processo de modificação térmica em madeira de coníferas degrada os carboidratos e reduz o número de hidroxilos disponíveis, mas não necessariamente melhora a rigidez da madeira. Broda et al (2024) estudou a modificação térmica da madeira de Pinho escocês e afirmou que após o tratamento o material apresenta interesse para a indústria, por melhorar o inchamento e absorção da madeira.

5.3.2 Propriedades físicas

5.3.2.1 Perda de massa, densidades, umidade de equilíbrio e propriedades anisotrópicas

Os resultados da Tabela 16 são advindos das amostras de madeira que tinham dimensões iniciais com 20x30x50 mm, aqueles destinados a estudos da variação dimensional.

A perda de massa percentual oriunda dos quatro tratamentos executados para a madeira de Abeto está apresentada na Tabela 16.

Tabela 16. Perda de massa, densidade básica, densidade aparente e teor de umidade de equilíbrio da madeira Abeto (*Picea abies*) em função das temperaturas de tratamentos e teores de umidades iniciais.

Teste	Umidade	Controle	140°C	160°C
Perda de Massa (%)	0%		0,50	0,58
	12%		0,01	0,43
Densidade aparente (g.cm ⁻³)	0%		0,384 ^{0,018}	a
	12%	0,390 ^{0,019}	a	0,388 ^{0,021}
Densidade básica (g.cm ⁻³)	0%		0,321 ^{0,014}	a
	12%	0,328 ^{0,015}	a	0,326 ^{0,015}
Umidade de Equilíbrio	0%		10,3 ^[0,96]	b
			10,1 ^[2,88]	b

(%)	12%	10,4	b	11,4	[+9,61]	a	9,6	[7,69] c
-----	-----	------	---	------	---------	---	------------	-----------

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas mostram diferenças estatística pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Números sobreescritos são os valores dos desvios-padrão. Valores entre colchetes são diferenças percentuais em relação ao controle. T1 = 160°C e 12% de umidade; T2 = 160°C e 0% de umidade; T3 = 140°C e 0% de umidade; T4 = 140°C e 12% de umidade.

Todos os tratamentos resultaram em perda de massa inferior à 1%, sendo o tratamento à condição de 140°C e 12% de teor de umidade um valor desprezível (Tabela 16)

Para as variáveis densidade aparente e densidade básica não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 16).

Na Tabela 17, observa-se o efeito dos tratamentos em relação ao Teor de Umidade de equilíbrio da madeira de Abeto. Os tratamentos realizados com teor de umidade de entrada de 0% afetaram o TUe da madeira. Ao tratar a madeira de Abeto com 12% de teor de umidade à 160°C foi observado redução significativa no TUe. Isoladamente, os fatores que reduziram o Teor de Umidade de equilíbrio da madeira de Abeto foram a temperatura de 160°C e o teor de umidade de 0%.

Tabela 17. Propriedades inchamento tangencial (I Tang.) e inchamento radial (I Rad.) para madeira Abeto (*Picea abies*)

Temperatura	ITang.			IRad.		
	Tu=0%	Tu=12%	média	Tu=0%	Tu=12%	média
Controle	--	10,05 b 0,606			4,18 b 0,412	
140°C	11,05 a 0,389	10,75 a 0,466	10,90 a	4,45 ab 0,331	4,23 b 0,278	4,34 b
160°C	11,02 a 0,363	10,91 a 0,617	10,97 a	4,67 a 0,193	4,56 ab 0,448	4,61 a
média	11,04 A	10,83 A		4,56 A	4,39 A	

Em que: letras minúsculas distintas mostram diferenças entre médias na mesma coluna e letras maiúsculas distintas, na mesma linha, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Para variável Inchamento Tangencial (ITang) todos os tratamentos diferenciaram-se do controle, o valor obtido para o controle foi inferior ao observado nas madeiras tratadas (Tabela 17). Isoladamente os fatores Temperatura e Teor de umidade de entrada não modificaram o inchamento tangencial da madeira de Abeto.

Todos os tratamentos tiveram efeito sobre o Inchamento Radial (I Rad), com exceção da madeira tratada à 160°C e 0% de teor de umidade, que não se diferenciou do tratamento controle em nenhum nível. O tratamento à 160°C e 0% (T2) de teor de umidade elevou o inchamento radial, enquanto os tratamentos à 140°C e 0% de teor de umidade e 160°C e 12% de teor de umidade foram estatisticamente equivalentes ao controle e ao tratamento T2.

Isoladamente, somente a temperatura de 140°C apresentou diferença estatística dos demais fatores (Tabela 17).

Em relação a variável I vol observou-se que todos os tratamentos foram equivalentes ao controle (Tabela 18).

Tabela 18. Propriedades inchamento volumétrico (I Vol.) e coeficiente de anisotropia baseado no inchamento radial e tangencial (I CA) para madeira Abeto (*Picea abies*)

Temperatura	IVol.			I CA		
	Tu=0%	Tu=12%	média	Tu=0%	Tu=12%	média
Controle	--	15,15 a 0,861			2,42 ab 0,153	
140°C	16,14 a 0,574	15,48 a 0,756	15,81 a	2,50 ab 0,196	2,55 a 0,107	2,52 a
160°C	16,20 a 0,711	16,04 a 0,869	16,12 a	2,32 b 0,237	2,27 b 0,158	2,29 b
média	16,17 A	15,76 A		2,41 A	2,41 A	

Em que: letras minúsculas distintas mostram diferenças entre médias na mesma coluna e letras maiúsculas distintas, na mesma linha, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Para a variável I CA, todos os tratamentos foram equivalentes ao controle, porém os tratamentos a 160°C apresentaram valores inferiores aos tratamentos à 140°C (Tabela 18). O fator teor de umidade de entrada não teve efeito sobre o coeficiente de Anisotropia baseado no Inchamento, mas ao observar isoladamente, em média, apresentaram valores inferiores ao controle.

5.3.3 Propriedades colorimétricas

Os dados das variáveis colorimétricas L, a* e b* para a madeira de Abeto estão apresentados nas Figuras 19 (L) e 20 (a* e b*), referente aos tratamentos aplicados antes e depois dos tratamentos térmicos.

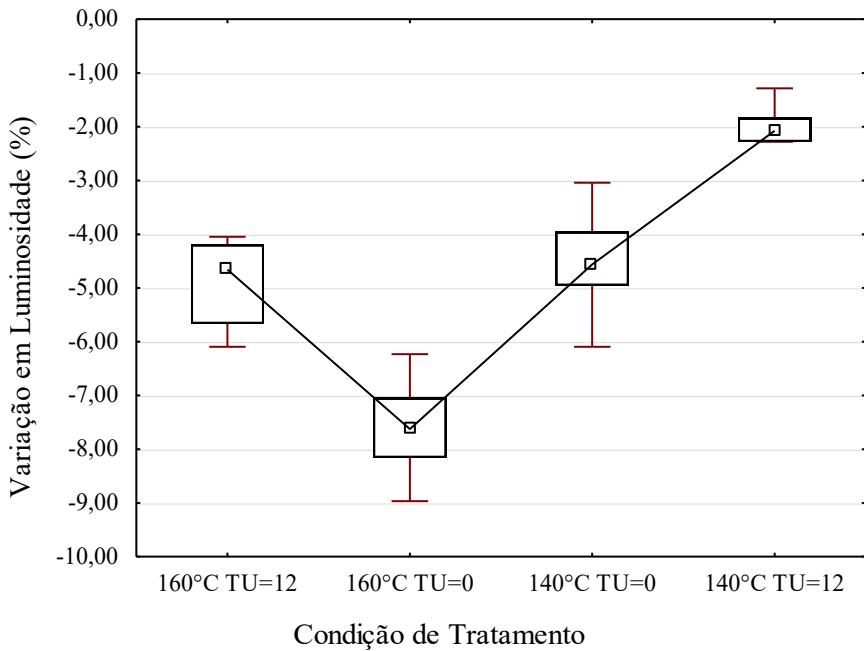


Figura 19. Boxplot da variação percentual de Luminosidade (L^*) na madeira de Abeto (*Picea abies*) em função da temperatura de tratamento e teor de umidade de entrada.

Observou-se redução de luminosidade para todos os tratamentos estabelecidos (Tabela 19). Os tratamentos 1 (160°C e 12% de umidade) e 4 (140°C e 0% de umidade) apresentaram perdas em luminosidade equivalentes, entre 4 e 5%. O tratamento que mais preservou a luminosidade da madeira de Abeto foi na condição de 140°C e 12% de umidade, enquanto o tratamento 2 (160°C e 0% de umidade) foi aquele que teve maior redução.

A mudança de cor de madeiras claras é discutida em trabalhos ao redor do mundo. Gurau et al (2023) estudou a mudança de cor nas madeiras de Abeto e Maple sob condições de temperatura e luz artificiais, e verificou que a mudança na componente de luminosidade L^* em madeira de *Picea* obtida nos tratamentos T1 e T3 é equivalente à aproximadamente 100 horas de exposição às condições de 50°C e luz UV com intensidade de 3W/m². Para alcançar os resultados obtidos no tratamento T2 (160°C e 12% de umidade) seria necessário tratar o material por aproximadamente 300h.

Observa-se na Figura 20, que todos os tratamentos tiveram efeito similar sobre a componente a^* , provocando variações positivas entre 20 e 35%. O tratamento com menor modificação de cor foi aquele realizado à 140°C e 12% de umidade, e aquele com maior variação foi realizado à 160°C e 0% de teor de umidade. Para a componente b^* o efeito dos tratamentos foi mais variado, com as maiores mudanças observadas para os materiais tratados à 160°C e menores variações para o material tratado à 140°C e 12% de umidade.

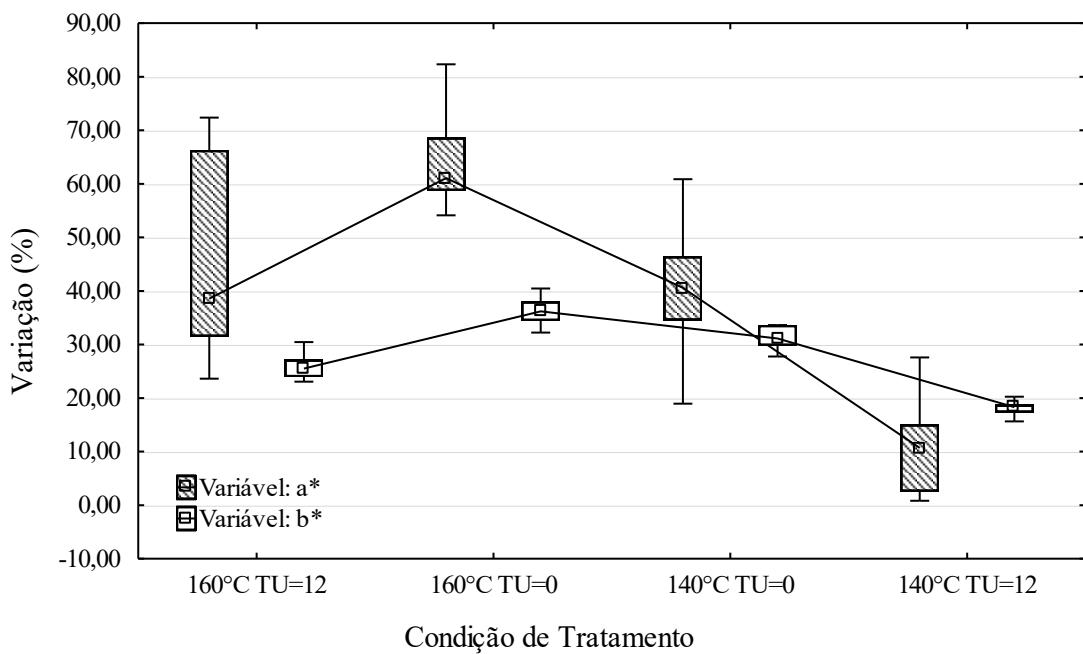


Figura 20. Boxplot da variação percentual nas componentes cromáticas a^* e b^* na madeira Abeto (*Picea abies*) em função da temperatura de tratamento e teor de umidade de entrada.

Para os níveis de alteração de vermelho (a^*) e amarelo (b^*) obtidos pelos tratamentos à 160° e TU=12% e 140°C e TU=0% seria necessário tempo de aproximadamente 100 horas do tratamento realizado por Gurau et al (2023), que adotou tratamento à 50°C associada à 3W/m² de radiação UV.

Os valores médios de saturação , ângulo de tinta, e variação total de cor estão descritos na Tabela 19. Observou-se aumento de saturação após todos os tratamentos. O ângulo de tinta teve pequenas variações, sofrendo aumento somente no material tratado à 140°C e 12% de umidade. Foram observados valores maiores para madeira que iniciou o processo com teor de umidade de 0%.

Tabela 19. Propriedades colorimétricas de Saturação (C), ângulo de tinta (h^*) e Variação total de cor (E) obtidas para madeira de Abeto.

Grupo		C	h^*	E
160°CeTU=12%	NT	19,80 ^{0,57}	81,12 ^{0,92}	
	T	25,04 ^{0,60}	79,91 ^{0,88}	6,95 ^{1,05}
160°CeTU=0%	NT	19,48 ^{0,61}	81,50 ^{0,81}	
	T	26,84 ^{0,75}	79,97 ^{0,67}	9,90 ^{0,93}

140°CeTU=0%	NT	19,96 ^{0,56}	81,62 ^{0,75}	7,58 ^{0,99}
	T	26,40 ^{0,84}	81,08 ^{0,71}	
140°CeTU=12%	NT	19,91 ^{0,82}	81,50 ^{0,76}	4,05 ^{0,51}
	T	23,44 ^{0,93}	82,03 ^{0,52}	

A maior variação total de cor foi obtida para madeira tratada à 160°C e 0% de umidade, o resultado obtido fica evidente na Figura 21. Segundo Hrčková et al (2018) variações totais de cor acima de 6 e abaixo de 12 podem ser classificadas como mudanças de cor distintas. Nesse sentido, somente o tratamento T4 não permitiu distinção entre o controle e o tratamento final.

A madeira de *Picea abies* quando tratada à 160°C atingiu variação total de cor máxima de 9,90, quando seca previamente. Segundo a literatura, as alterações obtidas para temperaturas de 160°C são muito próximas das obtidas (entre 9 e 11,2) permitindo distinção na mudança de cor (Hrkova et al, 2018). No entanto, a madeira tratada sem pré-secagem apresentou valores menores (6,95).

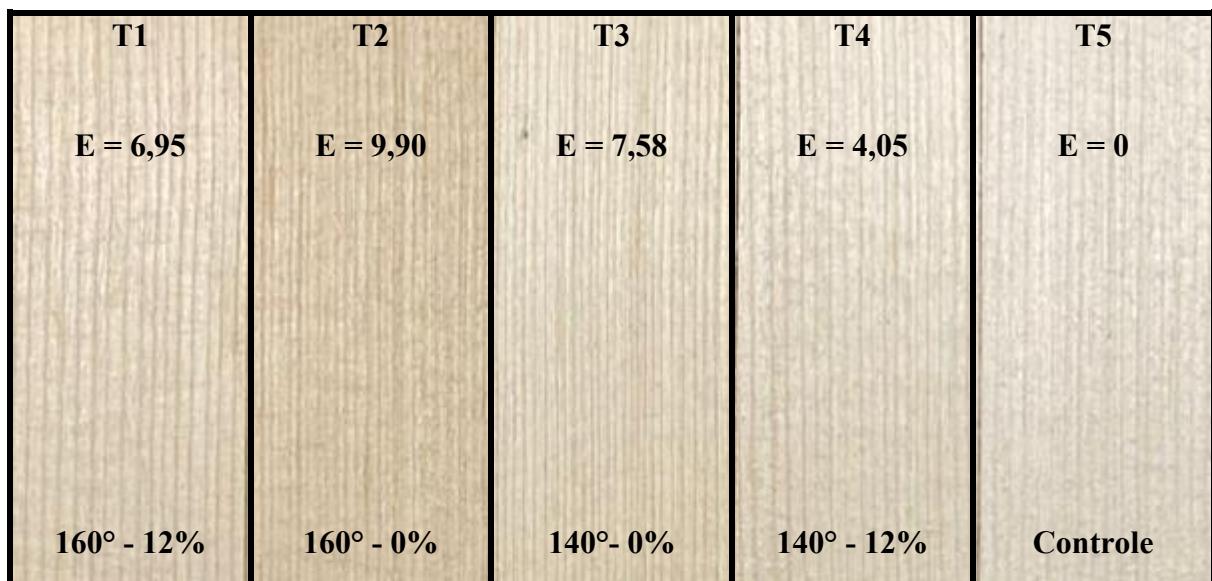


Figura 21. Efeito da modificação térmica na cor da madeira Abeto (*Picea abies*).

5.3.4 Propriedades químicas

Na figura 22 estão apresentados os espectros obtidos por FTIR-ATR para madeira de Abeto (*Picea abies*) não- tratada (AT0), tratada à 160° e 12% de teor de umidade (AT1) e tratada à 140° com 0% de umidade (AT3). Os tratamentos T1 e T3 foram escolhidos para análise FTIR por apresentarem maiores diferenças nas propriedades físicas e acústicas em relação ao controle para todas as espécies quando comparados aos demais tratamentos.

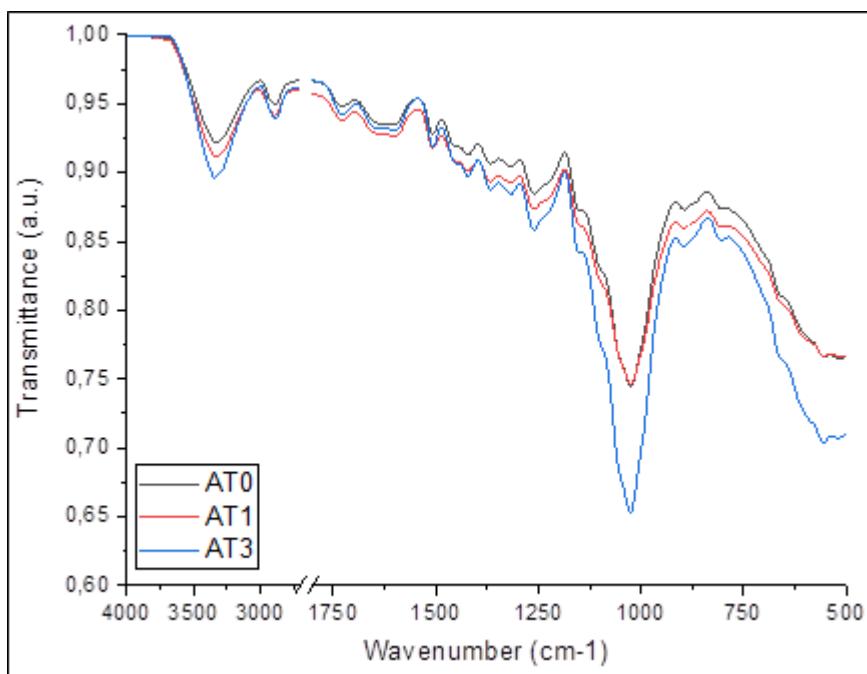


Figura 22. Espectros de FTIR-ATR da madeira Abeto (*Picea abies*) em diferentes condições de tratamento. Fonte: O autor.

O efeito da modificação térmica da madeira foi avaliado pelos picos correspondentes à lignina, aos polissacarídeos (celulose e hemicelulose).

Na faixa compreendida entre 1504 e 1508 há vibração da cadeia principal em lignina C=C do anel aromático que representa a lignina (Timar et al, 2016). Os Tratamentos T1 e T3 apresentaram menor intensidade em relação ao controle com faixas próximas entre si, sugerindo efeito similar dos tratamentos e provável degradação da lignina e menor adsorção de água nos compostos se comparados ao material não tratado (T0).

Alguns autores sugerem que o teor de lignina não necessariamente vai diminuir, no caso do trabalho realizado ele aumenta. Isso pode ser explicado por reações despolimerização e condensação na estrutura da lignina (DANIHELOVÁ, 2025; TJEERDSMA E MILITZ, 2005).

Na faixa de 3296 à 3430 é observado o alongamento OH- de álcoois, fenóis e ácidos (Laudares, 2023). Ao observar menor transmitância para T1 e T3, respectivamente, espera-se menor alongamento nas bandas tratadas anidras à 140°C.

Outro ponto de destaque é a banda compreendida entre 1000 e 1250. Laudares relata que entre 1023 e 1210, são observáveis movimentos de vibração de estiramento de C-O-C e C-O em celulose e hemiceluloses, assim como deformações em C=O em celulose. O espectro do gráfico apresenta redução substancial da transmitância na banda do material tratado anidro a 140°C (T3), sugerindo degradação de celulose e hemiceluloses. A alteração de intensidade no

pico de aproximadamente 1725, pode explicar a modificação nas hemiceluloses (TIMAR ET AL, 2016).

5.4 Marupá (*Simarouba amara*)

Das variáveis testadas, foram analisadas por análise de variância fatorial, com interação.

Na Tabela 21, são apresentados os dados referentes à média de Frequência natural, ECA, Decaimento, Módulo de elasticidade dinâmico (Edin), densidade aparente (Da) e a razão do módulo de elasticidade dinâmico pela densidade (Edin/Da).

5.4.1 Propriedades mecânicas e acústicas

A Tabela 21 apresenta os resultados das propriedades mecânicas e acústicas para a madeira de Marupá (*Simarouba amara*).

Tabela 21. Propriedades acústicas da madeira Marupá (*Simarouba amara*) em função das temperaturas de tratamento e teores de umidade inicial de tratamento.

Teste	Umidade	Controle	140°C	160°C
Frequência Natural (Hz)	0%	-	380 ^{17ab}	380 ^{13ab}
	12%	380 ^{17b}	379 ^{20ab}	393 ^{13a}
ECA	0%	-	1.700 ^{302b}	1.658 ^{122b}
	12%	1.712 ^{285b}	1.649 ^{275b}	1.963 ^{285a}
Decaimento	0%	-	21,3 ^{3,29a}	21,7 ^{0,66a}
	12%	20,9 ^{2,40a}	22,1 ^{2,40a}	20,6 ^{0,66a}
Edin (kgf.cm ⁻²)	0%	-	97.038 ^{8.276a}	96.160 ^{4.483a}
	12%	95.764 ^{7.643a}	93.693 ^{7.099a}	97.144 ^{8.569a}
D.a (g.cm ⁻³)	0%	-	0,425 ^{0,014a}	0,420 ^{0,010a}
	12%	0,425 ^{0,018a}	0,416 ^{0,014a}	0,392 ^{13.929b}
Eesp (kgf.cm.g ⁻¹)	0%	-	228.452 ^{20.640b}	229.311 ^{24.653a}
	12%	225.771 ^{17.783b}	225.693 ^{21.611b}	247.790 ^{17.248a}

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas mostram diferenças estatística pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Números sobreescritos são os valores dos desvios-padrão.

Das variáveis estudadas, apenas foram observadas diferenças entre o controle e os tratamentos em relação a frequência de natural, ECA, Da, Edin/Da (Tabela 21)

Para frequência natural, o tratamento à 160°C e 12% de teor de umidade diferiu-se do controle, os demais tratamentos foram equivalentes entre si (Tabela 21)

Em relação a conversão acústica (ECA) observou-se que o tratamento à 160°C e 12% de teor de umidade foi superior aos demais tratamentos, diferindo-se tanto do controle quanto dos demais (Tabela 21).

A variável densidade aparente sofreu efeito de redução pelo tratamento à 160°C e 12% de teor de umidade e não foram observadas diferenças entre os demais tratamentos. Isoladamente, os fatores temperatura de 160°C e teor de umidade 12% foram eficientes na redução da densidade aparente (Tabela 21).

Em relação ao módulo de elasticidade pode-se verificar que não houve diferença estatística entre os tratamentos (Tabela 21). Os valores estão dentro dos limites da expectativa de madeiras com potenciais para fins estruturais, pode-se verificar para madeira de *Simarouba amara* módulo de elasticidade variando entre 70.000 kgf/cm² e 140.000 kgf/cm² (SOUZA et al, 2020).

Em relação a variável Edin/Da pode-se verificar que os tratamentos à 160°C e 12% de teor de umidade e 160°C e 0% de teor de umidade diferiram dos demais (Tabela 21), sugerindo um material mais rígido apesar de menor densidade.

5.4.2 Propriedades físicas:

5.4.2.1 Perda de massa, densidades, umidade de equilíbrio e propriedades anisotrópicas

Os resultados a seguir (Tabela 22) são advindos das amostras de madeira que tinham dimensões iniciais com 20x30x50 mm, aqueles destinados a estudos da variação dimensional. A perda de massa percentual oriunda dos quatro tratamentos executados para a madeira de Marupá está apresentada na tabela 22.

Tabela 22. Perda de massa, densidade básica, densidade aparente e teor de umidade de equilíbrio da madeira Marupá (*Simarouba amara*) em função das temperaturas de tratamentos e teores de umidades iniciais.

Teste	Umidade	Controle	140°C	160°C
Perda de Massa (%)	0%		0,03	0,64
	12%		0,11	0,53
Densidade aparente (g.cm ⁻³)	0%		0,418 ^{0,013} a	0,424 ^{0,011} a
	12%	0,422 ^{0,014} a	0,429 ^{0,008} a	0,414 ^{0,016} a
Densidade básica (g.cm ⁻³)	0%		0,354 ^{0,011} a	0,358 ^{0,008} a
	12%	0,358 ^{0,011} a	0,361 ^{0,006} a	0,353 ^{0,013} a
Umidade de Equilíbrio	0%		10,94 ^[3,6] b	11,60 ^[2,2] a

(%)	12%	11,35	ab	11,85	[+4,4]	a	10,68	[5,9]	b
-----	-----	-------	----	-------	--------	---	-------	-------	---

Em que: médias seguidas por letras minúsculas distintas mostram diferenças estatística pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Números sobreescritos são os valores dos desvios-padrão. Valores entre colchetes são diferenças percentuais em relação ao controle. T1 = 160°C e 12% de umidade; T2 = 160°C e 0% de umidade; T3 = 140°C e 0% de umidade; T4 = 140°C e 12% de umidade.

Observou-se perda de massa superior a 0,5% somente nos tratamentos à 160°C. Os tratamentos à 140°C não apresentaram perdas significativas (Tabela 22).

Na Tabela 22, observa-se que as médias de TUe obtidas para os tratamentos foram equivalentes às obtidas pelo controle. Os resultados obtidos para os tratamentos à 140°C e 0% de TU e 160°C e 12% de TU apresentaram umidade de equilíbrio mais baixa, um ganho comparado aos outros tratamentos.

Os resultados de densidade básica obtidos chegaram a 0,414 g/cm³, para madeira tratada a 160°C e 12% de TU. A madeira de Marupá obtida após tratamento térmico tem características desejáveis e compatíveis com outras aplicações além de instrumentos musicais, como construção de móveis. Souza et al (2020), confirmaram o potencial da madeira de Marupá para indústria moveleira ao obter propriedades de densidade básica próxima de 400 g/cm³.

Em relação ao inchamento no sentido tangencial, observa-se maior valor em todos os tratamentos em detrimento ao controle (Tabela 23).

Para variável I Rad, observa-se que a maior média obtida foi do tratamento à 160°C e 12% de teor de umidade de entrada. Os demais resultados não se diferiram do controle. Isoladamente os fatores temperatura de 140°C e Teor de umidade de entrada de 0% foram inferiores às demais condições de tratamento (Tabela 23).

É esperado que tratamentos térmicos reduzam a capacidade de adsorção de água, e consequentemente seu inchamento e comportamento anisotrópico. Masoumi e Abasali (2024) estudaram madeiras de folhosas e afirmaram que a melhoria nas características de absorção de água são cruciais para desenvolvimento de produtos de madeira sustentáveis.

Tabela 23. Propriedades inchamento tangencial (I Tang.) e inchamento radial (I Rad.) para madeira Marupá (*Simarouba amara*)

Temperatura	ITang.			IRad.		
	Tu=0%	Tu=12%	média	Tu=0%	Tu=12%	média
Controle	--	5,7 b 0,356			2,6 b 0,140	
140°C	6,8 a 0,327	6,4 a 0,455	6,6 a	2,7 b 0,137	2,7 ab 0,222	2,7 b
160°C	6,6 a 0,382	6,4 a 0,377	6,5 a	2,7 ab 0,167	2,9 a 0,213	2,8 a
média	6,7 A	6,4 A		2,7 B	2,8 A	

Em que: letras minúsculas distintas mostram diferenças entre médias na mesma coluna e letras maiúsculas distintas, na mesma linha, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

As médias de IVol e ICA estão dispostas na Tabela 24. Para IVol, observou-se maior valor em todos os tratamentos em detrimento ao controle.

Em relação ao coeficiente de Anisotropia baseado no inchamento, todos os tratamentos foram equivalentes ao controle, com exceção do tratamento à 140°C e 0% (T3) que teve média maior que o controle. Isoladamente, as maiores médias foram observadas para a temperatura de 140°C e para o teor de umidade de entrada de 0%. O melhor tratamento observado foi à 160°C e TU=12%, onde não foi observada equivalência com coeficiente de anisotropia mais alto.

Tabela 24. Propriedades inchamento volumétrico (IVol.) e coeficiente de anisotropia baseado no inchamento radial e tangencial (ICA) para madeira Marupá (*Simarouba amara*)

Temperatura	IVol.			ICA		
	Tu=0%	Tu=12%	média	Tu=0%	Tu=12%	média
Controle	--	8,693 b 0,477			2,227 b 0,183	
140°C	9,748 a 0,126	9,459 a 0,455	9,603 a	2,499 a 0,217	2,305 ab 0,189	2,402 a
160°C	9,656 a 0,324	9,799 a 0,638	9,728 a	2,333 ab 0,177	2,220 b 0,133	2,276 b
média	9,702 A	9,629 A		2,416 A	2,263 B	

Em que: letras minúsculas distintas mostram diferenças entre médias na mesma coluna e letras maiúsculas distintas, na mesma linha, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

5.4.3 Propriedades colorimétricas

Os dados das variáveis colorimétricas L, a* e b* para a madeira de Marupá estão apresentados nas Figuras 23 (L) e 24 (a* e b*), referente aos tratamentos aplicados antes e depois dos tratamentos térmicos.

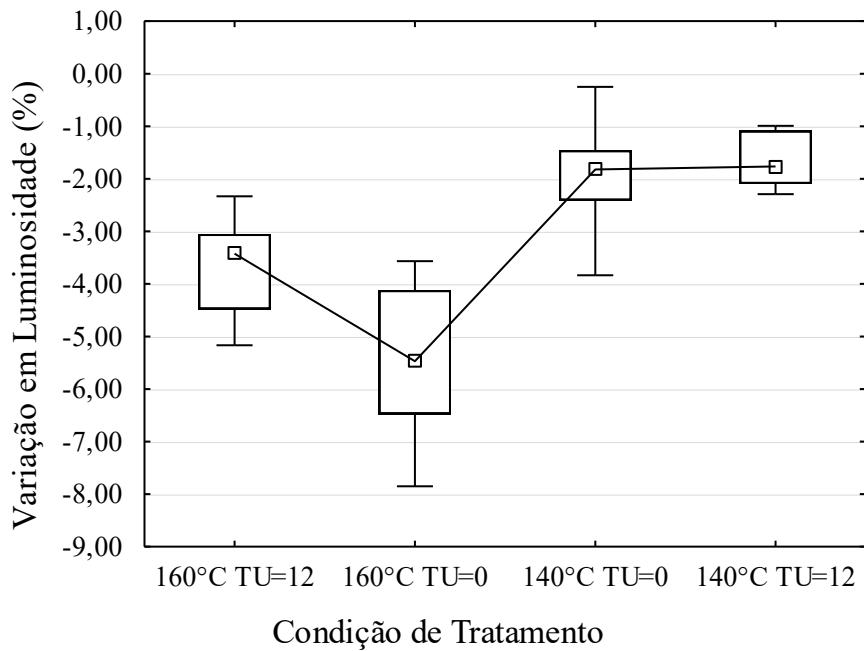


Figura 23. Boxplot da variação percentual de Luminosidade (L^*) na madeira de Marupá (*Simarouba amara*) em função da temperatura de tratamento e teor de umidade de entrada.

Para variável luminosidade (L) observou-se menor variação de cor para as madeiras tratadas à 140°C. Para as madeiras tratadas à 160°C e 0% de TU observou-se maior variação em Luminosidade, em média de 5,5% (Figura 23).

A redução de luminosidade é um fenômeno esperado. Gonçalez et al (2014) ao realizar estudos com secagem natural e em estufa de Marupá afirmou que a elevação da temperatura é fator de redução de luminosidade.

As coordenadas a^* e b^* , são apresentadas na Figura 24. As variações da componente a^* foram entre 10 e 20% para todos os tratamentos, com maior média para o material tratado à 160°C e 0% de teor de umidade e menor média para o material tratado à 140°C na mesma condição de umidade (Figura 24).

Para a componente b^* os tratamentos à 160°C apresentaram variações superiores a 40%, com maior média para o material tratado na condição anidra. O efeito dos tratamentos a 140°C foi inferior, e o material preservou mais sua cor na condição de 12% de umidade.

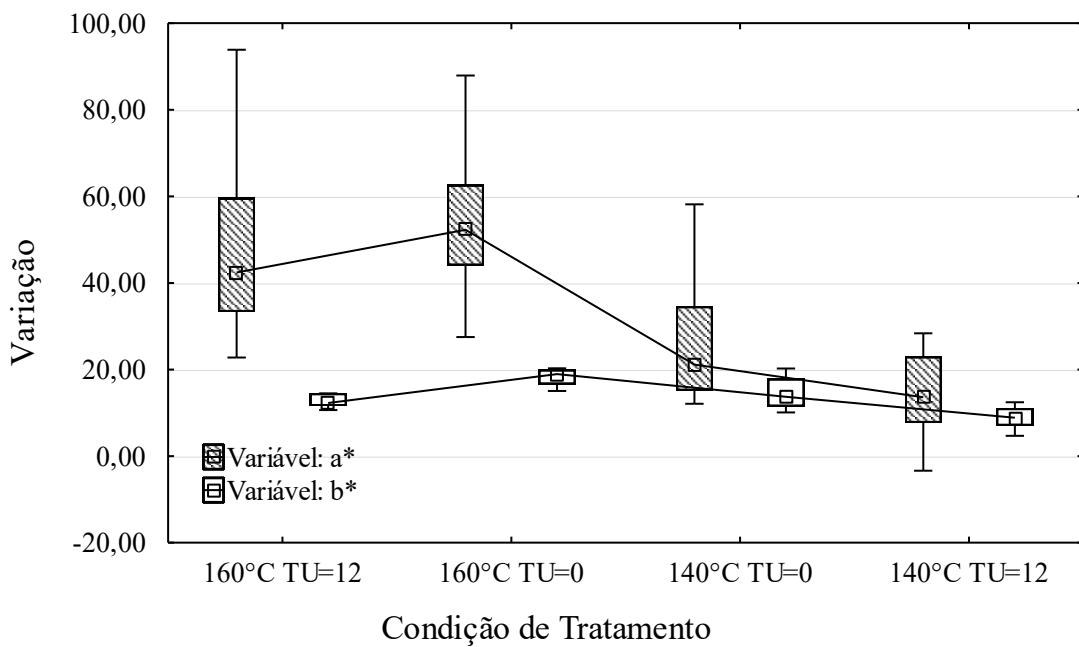


Figura 24. Boxplot da variação percentual nas componentes cromáticas a^* e b^* na madeira de Marupá (*Simarouba amara*) em função da temperatura de tratamento e teor de umidade de entrada.

Para as variáveis saturação, ângulo de tinta e variação total de cor, o efeito principal foi observado no material tratado à 160°C. Em todos os tratamentos a saturação foi superior no material tratado, enquanto o ângulo de tinta diminuiu ao tratar a madeira (Tabela 25).

A modificação de cor das componentes cromáticas de Marupá após o aquecimento mesmo que pequena, é esperada, Gonçalez et al (2014) afirmou a expectativa de melhoria nas propriedades da madeira ao ser tratada em temperaturas em torno de 150°C assim como mudanças significativas na cor, nas variáveis de saturação e ângulo de tinta.

Tabela 25. Propriedades colorimétricas de Saturação (C), ângulo de tinta (h^*) e Variação total de cor (E) obtidas para madeira de Marupá.

Grupo		C	h^*	E
160°C e TU=12%	NT	21,58 0,75	83,20 0,77	
	T	24,68 0,73	81,23 0,84	4,64 1,12
160°C e TU=0%	NT	21,91 0,68	82,86 0,42	
	T	26,25 1,20	80,88 0,86	6,40 1,35
140°C e TU=0%	NT	21,28 0,57	83,45 0,74	
	T	24,41 0,77	82,79 0,88	3,62 0,97
140°C e TU=12%	NT	21,75 0,99	83,16 0,53	

T	23,72	^{0,98}	82,83	^{0,70}	2,44	^{0,54}
---	-------	-----------------	-------	-----------------	------	-----------------

A maior variação total de cor foi observada ao tratar a madeira à 160°C e 0% de Teor de umidade (Figura 25). Os resultados são compatíveis com aqueles observados na literatura. É esperado que maiores temperaturas modifiquem com mais intensidade a cor da madeira (Méndez-Mejías e Moya, 2018).

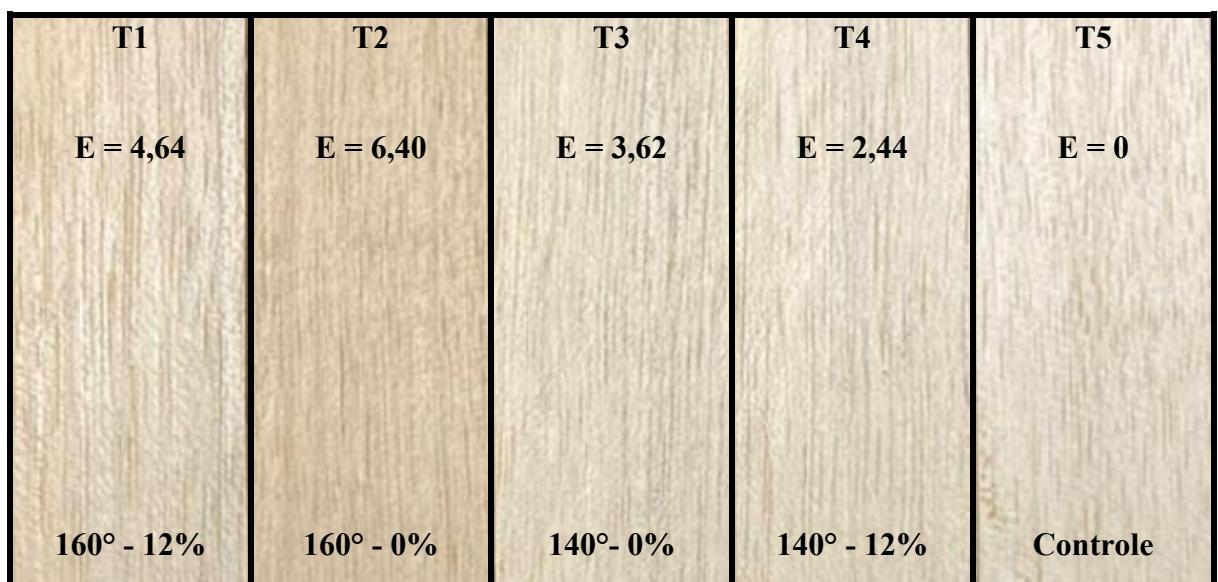


Figura 25. Efeito da modificação térmica na cor da madeira Marupá (*Simarouba amara*)

5.4.4 Propriedades químicas

Na Figura 26 estão apresentados os espectros obtidos por FTIR-ATR para madeira de Marupá (*Simarouba amara*) não- tratada (MT0), tratada à 160° e 12% de teor de umidade (MT1) e tratada à 140° com 0% de umidade (MT3). Os tratamentos T1 e T3 foram escolhidos para análise FTIR por apresentarem maiores diferenças nas propriedades físicas e acústicas em relação ao controle para todas as espécies quando comparados aos demais tratamentos.

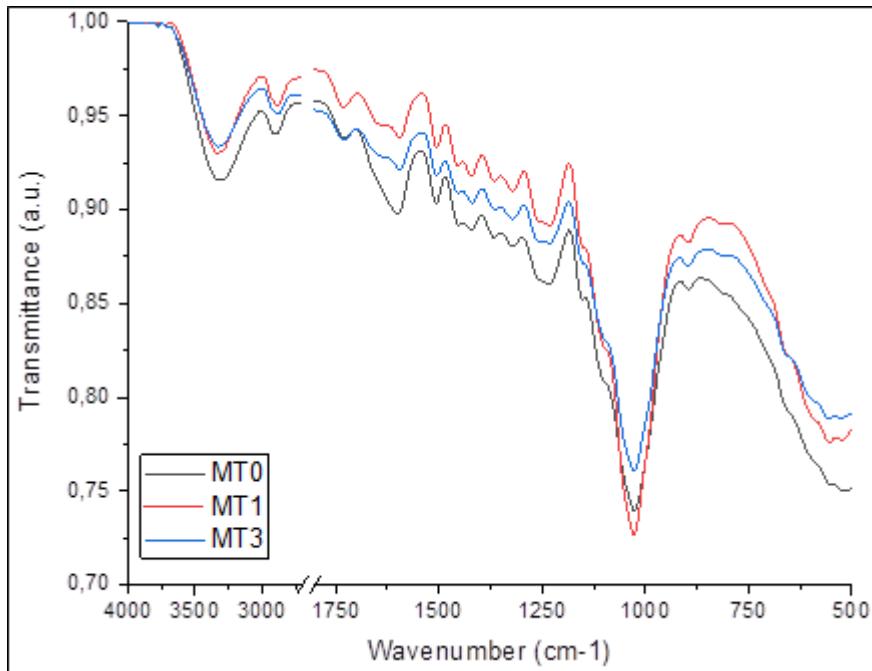


Figura 26. Espectros de FTIR-ATR da madeira de Marupá (*Simarouba amara*) em diferentes condições de tratamento. Fonte: O autor.

A análise espectroscópica por FTIR-ATR (Figura 26) evidencia alterações químicas na madeira Marupá após os tratamentos térmicos. Em MT1 (160 °C e 12% de umidade relativa), observa-se redução na banda próxima de 1730 cm⁻¹, associada aos grupos carbonílicos das hemiceluloses. Isso indica que, embora tenha havido alguma degradação térmica, a presença de umidade pode ter atenuado os efeitos do calor. A manutenção ou leve intensificação das bandas entre 1510–1600 cm⁻¹ sugere que a estrutura aromática da lignina permaneceu estável.

No espectro de MT3 (140 °C e 0% de umidade), as modificações são mais intensas em regiões associadas às hemiceluloses e celulose amorfa. A banda de 1730 cm⁻¹ apresenta redução significativa, indicando forte degradação dos grupos acetila das hemiceluloses, favorecida pela ausência de umidade. As regiões entre 1030 e 1260 cm⁻¹ também mostram diminuição de intensidade, refletindo a quebra de ligações C–O tanto nas hemiceluloses quanto na celulose. Além disso, há leve redução na banda de 900–950 cm⁻¹, sugerindo reestruturação da fração amorfa da celulose.

Essas diferenças indicam que o conteúdo de umidade de entrada afeta o processo de degradação térmica da madeira. MT1 sofreu transformações químicas mais suaves, preservando parcialmente a integridade da matriz lignocelulósica mesmo em temperaturas mais elevadas, enquanto MT3 apresentou maior degradação das hemiceluloses e alterações estruturais mais evidentes na celulose, mesmo sob temperatura mais baixa. Isso retifica a importância das condições higrotérmicas no controle da modificação térmica da madeira.

6. CONCLUSÕES

Os tratamentos térmicos aplicados impactaram de maneira distinta as quatro espécies avaliadas quanto às propriedades acústicas, físicas e colorimétricas.

Para a madeira de Kiri, os melhores resultados acústicos foram obtidos com o tratamento a 140 °C e 0% de umidade, com ganhos na Eficiência de Conversão Acústica (ECA) e redução do Decaimento Logarítmico (Dl). Essa madeira também apresentou uma das maiores variações de cor, tanto em luminosidade quanto nas componentes a* e b*, indicando sensibilidade às alterações térmicas. O inchamento radial e o coeficiente de anisotropia foram preservados pelo tratamento mais eficiente.

Na madeira de Abeto, observou-se redução de densidade aparente após os tratamentos, com destaque para o tratamento a 160 °C e 12% de umidade, que apresentou os melhores resultados nessa variável. As propriedades acústicas (ECA e Dl) foram mais favorecidas pelo tratamento a 140 °C e 0%. A alteração de cor foi discreta, provavelmente devido ao menor teor de extrativos. O coeficiente de anisotropia e o inchamento volumétrico não foram afetados.

Para a madeira de Marupá, os melhores valores para ECA e para o módulo de elasticidade relativo (E_{din}/D_a) ocorreram com o tratamento a 160 °C e 12% de umidade. Essa condição inicial de maior umidade parece preservar melhor as estruturas químicas da madeira. A coloração do Marupá foi pouco afetada. A densidade aparente também foi reduzida com os tratamentos. O coeficiente de anisotropia não foi afetado pelo tratamento mais eficiente.

A madeira de Cedro-rosa, por sua vez, foi a menos afetada nos parâmetros acústicos, não apresentando ganhos significativos com os tratamentos testados. Apesar disso, observou-se redução de densidade aparente e variações consideráveis na cor, especialmente nas componentes de luminosidade e cromaticidade.

No geral, os tratamentos a 160 °C com 12% de umidade e a 140 °C com 0% de umidade foram os mais eficazes, com variações conforme a espécie e a propriedade avaliada. O teor de umidade da madeira no momento do tratamento influenciou fortemente o grau de degradação térmica e a preservação das propriedades acústicas e visuais, sem comprometer o comportamento físico das madeiras. As alterações colorimétricas foram relativamente pequenas quando comparadas à literatura, com exceção de Kiri e Cedro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, M. R.; ABDULLAH, U. H.; ASHAARI, Z.; HAMID, N. H.; HUA, L. S. Hydrothermal modification of wood: a review. *Polymers*, Basel, v. 13, n. 16, p. 2612, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13162612>. Acesso em: 21 jul. 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E 1876: standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration*. Philadelphia: ASTM International, 2007. 6 p. (Annual Book of ASTM Standards).

BARBU, M. C.; BURESOVA, K.; TUDOR, E. M.; PETUTSCHNIGG, A. Physical and mechanical properties of *Paulownia tomentosa × elongata* sawn wood from Spanish, Bulgarian and Serbian plantations. *Forests*, Basel, v. 13, n. 10, p. 1543, 2022.

BENNETT, Bradley C. The sound of trees: wood selection in guitars and other chordophones. *Economic Botany*, New York, v. 70, p. 49–63, 2016.

BRODA, Magdalena; POPESCU, Carmen-Mihaela; POSZWA, Kamil; ROSZYK, Edward. How thermal treatment affects the chemical composition and the physical, mechanical and swelling properties of *Scots pine* juvenile and mature wood. *Wood Science and Technology*, [S.1.], v. 58, n. 3, p. 1153–1180, 2024.

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*, [S.1.], v. 131, n. 1, p. 807–818, 2012. DOI: 10.1121/1.3651233.

BUCHELT, Beate; KRÜGER, Robert; WAGENFÜHR, André. The vibrational properties of native and thermally modified wood in dependence on its moisture content. *European Journal of Wood and Wood Products*, [S.1.], v. 81, n. 4, p. 947–956, 2023.

BUCUR, Voichita. *The acoustics of wood*. Boca Raton: CRC Press, 2017. (Publicado originalmente em 1995).

ČABALOVÁ, Iveta; BÉLIK, Michal; KUČEROVÁ, Viera; JURCZYKOVÁ, Tereza. Chemical and morphological composition of Norway spruce wood (*Picea abies, L.*) in the dependence of its storage. *Polymers*, Basel, v. 13, n. 10, art. 1619, 2021. DOI: 10.3390/polym13101619

CANDAN, Zeki; KORKUT, Süleyman; ÜNSAL, Öner. Effect of thermal modification by hot pressing on performance properties of paulownia wood boards. *Industrial Crops and Products*, v. 45, p. 461–464, fev. 2013.

CAUDULLO, G.; TINNER, W.; DE RIGO, D. *Picea abies in Europe: distribution, habitat, usage and threats*. In: SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; DE RIGO, D.; CAUDULLO, G.; HOUSTON DURRANT, T.; MAURI, A. (Eds.). *European Atlas of Forest Tree Species*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. p. e012300+.

COOPER, Ryan Eugene. *Determining the quality and quantity of California Sitka spruce (*Picea hitchens's*) on private commercial timberland for use in domestic acoustic steel-string guitars*. 2024. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Oregon State University, Corvallis, 2024.

DINULICĂ, F.; STANCIU, M. D.; SAVIN, A. *Correlation between anatomical grading and acoustic-elastic properties of resonant spruce wood used for musical instruments*. *Forests*, v. 12, n. 8, p. 1122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12081122>.

DOS SANTOS, Diego Valério Braido; DE MOURA, Luiz Fernando; BRITO, José Otávio. *Effect of heat treatment on color, weight loss, specific gravity and equilibrium moisture content of two low market valued tropical woods*. *Wood Research*, v. 59, p. 253–264, 2014.

FERNANDES, N. C. L.; VALLE, M. L. A.; CALDERON, C. M. A. *Características físicas e anatômicas de Cedrela odorata L. e Cedrelinga cateniformis Ducke*. *Floresta e Ambiente*, v. 25, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.012115>

ALL, R.; STANCIU, M. D.; FILIMON, E.; COSNIȚA, M.; GLIGA, V. G. *The influence of artificial aging on resonance wood on its physical characteristics*. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Composite Materials Engineering, Brașov (Romênia)*, 17–18 October 2022, p. 73–81. 2022.

GODINHO, Delfina; FERREIRA, Cristina; LOURENÇO, Ana; ARAÚJO, Solange de Oliveira; QUILHÓ, Teresa; DIAMANTINO, Teresa C.; GOMINHO, Jorge. *The behavior of thermally modified wood after exposure in maritime/industrial and urban environments*. **Heliyon**, v. 10, n. 3, artigo e25020, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25020

GONÇALEZ, Joaquim Carlos; SANTOS, Alfredo Celestino dos; MUÑIZ, Gilberto Iwakiri; VIDAURRE, Gonçalo Batista. *Effect of drying process on marupá wood color*. **Maderas. Ciencia y Tecnología, Concepción**, v. 16, n. 3, p. 337–342, out. 2014. Disponível em: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2014000300007&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 11 maio 2025. Publicado em: 27 jun. 2014.

GURĂU, Lidia; TIMAR, Maria Cristina; COȘEREANU, Camelia; COSNIȚA, Mihaela; STANCIU, Mariana Domnica. *Aging of wood for musical instruments: analysis of changes in color, surface morphology, chemical, and physical-acoustical properties during UV and thermal exposure*. **Polymers**, v. 15, n. 7, p. 1794, abr. 2023. DOI: 10.3390/polym15071794

HALACHAN, Pavol; BABIAK, Marian; SPIŠIAK, Dominik; CHUBINSKY, Anatoly N.; TAMBI, Alexander A.; CHAUZOV, Kirill V. *Physico-acoustic characteristics of spruce and larche wood*. **Wood Research**, v. 62, p. 235–242, 2017.

HRČKOVÁ, Mária; KOLEDA, Peter; KOLEDA, Pavol; BARCÍK, Štefan; ŠTEFKOVÁ, Jaroslava. *Color change of selected wood species affected by thermal treatment and sanding*. **BioResources**, v. 13, n. 4, p. 8956–8975, out. 2018. DOI: 10.15376/BIORES.13.4.8956-8975

JAKUBOWSKI, Marcin. *Cultivation potential and uses of Paulownia wood: A review*. **Forests**, v. 13, n. 5, artigo 668, 2022. DOI: 10.3390/f13050668

KARAMI, Ezatollah; BARDET, Sandrine; MATSUO, Motoaki; BREMAUD, Iris; GAFF, Milan; GRIL, Joseph. *Effects of mild hygrothermal treatment on the physical and vibrational properties of spruce wood.* **Composite Structures**, v. 253, art. 112736, 2020. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112736

KARAMI, Elham; BRÉMAUD, Iris; BARDET, Sandrine; ALMÉRAS, Tancrède; GUIBAL, Daniel; LANGBOUR, Patrick; POURTAHMASI, Kambiz; GRIL, Joseph. *Reversible and irreversible effects of mild thermal treatment on the properties of wood used for making musical instruments: comparing mulberry and spruce.* **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 15, n. 4, p. 256–264, 2022. DOI: 10.3832/ifor4074-015

KOLYA, Haradhan; KANG, Chun-Won. *Hygrothermal treated paulownia hardwood reveals enhanced sound absorption coefficient: an effective and facile approach.* **Applied Acoustics**, v. 174, art. 107758, mar. 2021. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107758

LANINI, Tamiris Luiza Soares; SHIROSAKI, Rodrigo Kiyoshi; KUNIYOSHI, José Ricardo Gabriel; CARDOSO, Maria Clara; [incluso outros nomes se houver mais autores]. *Relação entre módulos de elasticidade na flexão de peças estruturais e de corpos da espécie caixeta (Simarouba amara Aubl.).* In: **XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira & III Congresso Latino-Americano de Estruturas de Madeira**, São Carlos, 2018. **Anais eletrônicos**, p. 1–2048. DOI: 10.55905/revconv.16n.10-129

LIU, Xin You; TIMAR, Maria Cristina; VARODI, Anca Maria; SAWYER, Gervais. *An investigation of accelerated temperature-induced ageing of four wood species: colour and FTIR.* **Wood Science and Technology**, v. 51, n. 2, p. 357–378, mar. 2017. DOI: 10.1007/s00226-016-0867-4

LIU, Meihong; PENG, Limin; LYU, Shaoyi; LYU, Jianxiong. *Properties of common tropical hardwoods for fretboard of string instruments.* **Journal of Wood Science**, v. 66, art. 14, 2020. DOI: 10.1186/s10086-020-01862-7

LOPES, Juliana de Oliveira; GARCIA, Rosilei Aparecida; NASCIMENTO, Alexandre Miguel do; LATIRRACA, João Vicente de Figueiredo. *Alteração da cor da madeira de*

teca por tratamento térmico. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 521–534, 2014. DOI: 10.1590/2179-8087.013612

LUO, Cuimei; WANG, Qihang; WANG, Xujie; SUN, Zijia; QI, Chusheng; MU, Jun. *Physical and mechanical characteristics of poplar treated with phosphoric acid under low-temperature thermal modification.* **Wood Material Science & Engineering**, v. 18, n. 4, p. 1372–1381, 2023. DOI: 10.1080/17480272.2022.2141657

LY, Bao Chau K.; DYER, Ethan B.; FEIG, Jessica L.; CHIEN, Anna L.; DEL BINO, Sandra. *Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement.* **The Journal of Investigative Dermatology**, v. 140, n. 1, p. 3–12.e1, jan. 2020. DOI: 10.1016/j.jid.2019.11.003

MASCARENHAS, Fernando Júnior Resende; DIAS, Alfredo Manuel Pereira Geraldes; CHRISTOFORO, André Luis; SIMÕES, Rogério Manuel dos Santos; CUNHA, André Eduardo Palos. *Microwave treatments and their effects on selected properties of Portuguese Pinus pinaster Aiton. and Eucalyptus globulus Labill. wood.* **Forests**, v. 14, n. 8, art. 1671, 2023. DOI: 10.3390/f14081671

MBURU, Francis; DUMARÇAY, Stéphane; BOCQUET, Jean François; PÉTRISSANS, Mathieu; GÉRARDIN, Philippe. *Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of Grevillea robusta wood.* **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 2, p. 401–405, fev. 2008. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.017

MÉNDEZ-MEJÍAS, Luis Diego; MOYA, Róger. *Effect of thermo-treatment on the physical and mechanical, color, fungal durability of wood of Tectona grandis and Gmelina arborea from forest plantations.* **Materials Science (Medžiagotyra)**, v. 24, n. 1, p. 59–68, fev. 2018. DOI: 10.5755/j01.ms.24.1.17545

MIAO, Yuanyuan; QIN, Lili; LIU, Zhenbo; YANG, Liu; LV, Xiaodong. *Effects of furfurylation on acoustic vibration performance of Paulownia wood.* **BioResources**, v. 13, n. 3, p. 6850–6867, jul. 2018. DOI: 10.15376/biores.13.3.6850-6867

MOREIRA, Vinicius F.; VIEIRA, Ivo José C.; MATHIAS, Leda; BRAZ-FILHO, Raimundo. *Chemical constituents of Simarouba amara (Simaroubaceae); Constituintes químicos de Simarouba amara (Simaroubaceae).* Anais da 28. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química – Química para o Desenvolvimento Sustentável e Inclusão Social, Poços de Caldas, MG, Brasil, 30 mai.–2 jun. 2005. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2005.

1

p.

MUNK, Christoph; WOHLERT, Hauke; PFRIEM, Alexander. *Investigation of the influence of two different thermal treatment processes on the change of various material properties of spruce resonance wood (*Picea abies (L.) Karst.*)*. In: **Northern European Network for Wood Science and Engineering – 17th Annual Meeting**, Kaunas, Lituânia, 14–15 out. 2021. **Proceedings**, Kaunas: Kaunas University of Technology / Publishing House “Technologija”, 2021. e-ISBN 978-609-02-1762-7. DOI: 10.5755/e01.9786090217627

NOCETTI, Michela; AMINTI, Giovanni; BRUNETTI, Michele; PALANTI, Sabrina; STEFANINI, Federico M.; GOLI, Giacomo. *Natural and thermally modified paulownia wood from northern Italy plantations: sawing yield, sawn-timber quality, properties and durability.* **Wood Material Science & Engineering**, (Epub ahead of print), mar. 2025. DOI: 10.1080/17480272.2025.2469712

RICHTER, Christoph. *Wood characteristics: description, causes, prevention, impact on use and technological adaptation.* Cham: Springer Nature, 2015. v. x, 222 p., ISBN 978-3-319-07421-4. DOI: 10.1007/978-3-319-07422-1

ROOHNIA, Mehran. *Wood: Acoustic properties.* In: **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2016. p. 1–? (capítulo publicado online, sem paginação fixa). DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.01996-2

SANTOS, Jiovana Pereira Amorim. *Contribuição para conservação de Simarouba amara* *Aubl.: armazenamento de sementes e produção de mudas.* 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas,

2019.

SLOOTEN, Harry Jan van der; SOUZA, Mário Rabelo de. *Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para a manufatura de instrumentos musicais*. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), 1993. 123 p.

SONG, Jiajia; DENG, Jun Liang; ZHAO, Jingyu; LU, Shiping; MING, Hanqi; SHU, Chi-Min. *Influence mechanism of dry and wet alternate aging on thermal property characteristics of wood*. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 148, n. 11, p. 5111–5129, nov. 2023.

DOI: 10.1007/s10973-023-12015-5

SOTOMAYOR-CASTELLANOS, Javier Ramón; HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, Mario César; MUÑOZ-ROJAS, Jesús; OROZCO-SANTILLÁN, Arturo; MONTOYA-HERNÁNDEZ, Jesús Humberto. *Incremento del módulo dinámico por efecto del densificado en ocho maderas mexicanas*. **Kurú, Cartago**, v. 17, n. 40, p. 44–50, jun. 2020. Disponível em: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-25042020000100044&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 30 maio 2025.

SOUZA, Marcos Martins; BUFALINO, Lina; GOMES, Laércio Gouvêa. *Caracterização madeira de marupá (*Simarouba amara Aubl, Simaroubaceae*) visando utilização na indústria moveleira*. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 98163–98185, 2020.

SRINIVAS, Kavyashree; PANDEY, Krishna K. *Effect of heat treatment on color changes, dimensional stability, and mechanical properties of wood*. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 32, n. 4, p. 304–316, 2012.

TIMAR, Maria Cristina; GURĂU, Lidia; NICULAE, Cătălin; COSEREANU, Carmen; SAVIN, Anca. *Color and FTIR analysis of chemical changes in beech wood (*Fagus sylvatica L.*) after light steaming and heat treatment in two different environments*. **BioResources**, v. 11, n. 4, p. 8325–8343, 2016.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, Holger. *Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 63, n. 2, p. 102–111, 2005.

TODARO, L.; LIUZZI, S.; PANTALEO, A. M.; LO GIUDICE, V.; MORETTI, N.; STEFANIZZI, P. *Thermo-modified native black poplar (*Populus nigra* L.) wood as an insulation material.* *iForest*, v. **14**, p. 268–273, 2021. DOI: 10.3832/ifor3710-014. Disponível em: <https://iforest.sisef.org/abstract/?id=ifor3710-014>. Acesso em: 21 jul. 2025.

YOSHIKAWA, Shigeru. *Acoustical classification of woods for string instruments. The Journal of the Acoustical Society of America*, v. **122**, n. 1, p. 568–573, jul. 2007. DOI: 10.1121/1.2743162

VAN NGUYEN, Thi Hai; NGUYEN, Tat Thang; JI, Xiaodi; GUO, Minghui. *Predicting color change in wood during heat treatment using an artificial neural network model.* *BioResources*, v. 13, n. 3, p. 6250–6264, 2018. DOI: 10.15376/biores.13.3.6250-6264

ANEXOS

Tabela Anexo I. Quadros de análise de variância

Efeito da	Cedro Rosa (<i>Cedrela odorata</i>)													
	Fr		ECA		Dl		E.din		D.a		E.esp			
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Temperatura (1)	0,58	0,45	0,82	0,37	3,86	0,06	1,14	0,29	3,87	0,06	0,02	0,89		
Umidade (2)	0,21	0,65	0,01	0,94	0,41	0,53	0,36	0,55	1,68	0,20	0,00	0,96		
(1)x(2)	0,00	0,95	4,60	0,04	3,02	0,09	1,45	0,24	7,74	0,01	0,01	0,93		
Kiri (<i>Paulownia tomentosa</i>)														
Efeito da	Fr		ECA		Dl		E.din		D.a		E.esp			
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Temperatura (1)	0,61	0,44	0,82	0,37	0,48	0,49	0,01	0,90	0,04	0,84	0,05	0,83		
Umidade (2)	0,47	0,50	0,01	0,94	35,97	0,00	0,79	0,38	0,13	0,72	0,94	0,34		
(1)x(2)	2,08	0,16	4,60	0,04	29,11	0,00	1,89	0,18	0,02	0,90	3,42	0,07		
Abeto (<i>Picea abies</i>)														
Efeito da	Fr		ECA		Dl		E.din		D.a		E.esp			
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Temperatura (1)	0,63	0,43	12,62	0,00	0,57	0,46	0,00	0,99	10,03	0,00	4,86	0,03		
Umidade (2)	0,05	0,82	1,13	0,29	0,92	0,34	0,87	0,36	7,53	0,01	0,20	0,66		
(1)x(2)	0,05	0,82	17,87	0,00	8,75	0,01	0,22	0,64	0,90	0,35	2,14	0,15		
Marupá (<i>Simarouba amara</i>)														
Efeito da	Fr		ECA		Dl		E.din		D.a		E.esp			
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Temperatura (1)	1,84	0,18	2,80	0,10	0,61	0,44	0,31	0,58	10,27	0,00	3,81	0,06		

Umidade (2)	1,65	0,21	2,47	0,13	0,03	0,87	0,26	0,61	16,12	0,00	1,78	0,19
(1)x(2)	1,82	0,19	4,82	0,03	1,74	0,20	0,88	0,35	4,11	0,05	3,26	0,08

ANEXO II. TESTE DE kolmogorov smirnov (KS)

variáveis	N	D tab.	Valores de D calculado			
			Cedro	Kiri	Abeto	Marupá
Fr	80	0,154	0,707	0,820	0,091	0,080
Dl	80	0,154	0,119	0,106	0,006	0,114
E.din	80	0,154	0,081	0,065	0,103	0,875
E.din/Da	80	0,154	0,093	0,070	0,086	0,073
ECA	80	0,154	0,076	0,134	0,060	0,072
Densidade	80	0,154	0,089	0,135	0,594	0,095

D tab>D calculado, indica dados com distribuição normal.

Anexo III. teste de verificação se as variâncias são homogêneas

Variável	Cedro rosa		Kiri		Abeto		Marupá	
	F	p	F	p	F	p	F	p
Fr	2,16	0,08	0,54	0,71	1,21	0,31	0,46	0,76
Dl	0,71	0,59	4,68	0,00	0,37	0,83	1,51	0,21
E.din	0,93	0,45	0,98	0,42	0,39	0,81	0,85	0,50
E.din/Da	1,63	0,17	0,40	0,81	0,55	0,70	0,93	0,45
ECA	1,00	0,41	0,55	0,70	0,83	0,51	1,79	0,14
Densidade	1,78	0,14	0,86	0,49	0,54	0,71	0,62	0,65

Valores em vermelho indicam variâncias não homogêneas.