



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NAS PROPRIEDADES DE
DIFERENTES MADEIRAS**

NATHÁLIA GABRIELE FRANCA DIAS

JERÔNIMO MONTEIRO, ES

2025

Nathália Gabriele Franca Dias

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NAS PROPRIEDADES DE
DIFERENTES MADEIRAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Engenharia Química

Linha de Pesquisa: Materiais, Bioprocessos e Meio Ambiente

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a Rejane Costa Alves

JERÔNIMO MONTEIRO, ES

Agosto, 2025

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

F814a Franca Dias, Nathalia Gabriele, 2000-
Avaliação dos efeitos da modificação térmica nas propriedades de diferentes madeiras / Nathalia Gabriele Franca Dias. - 2025. (recurso não paginado). : il.

Orientadora: Rejane Costa Alves.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Madeira - Química. 2. Propriedades térmicas. 3. Testes não destrutivos. 4. Indústria madeireira. 5. Madeira - Conservação. I. Alves, Rejane Costa. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. III. Título.


CDU: 66.0

Nathália Gabriele Franca Dias


**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA MODIFICAÇÃO TÉRMICA NAS PROPRIEDADES DE
DIFERENTES MADEIRAS**

Defesa de Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.


Examinado em 01 de agosto de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **REJANE COSTA ALVES**
Data: 26/09/2025 14:10:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Rejane Costa Alves

Documento assinado digitalmente
 **EDGAR VLADIMIRO MANTILLA CARRASCO**
Data: 15/09/2025 23:45:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Documento assinado digitalmente
 **ANANIAS FRANCISCO DIAS JUNIOR**
Data: 12/09/2025 00:20:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à versão de mim mesma que, nas madrugadas difíceis e nos dias de incerteza, escolheu a persistência ao invés da desistência. A verdadeira vitória não está nesta defesa, mas naqueles momentos silenciosos em que você decidiu continuar, mesmo quando ninguém estava vendo. Obrigada por não ter desistido de nós.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me revelar que cada sonho plantado em meu coração vem acompanhado da força necessária para torná-lo realidade.

À minha orientadora Rejane, pela paciência infinita e pelo apoio incondicional prestado durante toda esta jornada. Sem sua dedicação e orientação, este trabalho não teria sido possível.

Aos professores que me acompanharam nessa jornada, pela dedicação em transmitir conhecimentos, pelo incentivo nos momentos de dúvida e por serem exemplos de excelência acadêmica.

Aos professores que compoem a banca examinadora, pela gentileza em aceitar o convite e pelas contribuições que certamente engrandecerão esta pesquisa.

À Universidade Federal do Espírito Santo, que há mais de 8 anos me acolhe como casa, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e à FAPES, pelo imprescindível suporte que possibilitou a realização desta pesquisa.

Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira pela disponibilização de toda a estrutura necessária para as análises, bem como os laboratórios que me auxiliaram: Laboratório Multiusuários de Energia da Biomassa (LEB), Laboratório de Anatomia da Madeira (LAM), Laboratório Multiusuário de Painéis (LABPA), e em especial ao laboratório ao qual pertenço, Laboratório de Experimentação e Múltiplos Usos da Madeira (LEMUM).

Ao Departamento de Engenharia Química da UFES, por todo suporte oferecido nas análises químicas.

À empresa moveleira capixaba pela disponibilização de parte das madeiras utilizadas neste estudo, à professora Elzimar, que viabilizou o acesso à área experimental da UFES para obtenção da outra parte do material, e ao senhor Elecyr, marceneiro da Marcenaria da UFES, pela execução do corte de todas as amostras.

Ao meu marido, por compreender minhas ausências e por tornar mais leve cada passo desta jornada. Seu apoio foi meu porto seguro nos momentos mais desafiadores.

Aos meus pais e familiares, obrigada pelo suporte incansável durante toda a vida. Vocês foram os alicerces que me permitiram chegar até aqui, e esta conquista também é de vocês.

Aos meus amigos de laboratório, da UFES e da vida, pelo apoio, pela colaboração e pelos momentos de descontração que equilibraram a intensidade da vida acadêmica.

“Se você beber um pouco na fonte da ciência, isso o tornará ateu. Mas, se você beber profundamente, isso o trará de volta a Deus.”

Lord Kelvin

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Médias do índice de cristalinidade (ICr) calculadas a partir das duplicatas das madeiras de <i>Eucalyptus</i> sp., <i>Pinus</i> sp. e <i>Cedrela</i> sp. submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica.	57
Tabela 2. Valores médios de densidade aparente da madeira de <i>Eucalyptus</i> sp., <i>Cedrela</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica.....	65
Tabela 3. Ângulo de contato médio para <i>Eucalyptus</i> sp., <i>Cedrela</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. em função das diferentes temperaturas de modificação térmica.	68
Tabela 4. Parâmetros colorimétricos pelo método SCE (Componente Especular Excluído) e SCI (Componente Especular Incluído) para madeiras de <i>Eucalyptus</i> sp., <i>Pinus</i> sp. e <i>Cedrela</i> sp. submetidas a diferentes tratamentos térmicos.....	72
Tabela 5. Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) em MPa para <i>Eucalyptus</i> sp., <i>Cedrela</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. submetidos a diferentes temperaturas de modificação térmica.	81
Tabela 6 - Coeficientes de determinação (R^2) para o método de excitação por impulso em relação ao MOE estático, por tratamento.	89
Tabela 7 - Coeficientes de determinação (R^2) para o método de ondas ultrassônicas em relação ao MOE estático, por tratamento.	90
Tabela 8 - Médias das propriedades de resistência à tração, dureza Janka e compressão axial para madeiras de <i>Eucalyptus</i> sp., <i>Cedrela</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. em MPa em diferentes temperaturas de modificação térmica.	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de preparação dos corpos de prova para modificação térmica. Fonte: Próprio autor.	34
Figura 2 - Esquema metodológico do processo de modificação térmica em três espécies distintas e quatro temperaturas. Fonte: próprio autor.	36
Figura 3 - Rampa de aquecimento geral com quatro segmentos para o processo de modificação térmica de madeiras. Fonte: próprio autor.	37
Figura 4 - Preparo das amostras de madeira para as análises químicas. Fonte: Próprio autor.	38
Figura 5 - Esquema do ensaio de molhabilidade utilizando goniômetro para madeiras modificadas termicamente. Fonte: Próprio autor.	42
Figura 6 – Esquema de avaliação da cor das madeiras modificadas termicamente. Fonte: Próprio autor.	43
Figura 7 - Demonstração experimental dos modos fundamentais de vibração mecânica (longitudinal e flexional) em corpos de prova, excitados através de pulsador manual e monitorados por transdutor acústico. Fonte: próprio autor.	45
Figura 8 – Equipamentos V-Meter MK e UltraSonic Timer utilizados para caracterização não destrutiva de madeiras através do método direto. Fonte: próprio autor.	46
Figura 9 – Máquina universal de ensaios e configuração para os ensaios mecânicos de tração, flexão, compressão e dureza Janka. Fonte: próprio autor.	48
Figura 10 - Espectros de FTIR das madeiras de (a) <i>Eucalyptus</i> sp., (b) <i>Cedrela</i> sp. e (c) <i>Pinus</i> sp. submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica. Fonte: próprio autor.	51
Figura 11 – Difractogramas de raios X (DRX) das amostras de madeira termicamente modificadas: (a) <i>Eucalyptus</i> sp., (b) <i>Pinus</i> sp. e (c) <i>Cedrela</i> sp. Fonte: próprio autor.	56
Figura 12 – a) Curvas termogravimétricas (TG) e b) suas derivadas (DTG) para as madeiras de <i>Cedrela</i> sp., <i>Eucalyptus</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na condição de controle. Fonte: próprio autor.	60
Figura 13 – c) Curvas termogravimétricas (TG) e d) suas derivadas (DTG) para as madeiras de <i>Cedrela</i> sp., <i>Eucalyptus</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na temperatura de 140 °C. Fonte: próprio autor.	61
Figura 14 – e) Curvas termogravimétricas (TG) e f) suas derivadas (DTG) para as madeiras de <i>Cedrela</i> sp., <i>Eucalyptus</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na temperatura de 180 °C. Fonte: próprio autor.	61
Figura 15 – g) Curvas termogravimétricas (TG) e h) suas derivadas (DTG) para as madeiras de <i>Cedrela</i> sp., <i>Eucalyptus</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na temperatura de 220 °C. Fonte: próprio autor.	63
Figura 16 – i) Curvas termogravimétricas (TG) e j) suas derivadas (DTG) para as madeiras de <i>Cedrela</i> sp., <i>Eucalyptus</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na temperatura de 240 °C. Fonte: próprio autor.	63
Figura 17 - Perfil das gotas de água sobre a superfície da madeira de <i>Eucalyptus</i> sp., <i>Cedrela</i> sp. e <i>Pinus</i> sp. em função das diferentes temperaturas de modificação térmica,	

demonstrando a evolução do ângulo de contato e da molhabilidade das espécies. Fonte: Próprio autor.	70
Figura 18 - Gráficos de bolha da análise colorimétrica no espaço CIE Lab* de madeiras submetidas à modificação térmica. a) Efeito das temperaturas de tratamento comparado ao controle. b) Comparação entre espécies madeireiras antes e após modificação térmica. O tamanho das bolhas representa os valores da coordenada b* (eixo azul-amarelo). L* indica luminosidade (claro-escuro) e a* representa o eixo verde-vermelho do espaço de cor. ...	76
Figura 19 - Classificação de cor por análise de cluster das madeiras de <i>Eucalyptus</i> sp., <i>Pinus</i> sp. e <i>Cedrela</i> sp. submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica. ...	78
Figura 20 - Boxplots das propriedades mecânicas de rigidez para três espécies de madeira submetidas a diferentes tratamentos térmicos. A: <i>Eucalyptus</i> sp. (vermelho); B: <i>Cedrela</i> sp. (rosa); C: <i>Pinus</i> sp. (amarelo). Linhas superior, média e inferior representam diferentes propriedades mecânicas avaliadas em MPa.	82
Figura 21 – Correlação de Pearson entre densidade aparente, módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) das madeiras de <i>Eucalyptus</i> sp., <i>Pinus</i> sp. e <i>Cedrela</i> sp. avaliadas conjuntamente. Fonte: Próprio autor.	83
Figura 22 -Boxplots das propriedades mecânicas de resistência para três espécies de madeira submetidas a diferentes tratamentos térmicos. A: <i>Eucalyptus</i> sp. (vermelho); B: <i>Cedrela</i> sp. (rosa); C: <i>Pinus</i> sp. (amarelo). Linhas superior, média e inferior representam diferentes propriedades mecânicas avaliadas em MPa.	95

RESUMO

DIAS, Nathalia Gabriele Franca. **Avaliação dos efeitos da modificação térmica nas propriedades de diferentes madeiras**. 2025. Defesa de dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES. Orientadora: Rejane Costa Alves.

Este estudo avaliou os efeitos da modificação térmica nas propriedades químicas, físicas e mecânicas de madeiras de *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. As amostras foram submetidas a tratamentos térmicos de 140°C, 180°C, 220°C e 240°C em um sistema de reatores, com taxa de aquecimento de 0,3 °C/min. As propriedades químicas foram avaliadas por meio de espectroscopia FTIR, difração de raios X e análise termogravimétrica, as propriedades físicas por densidade aparente, molhabilidade e colorimetria, e as propriedades mecânicas foram analisadas por ensaios de flexão estática, tração, compressão, dureza Janka e propagação de ondas. Os resultados indicaram que o tratamento térmico afeta significativamente as propriedades das madeiras, variando conforme a espécie e temperatura. As análises químicas revelaram degradação de grupos hidroxila e modificações na lignina, com redução do índice de cristalinidade. A densidade aparente diminuiu nos tratamentos 220°C e 240°C, especialmente para eucalipto e cedro, sendo observada redução significativa já a 140°C para *Eucalyptus* sp. A molhabilidade diminuiu progressivamente com o aumento da temperatura para *Eucalyptus* sp. e *Cedrela* sp., enquanto o pinus apresentou um aumento da molhabilidade em menores temperaturas, seguido por redução nas maiores temperaturas, equivalendo-se ao controle. O escurecimento da madeira foi progressivo, com o parâmetro L* sendo o mais sensível. As propriedades mecânicas foram mais afetadas acima de 220°C, com redução mais expressiva no módulo de ruptura, sendo o eucalipto a espécie mais sensível devido aos efeitos da plastificação da lignina em temperaturas menores. Os métodos não destrutivos apresentaram forte correlação com os ensaios estáticos ($R^2 > 90\%$). Conclui-se que a modificação térmica é uma técnica viável para alterar propriedades específicas da madeira, com efeitos variando conforme a espécie e temperatura de tratamento da madeira.

Palavras-chave: Estabilidade dimensional, Propriedades tecnológicas, Ensaios não destrutivos, Madeiras tropicais, Caracterização mecânica.

ABSTRACT

DIAS, Nathália Gabriele Franca. **Evaluation of the effects of thermal modification on the properties of different wood species**. 2025. Master's thesis defense (Master's in Chemical Engineering) - Federal University of Espírito Santo, Alegre, ES. Adviser: Prof. Dr. Rejane Costa Alves.

This study evaluated the effects of thermal modification on the chemical, physical, and mechanical properties of *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp., and *Cedrela* sp. woods. The samples were subjected to heat treatments at 140°C, 180°C, 220°C, and 240°C in a reactor system, with a heating rate of 0.3°C/min. Chemical properties were evaluated through FTIR spectroscopy, X-ray diffraction, and thermogravimetric analysis; physical properties were assessed by apparent density, wettability, and colorimetry; and mechanical properties were analyzed through static bending, tension, compression, Janka hardness tests, and wave propagation. The results indicated that heat treatment significantly affects wood properties, varying according to species and temperature. Chemical analyses revealed degradation of hydroxyl groups and modifications in lignin, with a reduction in the crystallinity index. Apparent density decreased in the 220°C and 240°C treatments, especially for eucalyptus and cedar, with significant reduction observed at 140°C for *Eucalyptus* sp. Wettability progressively decreased with increasing temperature for *Eucalyptus* sp. and *Cedrela* sp., while pine showed increased wettability at lower temperatures, followed by reduction at higher temperatures, becoming equivalent to the control. Wood darkening was progressive, with the L* parameter being the most sensitive. Mechanical properties were most affected above 220°C, with the most significant reduction in modulus of rupture, with eucalyptus being the most sensitive species due to the effects of lignin plasticization at lower temperatures. Non-destructive methods showed strong correlation with static tests ($R^2 > 90\%$). It is concluded that thermal modification is a viable technique to alter specific wood properties, with effects varying according to species and wood treatment temperature.

Keywords: Dimensional stability, Technological properties, Non-destructive testing, Tropical woods, Mechanical characterization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	OBJETIVOS	26
2.1.	Objetivo Geral:	26
2.2.	Objetivos Específicos:	26
3	REVISÃO	27
3.1.	Processo de modificação térmica	27
3.1.1.	Fatores de influência na modificação térmica	28
3.2.	Propriedades químicas	29
3.3.	Propriedades físicas	31
3.4.	Propriedades Mecânicas	32
4	MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1.	Obtenção e preparo do material	34
4.1.1.	Processo de modificação térmica	35
4.2	Análise química da madeira	37
4.2.1.	Preparo das amostras	37
4.2.2.	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	39
4.2.3.	Difração de Raios X (DRX)	39
4.2.4.	Análise Termogravimétrica (TG/DTG)	40
4.3.	Propriedades físicas	40
4.3.1	Densidade aparente	40
4.3.2	Molhabilidade da madeira	41
4.3.3	Colorimetria	43
4.4.	Propriedades mecânicas	44
4.4.1.	Propagação de ondas por excitação	44
4.4.2.	<i>Propagação de ondas ultrassônicas</i>	46
4.4.3	<i>Ensaio mecânicos estáticos</i>	47
4.5.	Análise estatística	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1	Análises químicas	48
5.1.1	<i>Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)</i>	48
5.1.2	<i>Difração de Raio X</i>	55

5.1.3 <i>Análise Termogravimétrica (TG/DTG)</i>	59
5.2 Propriedades físicas e cor	64
5.2.1 <i>Densidade aparente</i>	64
5.2.2 <i>Molhabilidade da superfície</i>	67
5.2.3 <i>Cor da madeira</i>	71
5.3 Propriedades mecânicas	79
5.3.1. <i>Flexão estática</i>	79
5.3.2. <i>Ensaio de propagação de ondas de excitação e ultrassônicas</i>	86
5.3.3. <i>Propriedades de resistência</i>	92
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE	117

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro ocupa posição de destaque no cenário mundial, sendo impulsionado principalmente pelo cultivo de espécies de rápido crescimento, como *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., que juntas representam mais de 90% das florestas plantadas no país, destacando-se por seu rápido crescimento e adaptabilidade a diferentes condições climáticas (IBÁ, 2024). Esse modelo produtivo tem sido fundamental para atender à crescente demanda por produtos florestais, reduzindo simultaneamente a pressão sobre ecossistemas nativos (SANTANA *et al.*, 2021)

Paralelamente, a busca por diversificação e valorização de outras espécies tem ganhado relevância, sendo importante o estudo de outras espécies para obtenção de novas opções de madeiras tecnologicamente interessantes (MORETTI *et al.*, 2011). Nesse contexto, o cedro (*Cedrela* sp.), por exemplo, apresenta atributos como beleza, aroma agradável e boa trabalhabilidade, o que o torna uma alternativa interessante para diversos fins (IPT, 1989). A inclusão de espécies como o cedro em sistemas produtivos sustentáveis representa uma estratégia importante para ampliar as opções tecnológicas disponíveis no setor madeireiro nacional.

Apesar das vantagens relacionadas ao uso da madeira, surgem desafios quanto a sua durabilidade e também quanto à sua exploração. Por ser um material orgânico, a madeira está sujeita a uma série de fatores que podem comprometer sua integridade e longevidade ao longo do tempo (AFLALO, 2020). Além disso, a demanda crescente por madeira de alta qualidade tem exercido pressão sobre as florestas nativas, levantando preocupações ambientais (WANG *et al.*, 2021). Esses desafios têm impulsionado o desenvolvimento de diversas tecnologias com objetivo de melhorar a durabilidade da madeira de rápido crescimento, reduzindo a demanda de espécies nativas (YUE *et al.*, 2023). Dentre essas tecnologias, destaca-se a modificação térmica, que tem ganhado destaque nos últimos anos, se apresentando como uma solução inovadora para superar algumas dessas limitações (LOBATO *et al.*, 2020; SCHULZ *et al.*, 2021; MANGINI *et al.*, 2023; BESSALA *et al.*, 2024).

A modificação térmica é um processo que consiste na exposição da madeira a temperaturas elevadas, superiores às utilizadas na secagem convencional, porém inferiores àquelas que provocariam a carbonização do material (OLIVEIRA, 2020). O objetivo do processo é a

alteração da composição química da madeira, de modo que haja a degradação e rearranjo dos principais constituintes, resultando em mudanças em suas propriedades, como cor, estabilidade dimensional, umidade de equilíbrio, resistência a biodeterioração, entre outras (LAUDARES *et al.*, 2023). Apesar das pesquisas terem iniciado na década de 1980, esse processo permanece pouco explorado pela comunidade científica quando comparado a outros processos madeireiros como desdobro, secagem, polpação, carbonização e produção de painéis (BATISTA, 2019). Esse fator evidencia a importância de novas pesquisas na área, visando aprofundar a compreensão deste método de tratamento da madeira, e suas implicações nas propriedades químicas, físicas e mecânicas da madeira.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral:

Investigar e quantificar as alterações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas das espécies de *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. submetidas ao processo de modificação térmica em diferentes temperaturas.

2.2. Objetivos Específicos:

Avaliar as alterações na composição química das madeiras por meio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), difração de raios X (DRX) e análise termogravimétrica (TG/DTG) em função das diferentes temperaturas de modificação térmica.

Determinar as modificações nas propriedades físicas, incluindo densidade aparente, molhabilidade da superfície e parâmetros colorimétricos das madeiras submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica.

Caracterizar as propriedades mecânicas por meio de ensaios de flexão estática (módulo de elasticidade e módulo de ruptura), resistência à tração, compressão axial e dureza Janka das madeiras termicamente modificadas.

Estabelecer correlações entre métodos não destrutivos (propagação de ondas por excitação e ultrassônicas) e ensaios mecânicos estáticos para estimativa das propriedades das madeiras modificadas termicamente.

Comparar o comportamento das três espécies estudadas (*Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp.) frente aos diferentes tratamentos térmicos aplicados.

3 REVISÃO

3.1. Processo de modificação térmica

A modificação térmica é um processo de tratamento térmico da madeira que visa melhorar suas propriedades através da exposição a altas temperaturas, geralmente não maiores que 260°C (SILVA *et al.*, 2022). O processo pode ser conduzido em diversas condições, incluindo ar, vácuo ou sob uma atmosfera inerte, cada uma influenciando de maneira distinta as transformações da madeira durante o tratamento (KUBOVSKÝ *et al.*, 2020; SIVRIKAYA *et al.*, 2020; HILL *et al.*, 2021).

O principal objetivo da modificação térmica é induzir alterações químicas e físicas na estrutura da madeira, resultando em uma melhoria significativa de suas propriedades tecnológicas (LAUDARES *et al.*, 2023). Dentre essas melhorias, destacam-se o aumento da estabilidade dimensional e da resistência à degradação biológica, além de mudanças na coloração e nas propriedades mecânicas do material (SIVRIKAYA, 2020).

A técnica tem se mostrado eficiente na melhoria de características indesejáveis de madeiras de rápido crescimento, o que a torna de grande interesse tanto do ponto de vista econômico quanto ecológico (COSTA *et al.*, 2020; JUIZO *et al.*, 2020; YUE *et al.*, 2023). A utilização desse método não apenas aumenta a oferta de madeira no mercado, mas também eleva a qualidade e a durabilidade de espécies de rápido crescimento, tornando-as competitivas em aplicações antes restritas a madeiras nativas (BARREIROS *et al.*, 2023).

Entretanto, é importante notar que o processo também pode afetar negativamente algumas características da madeira, como a diminuição das propriedades mecânicas (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2024). Por essa razão, um dos focos principais das pesquisas nessa área é

o aprimoramento do processo, visando a diminuição da degradação dessas características (PAULA, 2021).

3.1.1. Fatores de influência na modificação térmica

A modificação térmica da madeira provoca mudanças físicas, químicas e mecânicas, cuja intensidade varia de acordo com diversos fatores do tratamento. Os principais elementos que influenciam esse processo são: temperatura aplicada, o tempo de exposição, o tipo de sistema utilizado (aberto ou fechado) e a atmosfera do equipamento, que pode ser composta por ar, óleo, nitrogênio ou vapor (WENTZEL *et al.*, 2019; ELRHAYAM *et al.*, 2024). A escolha do método a ser utilizado exerce influência direta sobre o nível de modificação na composição química da madeira, sendo a intensidade do tratamento o fator determinante para as mudanças das propriedades do material, resultando em transformações mais ou menos significativas (KUBOVSKÝ *et al.*, 2020; SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2024).

As características de cada espécie madeireira, incluindo suas propriedades anatômicas, físicas e químicas, são fatores importantes a serem considerados no processo de modificação térmica (MODES *et al.*, 2017; CALONEGO *et al.*, 2020). Essas particularidades influenciam na resposta ao tratamento térmico e, conseqüentemente, as propriedades finais da madeira modificada. Além disso, a temperatura final e a taxa de aquecimento são parâmetros importantes e devem ser ajustados de acordo com a finalidade do tratamento (SILVA *et al.*, 2022).

A taxa de aquecimento é responsável pela uniformidade do tratamento e a intensidade das reações químicas que ocorrem durante o processo (MODES *et al.*, 2017; PAULA, 2021). Taxas mais elevadas podem favorecer o aparecimento de trincas e fissuras (SILVA *et al.*, 2022), enquanto taxas mais lentas geralmente promovem uma distribuição mais homogênea do calor, resultando em um tratamento mais uniforme.

O princípio de transferência de calor uniforme é observado em diversos processos térmicos, incluindo a pirólise rápida de biomassa. Nesse processo, o controle da taxa e tamanho de partículas evitam gradientes de temperatura, garantindo uma distribuição rápida e uniforme do calor que otimiza as reações químicas, resultando em um processo mais eficiente e

homogêneo (KUMAR e PANWAR, 2024). Contudo, o uso de taxas excessivamente lentas pode prolongar o tempo de processo, impactando sua viabilidade econômica.

3.2. Propriedades químicas

A estrutura química da madeira é composta principalmente por três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina, além de compostos de baixo peso molecular, conhecidos como extrativos, presentes em menor quantidade (KUBOVSKÝ *et al.*, 2020; GAFF *et al.*, 2023). A proporção típica desses componentes na madeira é de aproximadamente 40-50% de celulose, 25-35% de hemicelulose e 20-30% de lignina, além de 5% de extrativos, embora essas porcentagens possam variar entre espécies e até mesmo dentro de uma mesma árvore (SANTOS, 2023). Esta composição química influencia diretamente nas propriedades da madeira, sendo a proporção dos seus componentes fortemente correlacionada com as propriedades mecânicas (PENG *et al.*, 2023).

A celulose, componente em maior proporção na madeira, representada pela fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$, é classificada como um polissacarídeo linear de alta massa molecular, composto por unidades de β -D-glucose unidas por ligações glicosídicas β (1 \rightarrow 4) (INO e SHIMBO, 2023). É o polímero renovável mais abundante da terra, constituindo o principal componente estrutural da parede celular de todas as plantas (AGNES, 2022).

A madeira é a principal fonte de celulose, que em sua forma nativa apresenta duas estruturas distintas: amorfa e cristalina (KAUR *et al.*, 2021). A celulose nativa é predominantemente cristalina, com seu grau de cristalinidade tipicamente medido por difração de raios X, apresentando valores em torno de 40-70% (TRACHE *et al.*, 2020). É caracterizada por uma organização molecular compacta e fortes ligações de hidrogênio, possuindo maior resistência térmica, tornando-a menos susceptível a alterações induzidas pelo calor (BENHAMOU *et al.*, 2024). A forma amorfa, por sua vez, apresenta estrutura desordenada e maior área superficial, sendo mais sensível ao calor (ISHAK *et al.*, 2020).

A celulose é menos afetada pelo tratamento térmico em comparação às hemiceluloses, devido à sua estrutura molecular mais organizada e cristalina, além de ligações de hidrogênio mais fortes, aumentando a resistência à degradação térmica (ORNAGHI *et al.*, 2023). Durante o tratamento, essa cristalinidade aumenta ainda mais, pois as regiões

amorfos da celulose são preferencialmente degradadas pelo calor, deixando uma proporção maior de estruturas cristalinas (MASTOURI *et al.*, 2021). Este aumento é considerado um dos responsáveis pela redução da umidade de equilíbrio na madeira tratada termicamente (LENGOWSKI *et al.*, 2021). Essa alteração estrutural na celulose contribui para a melhoria da estabilidade dimensional e da resistência à absorção de água da madeira modificada termicamente.

As hemiceluloses são polissacarídeos, porém apresentam estrutura amorfa e ramificada, constituída por hexoses (glicose, manose e galactose) e pentose (xilose e arabinose) (OLIVEIRA, 2023). Devido à essas características, como sua estrutura amorfa e baixo peso molecular, as hemiceluloses são consideradas mais sensíveis termicamente que os outros principais componentes (celulose e lignina), sendo as primeiras a serem degradadas no processo de modificação térmica (SIKORA *et al.*, 2022). Como consequência dessa degradação, e considerando que as hemiceluloses são mais higroscópicas por conterem a maioria dos grupos hidroxila (OH) acessíveis à água, ocorre a formação de compostos menos hidrofílicos, como furfural e hidroximetilfurfural, reduzindo ainda mais a capacidade de absorção de água da madeira (HILL *et al.*, 2021).

A lignina, o terceiro componente principal e segundo mais abundante da terra, é composto por macromoléculas complexas cuja estrutura é formada por três unidades fenilpropanóides distintas: p-hidroxifenil/cumaril (H), guaiacil (G) e siringil (S) (RODRIGUES, 2024). A combinação e proporção dessas unidades variam entre espécies de plantas, influenciando as propriedades da lignina e, conseqüentemente, as características da madeira (PERIYASAMY *et al.*, 2023).

A lignina possui um papel importante na rigidez e resistência da madeira, atuando como agente ligante, unindo as fibras de celulose e conferindo hidrofobicidade à parede celular (PEDRAZZI *et al.*, 2019). Por ser o componente mais resistente à ação do calor, sua degradação completa termina em elevadas temperaturas, superiores àquelas normalmente utilizadas no tratamento térmico da madeira (SILVA, 2024).

Além do importante papel na resistência da madeira, a lignina atua como um fungicida natural (NETO *et al.*, 2024). Essa característica se deve a sua estrutura altamente polimerizada, que forma uma barreira física através da ligação com às hemiceluloses e celulosas, dificultando o acesso à holocelulose e aumentando a resistência natural (INO e SHIMBO, 2023).

Os extrativos, por sua vez, são componentes secundários da madeira, facilmente removíveis com água ou solventes orgânicos (BARAÚNA *et al.*, 2022). São substâncias de baixo peso molecular, incluindo diversos compostos como terpenos, flavonoides, gorduras, ceras e ácidos graxos (FIGUEIREDO E BARRADO, 2023; JESUS, 2023). Esses componentes influenciam características como cor, odor e resistência da madeira (N'GUESSAN *et al.*, 2023).

Durante o processo de modificação térmica, os extrativos são os primeiros a serem degradados, iniciando uma degradação severa em temperaturas mais baixas (SILVA, 2024). Além disso, no processo podem surgir novos produtos de degradação, que também atuam como fungicidas naturais na madeira (CANDELIER e DIBDIAKOVA, 2021; CANDATEN *et al.*, 2023). Estes incluem principalmente furfural, ácido acético, compostos fenólicos derivados da lignina, e aldeídos aromáticos como vanilina e siringaldeído, entre outros (ESTEVES e PEREIRA, 2009).

3.3. Propriedades físicas

As propriedades físicas da madeira determinam suas possibilidades de uso e limitações. As características intrínsecas como higroscopicidade, anisotropia e susceptibilidade ao ataque biológico são fatores críticos para sua aplicação (SANTOS e SILVA, 2021). Entre as principais propriedades físicas, destacam-se o teor de umidade e densidade, além daquelas resultantes da interação com o ambiente, como as alterações dimensionais e comportamento frente à eletricidade e calor. A compreensão dessas propriedades está diretamente relacionada à estrutura anatômica e composição química da madeira (CHEN *et al.*, 2020).

Em relação à sua natureza higroscópica, a madeira apresenta o fenômeno de retratibilidade, que se manifesta através do inchamento e contração. O inchamento ocorre quando a madeira absorve umidade, resultando em um aumento de suas dimensões, enquanto a contração se dá pela perda de umidade, levando a redução de seu volume (THYBRING e FREDRIKSSON, 2021). Essas variações na umidade provocam modificações dimensionais, resultando em uma série de defeitos estruturais e estéticos, limitando o seu uso e aplicabilidade (SCHULZ *et al.*, 2020a). Essa característica é

considerada um dos fatores mais críticos que influenciam a durabilidade e a longevidade das estruturas de madeira, afetando significativamente sua resistência a degradação ao longo do tempo (ZHANG *et al.*, 2023).

Em meio aos desafios associados às propriedades físicas da madeira, a modificação térmica surge como uma alternativa para modificar essas características. Em relação à estabilidade dimensional, ocorre uma redução nos valores de inchamento e contração, aumentando a estabilidade da madeira proporcionalmente ao aumento da temperatura do tratamento (MANGINI, 2023).

A densidade também é afetada pelo processo, com tendência à redução em temperaturas mais severas, devido à perda de massa resultante principalmente da degradação das hemiceluloses (PAULA, 2021). A higroscopicidade da madeira é reduzida, resultando em menor teor de umidade de equilíbrio (MEDEIROS *et al.*, 2021). Além disso, a permeabilidade tende a diminuir, especialmente em madeiras de coníferas, devido ao fechamento de pontuações e à formação de tiloses (GÉRARDIN, 2016).

A higroscopicidade da madeira influencia tanto sua estabilidade dimensional quanto sua suscetibilidade à deterioração por fungos (GOODELL *et al.*, 2020). Os fungos, organismos decompositores naturais, utilizam os polímeros naturais da parede celular da madeira, como fonte de alimento (BRODA e PLAZA, 2023; NETO *et al.*, 2024), e embora sejam essenciais para a decomposição e reciclagem de materiais lignocelulósicos na natureza, representam um desafio significativo para aplicações de longa duração da madeira (GOODELL *et al.*, 2020; BANIK *et al.*, 2024).

O processo de modificação térmica atua como um aliado contra essas intempéries, aumentando a resistência da madeira ao ataque de fungos através de diferentes mecanismos. Durante o processo, ocorrem modificações químicas que reduzem a higroscopicidade do material e alteram a disponibilidade de nutrientes para os microrganismos (KILINÇARSLAN e TÜRKER, 2021). Além disso, o tratamento térmico promove a reticulação da lignina, reduzindo o teor de umidade e intensificando sua função natural como fungicida (LAUDARES *et al.*, 2023).

3.4. Propriedades Mecânicas

A madeira pode ser descrita como um material ortotrópico, ou seja, apresenta propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções de três eixos mutuamente perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial (SENALIK e FARBER, 2021). As propriedades mecânicas da madeira determinam sua capacidade de resistir a forças externas, sendo classificadas em propriedades de elasticidade (rigidez) e de resistência (ABNT NBR 7190 (2022)). Devido à sua natureza ortotrópica, essas propriedades variam significativamente conforme a direção das fibras em relação à força aplicada, sendo tradicionalmente medidas nas direções paralela e perpendicular às fibras.

As propriedades de elasticidade se referem à capacidade da madeira de retornar à sua forma original após a remoção de uma carga aplicada (SOUZA, 2023). Por outro lado, as propriedades de resistência representam os limites máximos que a madeira pode suportar antes da ruptura, sendo determinadas através de ensaios destrutivos que avaliam sua capacidade de resistir a diferentes tipos de esforços, como compressão paralela e perpendicular às fibras, tração, cisalhamento e flexão (SENALIK e FARBER, 2021). Dentre essas propriedades, a resistência à flexão estática destaca-se como uma das mais importantes (ARRIAGA *et al.*, 2023), permitindo a determinação tanto do módulo de elasticidade (MOE) quanto do módulo de ruptura (MOR).

Os métodos não destrutivos permitem estimar as propriedades físicas e mecânicas do material, apresentando correlação com as propriedades mecânicas estáticas, sendo realizado de forma rápida e eficiente, sem destruir o material (FATHI *et al.*, 2021, SILVA *et al.*, 2023). Essa avaliação é utilizada com objetivo de avaliar as propriedades da madeira, destacando os ensaios de vibração (em diferentes modos de excitação) e a propagação de ondas ultrassônicas (MELO *et al.*, 2021).

Todas essas propriedades são afetadas pelo processo de modificação térmica, onde ocorre a modificação química dos polímeros da parede celular, sendo responsável pelas mudanças nas propriedades mecânicas, principalmente a perda de resistência e o aumento da fragilidade (GAFF *et al.*, 2023). Essas alterações são influenciadas por diversos fatores durante o tratamento térmico, como temperatura, duração do processo, nível de oxigênio, dimensões da peça e umidade relativa da atmosfera de aquecimento (ADIBASKORO *et al.*, 2021).

Portanto, a caracterização das propriedades mecânicas da madeira envolve a compreensão de sua natureza ortotrópica e o comportamento distinto entre elasticidade e

resistência. A combinação de métodos tradicionais e não destrutivos oferece uma avaliação mais completa do material, permitindo o monitoramento das alterações causadas pela modificação térmica.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Obtenção e preparo do material

O estudo abrangeu madeiras de três espécies distintas: *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. As toras de madeira de *Eucalyptus* sp. foram obtidas da área experimental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e submetidas ao processo de desdobro em pranchas. As tábuas de *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. foram provenientes de doações realizadas por uma empresa do setor moveleiro. Todas as madeiras foram dispostas em pilhas para secagem natural ao ar livre até atingirem umidade de 12% (± 2). A preparação dos corpos de prova foi realizada na Marcenaria do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM) da UFES, localizada em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo.

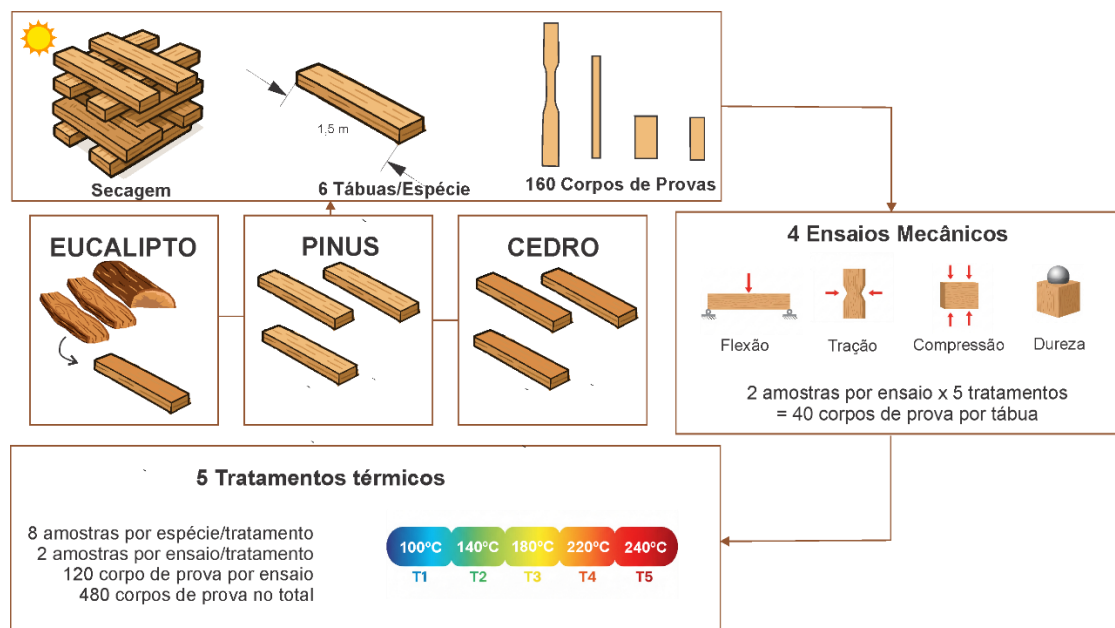


Figura 1 - Esquema de preparação dos corpos de prova para modificação térmica. Fonte:

Próprio autor.

Em relação a amostragem do experimento, foram estudadas oito amostras por espécie/tratamento. Foram utilizadas aproximadamente seis tábuas por espécie para confeccionar todos os corpos de prova, sendo retirados de cada conjunto de tábuas duas amostras por ensaio/tratamento. Esta metodologia resultou em um total de 120 corpos de prova por ensaio, compreendendo 480 corpos de prova no total. Todo o processo seguiu as especificações estabelecidas pela Norma Brasileira (NBR 7190:2022), que determina as dimensões dos corpos de prova e características apropriadas para cada tipo de ensaio mecânico.

4.1.1. Processo de modificação térmica

O processo de modificação térmica foi conduzido utilizando um sistema constituído por uma estufa com circulação mecânica, da marca FANEM, modelo 320 E. Dentro da estufa, foram dispostos dois reatores, cada um equipado com quatro gavetas, contando com orifícios para entrada e troca de calor em todos os lados, permitindo uma circulação homogênea. Foram instalados termopares em cada reator e na estufa, que foram conectados a um datalogger, permitindo o monitoramento e registro contínuo das temperaturas em tempo real, tanto no interior da estufa quanto dentro dos reatores. As modificações térmicas foram conduzidas no Laboratório Multiusuário de Energia da Biomassa (LEB) no DCFM/UFES. Os corpos de prova, previamente identificados, foram dispostos evitando sobreposições, organizados nas gavetas por espécie e tamanho. Em seguida, foram inseridos no reator para o processo, onde as amostras das três espécies foram distribuídas nos reatores. Com o intuito de assegurar a homogeneidade das condições de tratamento para cada conjunto de amostras, o processo foi conduzido separadamente para cada tipo de ensaio, garantindo que corpos de prova destinados ao mesmo ensaio mecânico fossem tratados simultaneamente, sendo as dimensões respaldadas pela NBR 7190 (2022). O esquema metodológico do processo está ilustrado na Figura 2.

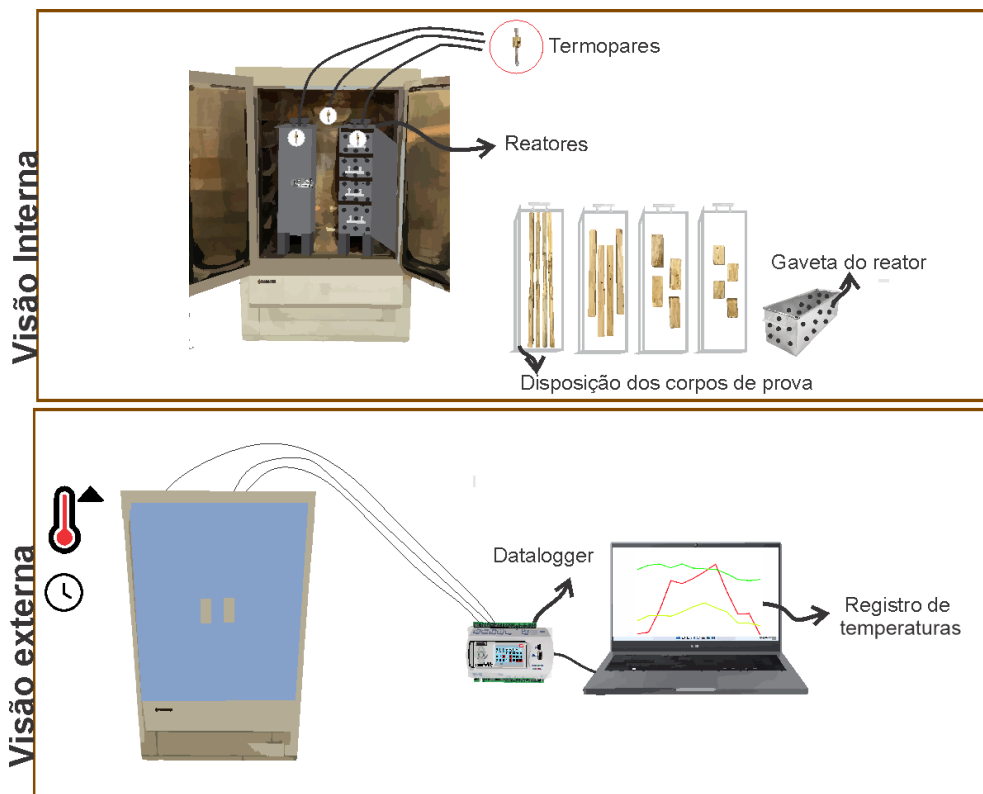


Figura 2 - Esquema metodológico do processo de modificação térmica em três espécies distintas e quatro temperaturas. Fonte: próprio autor.

O processo de modificação térmica inicia-se com a temperatura ambiente de 30°C. A partir desse ponto, aplica-se uma rampa de aquecimento controlado, onde a temperatura é gradualmente elevada a uma taxa de 0,3°C por minuto até atingir a temperatura final desejada, que varia entre 140°C e 240°C, dependendo do tratamento específico. Após 12 horas do fim do processo, as amostras são novamente pesadas.

O processo foi conduzido seguindo uma rampa de aquecimento dividida em quatro segmentos principais (Figura 3). Neste contexto, o primeiro (SP0 – SP01), o segundo (SP1 - SP2) e o quarto (SP3 – SP4) segmentos são idênticos para todas as temperaturas de modificação. No entanto, a diferenciação ocorre especificamente no terceiro segmento (SP2 – SP3), onde há a elevação da temperatura até o patamar final de interesse, de acordo com o tratamento específico aplicado.

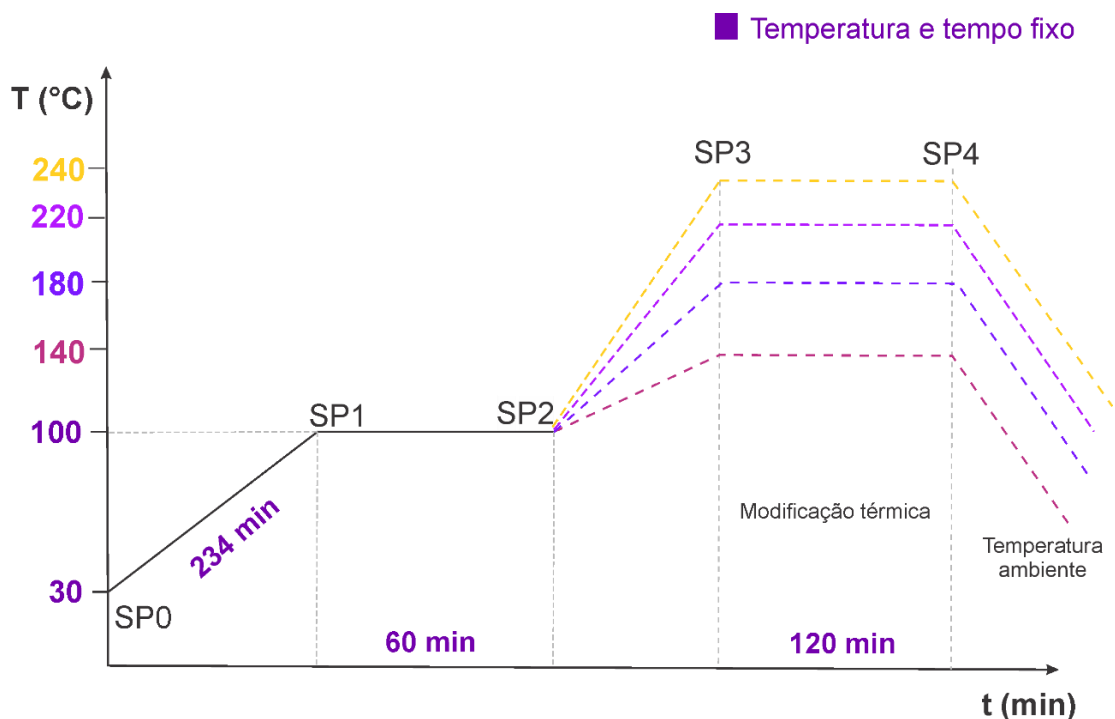


Figura 3 - Rampa de aquecimento geral com quatro segmentos para o processo de modificação térmica de madeiras. Fonte: próprio autor.

No primeiro segmento, as amostras são submetidas a um aquecimento gradual até 100 °C, temperatura que é mantida constante por uma hora, constituindo o segundo segmento. O terceiro segmento consiste na elevação da temperatura até o patamar final do processo. No quarto e último segmento, a temperatura máxima é mantida por duas horas, período no qual ocorre efetivamente o processo de modificação térmica. Após a conclusão, o equipamento é desligado, de modo que atinja novamente a temperatura ambiente.

4.2 Análise química da madeira

4.2.1. Preparo das amostras

As amostras foram moídas no moinho de facas modelo MA1680 da marca Marconi (Figura 4). O processo de moagem foi realizado utilizando uma velocidade de rotação de 1725 rpm, com peneiras acopladas ao equipamento para classificação granulométrica do material.

Após a moagem inicial, o material foi submetido a uma separação granulométrica através de peneiramento, utilizando-se um conjunto de peneiras com malha mesh 60 (0,250 mm). Para os ensaios subsequentes, foi selecionado apenas o material retido nesta peneira garantindo homogeneidade e padronização do tamanho das partículas.

Para cada tratamento específico e para cada espécie de madeira, foram coletadas subamostras do mesmo tratamento e da mesma espécie que foram posteriormente misturadas entre si. Esta forma de amostragem composta foi adotada para minimizar possíveis variações dentro do mesmo tratamento. As amostras múltiplas foram devidamente identificadas com códigos específicos que indicavam a espécie de madeira e o tratamento aplicado, totalizando 15 amostras no final (5 amostras por espécie × 3 espécies).

De cada amostra múltipla classificada, foram separadas porções de 10 gramas para a realização das análises subsequentes, utilizando-se balança analítica com precisão de 0,001 g. Estas alíquotas foram acondicionadas em recipientes herméticos para preservar suas características até o momento das análises.



Figura 4 - Preparo das amostras de madeira para as análises químicas. Fonte: Próprio autor.

4.2.2. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

O ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi realizado utilizando um espectrofotômetro da Bruker modelo Tensor 27, equipado com acessório universal de Refletância Total Atenuada (ATR). Para o preparo das amostras, foram utilizadas 10,0 g de madeira de cada tratamento (controle e modificada termicamente), com granulometria padronizada de 60 mesh.

Os espectros foram obtidos na região do infravermelho médio, compreendendo o intervalo de número de onda de 4000 a 500 cm^{-1} , com resolução espectral de 4 cm^{-1} e acúmulo de 32 varreduras por amostra. Antes de cada leitura, foi realizada uma varredura de background (branco) para minimizar interferências atmosféricas. A análise foi conduzida na Central Analítica II do Departamento de Agroquímica no Centro de Ciências Agrárias e Engenharias (CCAIE) da UFES.

4.2.3. Difração de Raios X (DRX)

O ensaio de DRX foi realizado em um difratômetro de raios X Rigaku Miniflex, na faixa angular 2θ , entre 5 °C e 60°C e taxa de varredura de 2°/min. As análises foram realizadas em duplicata no Laboratório de Análises Químicas e Caracterização dos Materiais, pertencente ao Departamento de Engenharia Química do CCAIE/UFES. Os difratogramas obtidos foram plotados e analisados para determinar o índice de cristalinidade da celulose e identificar possíveis alterações na estrutura cristalina da madeira resultantes do processo de modificação térmica.

A cristalinidade relativa foi calculada para as duplicatas através do método de Segal (Equação 1), com auxílio de um software de análise de dados. Este método, desenvolvido por Segal *et al.* (1959), baseia-se na análise dos difratogramas obtidos por DRX para quantificar a proporção entre as regiões cristalinas e amorfas presentes na estrutura da celulose.

$$ICr (\%) = \left(\frac{I_{200} - I_{am}}{I_{200}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

I_{200} : representa a intensidade máxima do pico de difração do plano (200) da celulose cristalina, localizado em $2\theta \approx 22,5^\circ$.

I_{am} : corresponde à intensidade mínima entre os picos (110) e (200), geralmente observada em $2\theta \approx 18^\circ$, relacionada à região menos ordenada da celulose.

4.2.4. *Análise Termogravimétrica (TG/DTG)*

As análises termogravimétricas (TG) foram realizadas no equipamento LabSys EVO do Laboratório de Análises Químicas e Caracterização dos Materiais pertencente ao Departamento de Engenharia Química, CCAE/UFES. A partir dos ensaios é possível analisar a perda de massa (TG) e sua derivada (DTG) durante o aquecimento das amostras de madeira, fornecendo dados detalhados sobre a decomposição térmica dos materiais. As análises foram conduzidas sob atmosfera controlada de nitrogênio, assegurando ambiente inerte e prevenindo reações de oxidação.

A faixa de temperatura utilizada foi de 25°C a 900°C , com isotermas nas temperaturas de tratamento consideradas críticas. O protocolo de aquecimento consistiu em elevar a temperatura a $10^\circ\text{C}/\text{min}$, seguindo as seguintes etapas: de 25°C para 140°C seguido de isoterma de 10 minutos, de 140°C para 180°C seguido de isoterma de 10 minutos, de 180°C para 220°C seguido de isoterma de 10 minutos, de 220°C para 240°C seguido de isoterma de 15 minutos e, finalmente, de 240°C para 900°C sem isoterma adicional.

4.3. Propriedades físicas

4.3.1 *Densidade aparente*

A determinação da densidade aparente foi conduzida em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 7190 (2022), com adaptações específicas para o presente estudo. O procedimento experimental consistiu na obtenção das dimensões lineares utilizando paquímetro digital e das massas em balança analítica em dois

momentos: antes da aplicação dos tratamentos térmicos e após a conclusão dos mesmos. A densidade aparente foi calculada pela razão entre massa e volume ($\rho = m/V$), sendo os resultados expressos pela média.

4.3.2 Molhabilidade da superfície

Para avaliar a molhabilidade da superfície da madeira, utilizou-se o método do ângulo de contato, uma técnica não destrutiva que permite quantificar a interação entre a superfície da madeira e líquidos, seguindo as diretrizes da norma ASTM D7334 (2022), estabelecida pela própria marca do equipamento. Foram utilizados corpos de prova de 5 x 1 x 5 cm preparados a partir das amostras de madeira de *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp., incluindo amostras controle e amostras submetidas aos diferentes tratamentos térmicos.

O aparelho utilizado foi o goniômetro equipado com uma câmera de alta resolução e software de análise de imagem para medir o ângulo de contato. Uma gota de água destilada de 5 μ L foi depositada na superfície de cada amostra usando uma seringa de alta precisão modelo Injekt – F (DS-D 1000 SF) e agulha SNS-D 051/025, com diâmetro externo de 0,51 mm e diâmetro interno de 0,25 mm, e imagens foram capturadas em intervalos de 1 segundo durante 60 segundos (Figura 5). O ângulo de contato inicial ($t = 0s$) e após 60 segundos foram registrados.

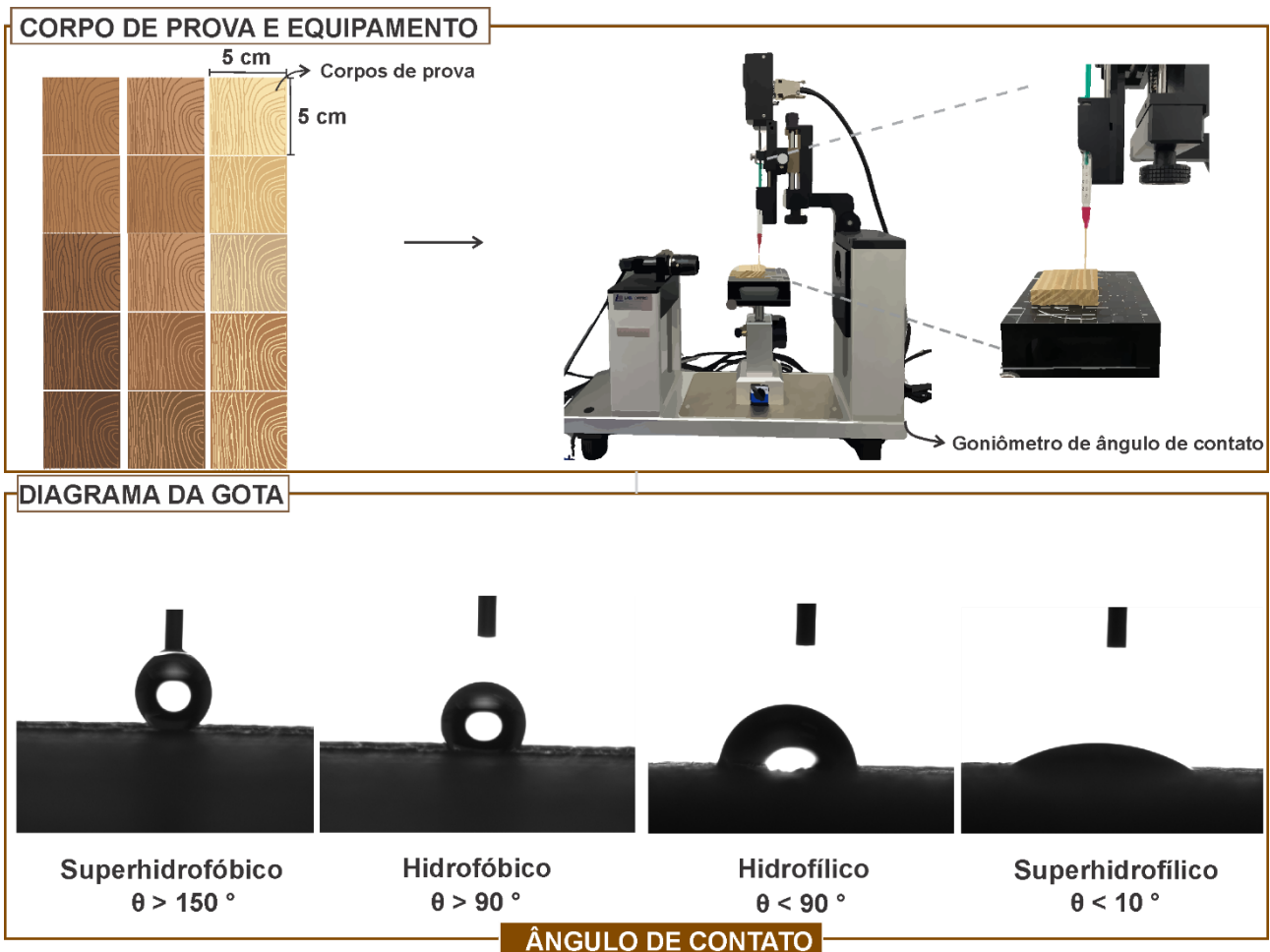


Figura 5 - Esquema do ensaio de molhabilidade utilizando goniômetro para madeiras modificadas termicamente. Fonte: Próprio autor.

Realizaram-se três medições em diferentes pontos de cada amostra para garantir a representatividade dos resultados, calculando a média e o desvio padrão dos ângulos de contato para cada amostra, sendo os resultados analisados estatisticamente para determinar diferenças significativas entre as amostras controle e as tratadas termicamente. Ângulos de contato menores que 90° foram interpretados como indicativos de alta molhabilidade, enquanto ângulos maiores que 90° sugeriram baixa molhabilidade. A variação do ângulo de contato ao longo do tempo foi utilizada para avaliar a dinâmica de absorção da água pela madeira.

4.3.3 Colorimetria

A caracterização colorimétrica das amostras é realizada na superfície longitudinal da madeira utilizando um espectrofotômetro modelo CM-2500D da marca Konica Minolta, previamente calibrado para garantir a precisão das medições (Figura 6). O sistema de cor CIELAB (1976) é adotado como referência para a avaliação dos parâmetros colorimétricos. As medições são realizadas em dois modos distintos: SCI (Componente Especular Incluso) e SCE (Componente Especular Excluído). O modo SCI considera tanto a reflexão difusa quanto a especular, permitindo avaliar a cor verdadeira do material independente de suas características superficiais, enquanto o modo SCE exclui a componente especular da reflexão, fornecendo valores que se aproximam da percepção visual humana ao desconsiderar o brilho superficial.

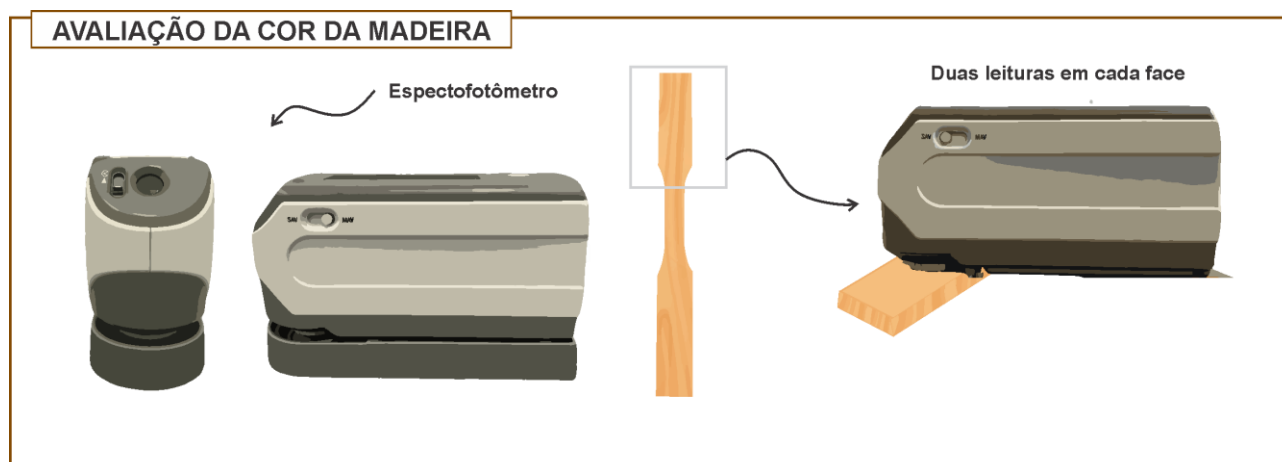


Figura 6 – Esquema de avaliação da cor das madeiras modificadas termicamente. Fonte: Próprio autor.

Para cada espécie de madeira e tratamento, são efetuadas quatro medições por amostra, sendo duas na face frontal e duas na face posterior, totalizando 32 leituras por tratamento e 160 para cada espécie. Os valores médios dessas medições são utilizados para a análise dos parâmetros colorimétricos, que incluem: claridade (L^*), coordenada vermelho-verde (a^*) e coordenada azul-amarelo (b^*). Após esses procedimentos, são calculados os valores de saturação (C) e ângulo de tinta (h^*). A classificação das cores das madeiras seguirá a tabela desenvolvida por Camargos e Gonzalez (2001).

Os valores de saturação da cor (C) e ângulo de tinta (h^*) foram calculados para a caracterização da cor das espécies pelas seguintes equações:

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

$$h^* = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (3)$$

4.4. Propriedades mecânicas

4.4.1. Propagação de ondas por excitação

O ensaio de propagação de ondas de excitação é realizado utilizando o equipamento Sonelastic, seguindo as diretrizes da norma American Society for Testing and Materials - ASTM E1876 (2022). Para o ensaio, são utilizados os mesmos corpos de prova preparados para o ensaio de flexão estática. Inicialmente, as dimensões e massa dos corpos de prova são medidas com auxílio de um paquímetro digital e uma balança analítica, e posteriormente inseridas no software do equipamento, que analisa as respostas acústicas captadas por um microfone após impulsos manuais realizados com o pulsador.

Os ensaios são conduzidos nas condições de contorno longitudinal e flexional. Para isso, são feitas marcações nas amostras a uma distância de $0,224L$ a partir das extremidades para os ensaios longitudinal e flexional, sendo L o comprimento total da amostra. Respeitadas as condições de contorno, aplica-se a transformada de Fourier para obter os espectros de frequências naturais e seus módulos de elasticidade dinâmicos (OTANI e PEREIRA, 2013).

São avaliados diferentes modos de vibração, adequando-se o posicionamento estratégico do microfone e a localização do impulso manual. A Figura 7 demonstra as configurações utilizadas para cada modo de vibração.

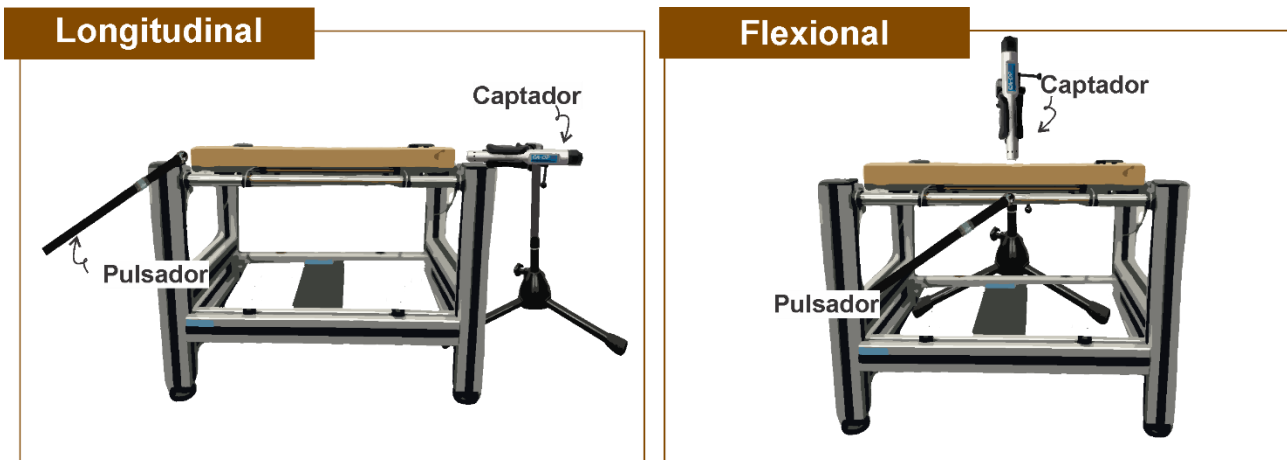


Figura 7 - Demonstração experimental dos modos fundamentais de vibração mecânica (longitudinal e flexional) em corpos de prova, excitados através de pulsador manual e monitorados por transdutor acústico. Fonte: próprio autor.

Para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal (MOEd), utiliza-se a Equação 4:

$$MOE_d = 4 m f l^2 \left[\frac{L}{b t K} \right] \quad (4)$$

Onde: MOEd é o módulo de elasticidade dinâmico (Pa) determinado a partir do modo longitudinal; m é a massa do corpo de prova (g); L é o comprimento do corpo de prova (mm); b é a largura do corpo de prova (mm); t é a espessura do corpo de prova (mm); fl é a frequência fundamental para a amostra em modo longitudinal (Hz); e K é o fator de correção.

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) utilizando a condição de contorno flexional, é necessário aplicar um fator de correção denominado T1. Esse fator leva em consideração a influência da geometria do corpo de prova e do coeficiente de Poisson (μ) do material, sendo calculado pela Equação 5:

$$T1 = 1 + 6,585 (1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) - \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left[\frac{8,34 (1+0,2023\mu+2,173\mu^2)\left(\frac{t}{L}\right)^4}{1+6,338 (1+0,1408\mu+1,536\mu^2)\left(\frac{t}{L}\right)^2} \right] \quad (5)$$

Onde: T1 é o fator de correção para o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico; μ é o coeficiente de Poisson do material; t é a espessura do corpo de prova (mm); e L é o comprimento do corpo de prova (mm).

O fator de correção T1 é então aplicado na Equação 6 para calcular o módulo de elasticidade dinâmico nas condições de contorno flexional:

$$MOE_d = 0,9465 \left(\frac{m f_f^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T1 \quad (6)$$

Onde: MOEd é o módulo de elasticidade dinâmico; m é a massa do corpo de prova (g); ff é a frequência fundamental para a amostra em modo flexional; b é a largura do corpo de prova (mm); L é o comprimento do corpo de prova (mm); t é a espessura do corpo de prova (mm); e T1 é o fator de correção calculado anteriormente.

4.4.2. Propagação de ondas ultrassônicas

Os ensaios de propagação de ondas ultrassônicas foram realizados seguindo as diretrizes da ASTM E494 (2015), utilizando os mesmos corpos de prova preparados para o ensaio de flexão estática. Foram empregados dois equipamentos de ultrassom distintos, sendo eles V-Meter MK e UltraSonic Timer, com transdutores operando em frequências de 500 kHz e 90 kHz, respectivamente (Figura 8).



Figura 8 – Equipamentos V-Meter MK e UltraSonic Timer utilizados para caracterização não destrutiva de madeiras através do método direto. Fonte: próprio autor.

Para realização do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas, dois transdutores são acoplados nas seções transversais do CP. Para o equipamento com transdutor operando a 500 kHz, utiliza-se o auxílio de um gel, para garantir o contato adequado entre as superfícies. No equipamento com transdutor tipo agulha, operando a 90 kHz, os

transdutores são inseridos na superfície da madeira. Em ambos os equipamentos, um transdutor atua como emissor do sinal da onda, enquanto o outro funciona como receptor. As medições são realizadas ao longo do comprimento do corpo de prova, com os transdutores posicionados em faces opostas, sendo o tempo de propagação registrado em microssegundos. Com base nesse tempo e na distância percorrida pela onda (que corresponde ao comprimento do CP), é possível calcular a velocidade de propagação da onda.

A velocidade de propagação (V) é calculada utilizando a Equação 7:

$$V = L / (t \times 10^{-6}) \quad (7)$$

Onde: V = Velocidade de propagação da onda (m/s) L = Comprimento do corpo de prova ou distância entre os transdutores (m) t = Tempo de propagação da onda (μ s)

A partir da velocidade de propagação, calculou-se o módulo de elasticidade Dinâmico (MOEd) utilizando a Equação 8:

$$MOEd = V^2 \times \rho \times 10^{-6} \quad (8)$$

Onde: MOEd = Módulo de elasticidade dinâmico (MPa) V = Velocidade de propagação da onda (m/s) ρ = Densidade do material (kg/m^3)

4.4.3 Ensaio mecânicos estáticos

Os ensaios mecânicos destrutivos de flexão estática, tração paralela às fibras, dureza Janka normal às fibras e compressão paralela às fibras, são realizados na máquina de ensaios universal EMIC (modelo DL 10000) no Laboratório de Anatomia da Madeira no DCFM/UFES (Figura 9). O procedimento é conduzido em conformidade com a norma ABNT NBR 7190 (2022), utilizando uma célula de carga de 10000 N e carregamento monotônico crescente correspondente a uma taxa de 10 MPa/min, aplicando a carga de forma contínua até o limite de resistência.

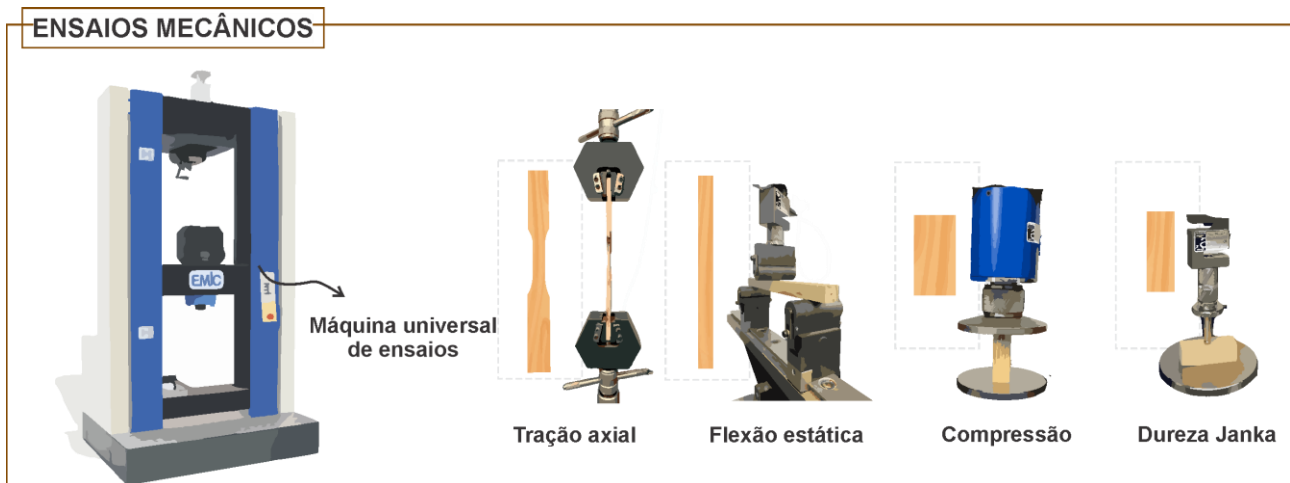


Figura 9 – Máquina universal de ensaios e configuração para os ensaios mecânicos de tração, flexão, compressão e dureza Janka. Fonte: próprio autor.

4.5. Delineamento experimental e análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando estatística descritiva (média e desvio padrão), seguida de Análise de Variância (ANOVA) e teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparação entre tratamentos térmicos. Para avaliar o coeficiente de determinação entre métodos não destrutivos e ensaios estáticos foi aplicada análise de regressão linear com coeficiente de determinação (R^2). A análise de correlação de Pearson foi utilizada para relacionar densidade aparente com propriedades mecânicas. Todas as análises foram realizadas em um software de análise de dados com nível de significância de 5%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análises químicas

5.1.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Com base nos espectros de FTIR (Figura 10), observa-se que as três espécies apresentaram perfis espectrais semelhantes, com as mesmas bandas características,

porém com comportamentos distintos quanto à intensidade de degradação. Durante o processo de modificação térmica ocorrem alterações químicas influenciadas por fatores como temperatura, tempo e atmosfera do equipamento. Como diversas reações ocorrem ao mesmo tempo e competem entre si, os resultados variam conforme as condições específicas utilizadas, explicando as divergências encontradas na literatura científica sobre o assunto (KUBOVSKÝ *et al.*, 2020). Todas as espécies mostram alterações na intensidade das bandas com a modificação térmica, confirmando que o processo altera significativamente a composição química da madeira.

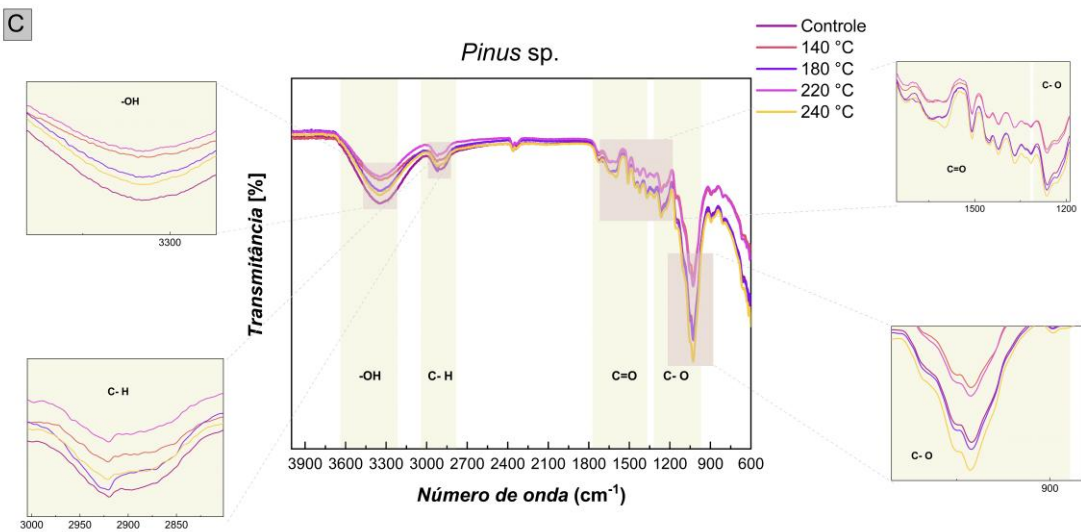
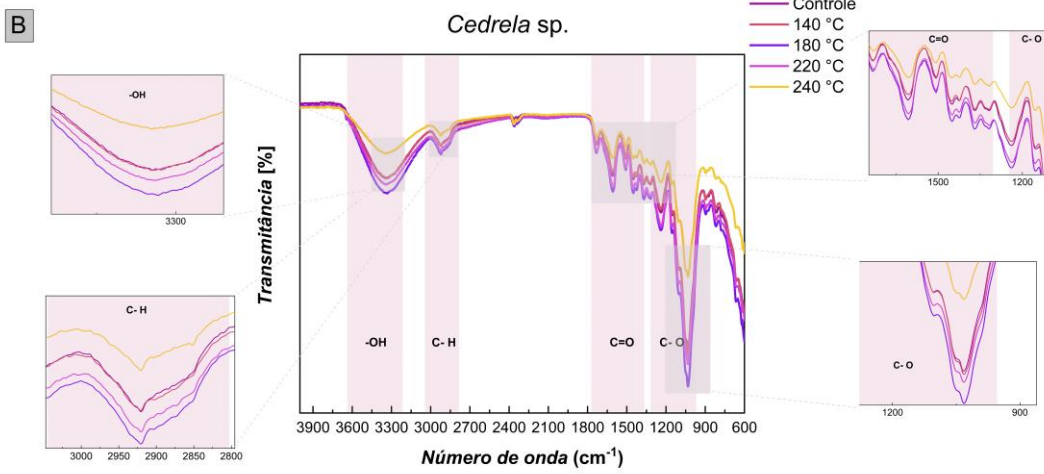
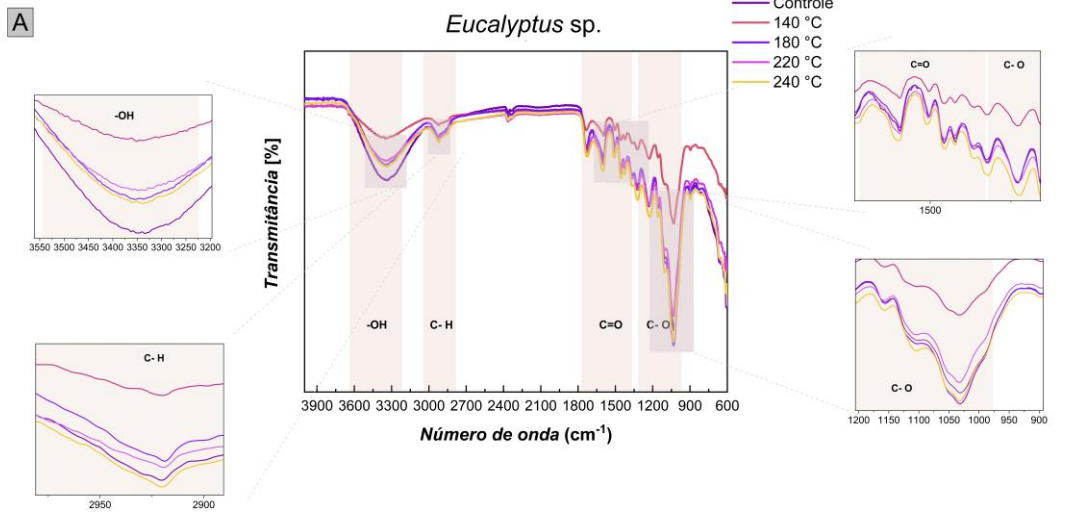


Figura 10 - Espectros de FTIR das madeiras de (a) *Eucalyptus* sp., (b) *Cedrela* sp. e (c) *Pinus* sp. submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica. Fonte: próprio autor.

Na região do espectro entre 3600 e 2900 cm^{-1} , característica dos grupos hidroxilas (OH) e das ligações C-H, observou-se uma tendência de redução da intensidade da banda com o aumento da temperatura de modificação térmica para as três espécies. Apesar da tendência semelhante entre as bandas, as espécies demonstraram comportamentos distintos quanto à intensidade da degradação dos grupos OH.

Eucalyptus sp. destacou-se entre as três espécies estudadas por apresentar alterações mais perceptíveis nos espectros associados às bandas de hidroxilas na temperatura de 140 °C. Diversos pesquisadores que estudaram a modificação térmica da madeira de eucalipto identificaram essa temperatura como importante do ponto de vista das modificações químicas e estruturais, representando um ponto de transição no comportamento da madeira durante a modificação térmica (SORATTO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2015). Soratto *et al.* (2020) constataram que em temperatura de 140 °C se iniciam modificações químicas nos constituintes da madeira de eucalipto, principalmente nas hemiceluloses. De forma complementar, Zhang *et al.* (2015), ao investigarem madeiras de *Eucalyptus regnans*, identificaram que tratamentos térmicos à 140°C e 200°C, representam pontos críticos de degradação, resultando em significativa redução das propriedades mecânicas do material. A espécie sendo rica em unidades siringil e hemiceluloses altamente acetiladas, apresenta maior sensibilidade ao tratamento térmico em temperaturas menores, onde ocorre um rearranjo das ligações de hidrogênio e substituição seletiva de grupos hidroxila (ESTEVES *et al.*, 2013), sem a degradação extensiva de componentes estruturais que normalmente acontece em temperaturas mais elevadas (SIKORA *et al.*, 2018). Essas características explicam a maior redução no teor de hidroxilas observada na temperatura de 140 °C, onde os grupos funcionais correspondentes às unidades siringil da lignina (bandas na região de 1330-1325 cm^{-1} para vibração do anel aromático siringil e 1230-1220 cm^{-1} para estiramento C-O) sofrem transformações preferenciais em relação às unidades guaiacil (bandas na região de 1270-1260 cm^{-1} para estiramento C-O) em menores temperaturas, conforme demonstrado por Kubovský *et al.* (2020). O espectro mostra que a maior variação da transmitância ocorre nas bandas referentes a OH (3600-2900 cm^{-1}) e nas regiões das

unidades de siringil ($1330\text{-}1325\text{ cm}^{-1}$), principalmente à $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, confirmando a que *Eucalyptus* sp. apresenta alterações mais perceptíveis já na menor temperatura estudada, principalmente devido à maior reatividade das unidades siringil da lignina.

Pinus sp. apresentou o comportamento mais estável dentre as espécies, sendo mais pronunciado a 220°C . A homogeneidade observada nas bandas espectrais da espécie, mostram uma maior resistência térmica, que pode ser explicada por características químicas e estruturais específicas das coníferas, como o menor teor de holocelulose, que são mais suscetíveis a degradação, e maior proporção relativa de lignina (SCHULZ *et al.*, 2020a). Esse fator pode ser responsável pela menor perda de integridade estrutural da espécie, que é um importante desafio a ser superado no processo de modificação térmica (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2024). Além disso, a estrutura anatômica da espécie é mais homogênea, e tendem a apresentar maior resistência às alterações térmicas iniciais (LENGOWSKI, 2021).

A espécie *Cedrela* sp., por sua vez, demonstrou um comportamento menos previsível durante o tratamento, com o controle similar às madeiras modificadas termicamente à $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Observa-se que a espécie apresenta valores de transmitância mais baixos ao longo de todo o espectro, característica explicada pela própria natureza do cedro, que possui naturalmente menor transmitância, indicando maior concentração inicial de grupos OH. O comportamento divergente observado ao longo de todos os espectros para a espécie, é destacado também pela maior variabilidade na transmitância. Estas observações estão em concordância com os estudos de Esteves e Pereira (2009), que estabelecem uma correlação direta entre o teor inicial de grupos OH na madeira e a magnitude das alterações químicas resultantes do tratamento térmico.

A diminuição na intensidade das bandas entre $3600\text{ e }2900\text{ cm}^{-1}$ observada para todas as espécies estudadas, está associada à decomposição de hidroxilas da parede celular da madeira, resultante das reações de condensação e oxidação que ocorrem durante o processo de modificação térmica (KUBOVSKÝ *et al.*, 2020; MEDEIROS, 2021). Estas reações levam à formação de novas moléculas, como ésteres, éteres e compostos carbonílicos, além de furfural e hidroximetilfurfural pela desidratação de açúcares (BOONSTRA *et al.*, 2006; WU *et al.*, 2021). Tais transformações reduzem os grupos OH livres e liberam água, o que contribui para a diminuição da higroscopicidade da madeira e,

consequentemente, para a melhoria de sua estabilidade dimensional (HILL *et al.*, 2021; ZELINKA *et al.*, 2022).

Entretanto, observa-se que em determinadas condições de tratamento, pode ocorrer um aumento da intensidade das bandas associadas aos grupos OH, demonstrado pelas madeiras de *Cedrela* sp. a 180 °C e 220 °C. Esse aumento pode ser explicado por múltiplos processos físico-químicos, como a exposição de grupos OH anteriormente inacessíveis devido ao rearranjo conformacional dos polímeros na parede celular que ocorre durante o tratamento térmico (WILLEMS *et al.*, 2019) e a hidrólise parcial de grupos acetil presentes nas hemiceluloses, que libera novos grupos OH detectáveis em análises espectroscópicas (HILL *et al.*, 2021). Estas transformações podem gerar um aumento temporário de grupos OH, que é detectado pelo FTIR, porém tendem a ser consumidos em reações subsequentes de condensação e desidratação à medida que o tratamento térmico progride em temperaturas mais elevadas (ZHANG *et al.*, 2023), como observado na espécie *Cedrela* sp. a 240°C, mantendo a tendência geral de redução da higroscopicidade da madeira modificada termicamente (HILL *et al.*, 2021).

Na região de absorção do grupo carbonila (C=O) e C-O, entre 1730 e 1000 cm^{-1} , observa-se um comportamento variado para as temperaturas e espécies estudadas. Para *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., observou-se uma diminuição da intensidade da banda correspondente, seguido por um aumento à 240 °C. Para madeiras de *Cedrela* sp., observa-se um comportamento inverso, aumentando a intensidade da banda em temperaturas menores, seguido por uma diminuição a 240 °C.

Nas bandas do tratamento controle e 140 °C, as curvas apresentaram-se praticamente sobrepostas, indicando que o tratamento térmico a 140 °C causou alterações mínimas na estrutura química do *Cedrela* sp. A diminuição observada para as espécies, é indicativa do processo químico de desacetilação das hemiceluloses e também de sua degradação parcial (ABREU NETO *et al.*, 2021). A desacetilação, caracterizada pela remoção dos grupos acetil, resulta na redução das bandas C=O, enquanto a degradação parcial das hemiceluloses leva à diminuição das bandas C-O (PENG *et al.*, 2022; PIERNIK *et al.*, 2022).

Nota-se que *Eucalyptus* sp. apresenta uma redução mais acentuada na banda de C=O (1700 – 1740 cm^{-1}) e C-O (principalmente a 1030 cm^{-1}) nas temperaturas de 140 °C e 220 °C, demonstrando um comportamento similar entre as outras bandas. Na temperatura de

240 °C e 180 °C, observa-se um aumento da intensidade nas bandas características de C=O e C-O. Schulz *et al.* (2021) encontraram o mesmo resultado para a espécie em amostras modificadas a 240°C, apresentando um aumento nas bandas associadas a grupos C=O e C-O, demonstrando que nesta temperatura específica ocorre uma alteração no comportamento térmico da madeira de *Eucalyptus* sp. Zhang *et al.* (2023) também corroboram esses resultados, relatando um maior pico de absorção de carbonila para eucalipto à 180 °C.

O comportamento de aumento da intensidade nas bandas correspondentes a C=O e C-O também ocorreu para a madeira de *Pinus* sp., aumentando sua intensidade na temperatura de 240 °C, indicando que este resultado pode ser comum a diferentes espécies madeireiras quando submetidas a tratamentos térmicos em temperaturas mais elevadas. A explicação para este aumento em temperaturas mais altas (particularmente a 240°C) também pode estar relacionada ao alto teor de lignina presente nas amostras, como observado por Li *et al.* (2015) em sua análise da madeira de *Tectona grandis*.

Durante o processo, ocorre oxidação parcial de componentes da madeira, principalmente da lignina, gerando novos grupos carbonila (C=O) e carboxílicos (ZHANG *et al.*, 2023). Segundo Timar *et al.* (2016), a partir de 200°C iniciam-se reações de despolimerização da celulose amorfa e processos oxidativos nas hidroxilas celulósicas, levando à formação de grupos carbonila e carboxílicos. Simultaneamente, conforme explicado por Elrhayam e El Bachiri (2024), ocorrem reações de condensação entre produtos de degradação térmica, formando novas estruturas contendo grupos C=O e C-O.

Os processos químicos ocorridos nas madeiras, resultam em uma estrutura mais compacta e menos higroscópica, melhorando sua estabilidade dimensional (HILL *et al.*, 2021). Esta característica é fundamental para determinar as aplicações adequadas de cada espécie, afetando diretamente seu valor de mercado e potencial uso. Entre as espécies estudadas, observam-se diferenças em relação a estabilidade dimensional. Espécies de rápido crescimento, como *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp., são reconhecidas por sua baixa estabilidade dimensional natural e baixa resistência à água quando não tratadas (WEI *et al.*, 2019; SCHULZ *et al.*, 2021), necessitando de tratamentos específicos para melhorar essas características para aplicações de maior valor.

Em contraste, estudos realizados com o gênero *Cedrela*, indicaram uma excelente estabilidade dimensional natural (FERNANDES *et al.*, 2018), o que explica seu tradicional

uso em aplicações que exigem maior estabilidade, como móveis finos e elementos arquitetônicos. Em contrapartida, seu cerne é geralmente resistente à impregnação com preservativos químicos convencionais (PROTA, 2022), o que limita os métodos tradicionais de proteção contra pragas e deterioração, sendo necessário um meio alternativo como a modificação térmica.

Dessa forma, a modificação térmica para essas espécies pode melhorar significativamente suas propriedades, tanto de estabilidade dimensional quanto de resistência biológica, colocando-as como potenciais substitutos para madeiras nobres em diversas aplicações, representando uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável à exploração de espécies nativas em risco de extinção. No entanto, essas mudanças também podem levar a uma diminuição na resistência mecânica, principalmente na resistência a flexão, devido à redução das hemiceluloses (WANG *et al.*, 2022).

5.1.2 Difração de Raio X

Os resultados obtidos das análises de difração de raios X (Figura 11) e os dados resultantes do cálculo do índice de cristalinidade (ICr) (Tabela 1) demonstram os efeitos da modificação térmica para as madeiras de *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. As alterações observadas nos padrões de difração e nos valores da cristalinidade mostram que as espécies possuem comportamentos diferentes quando submetidas às temperaturas de modificação térmica.

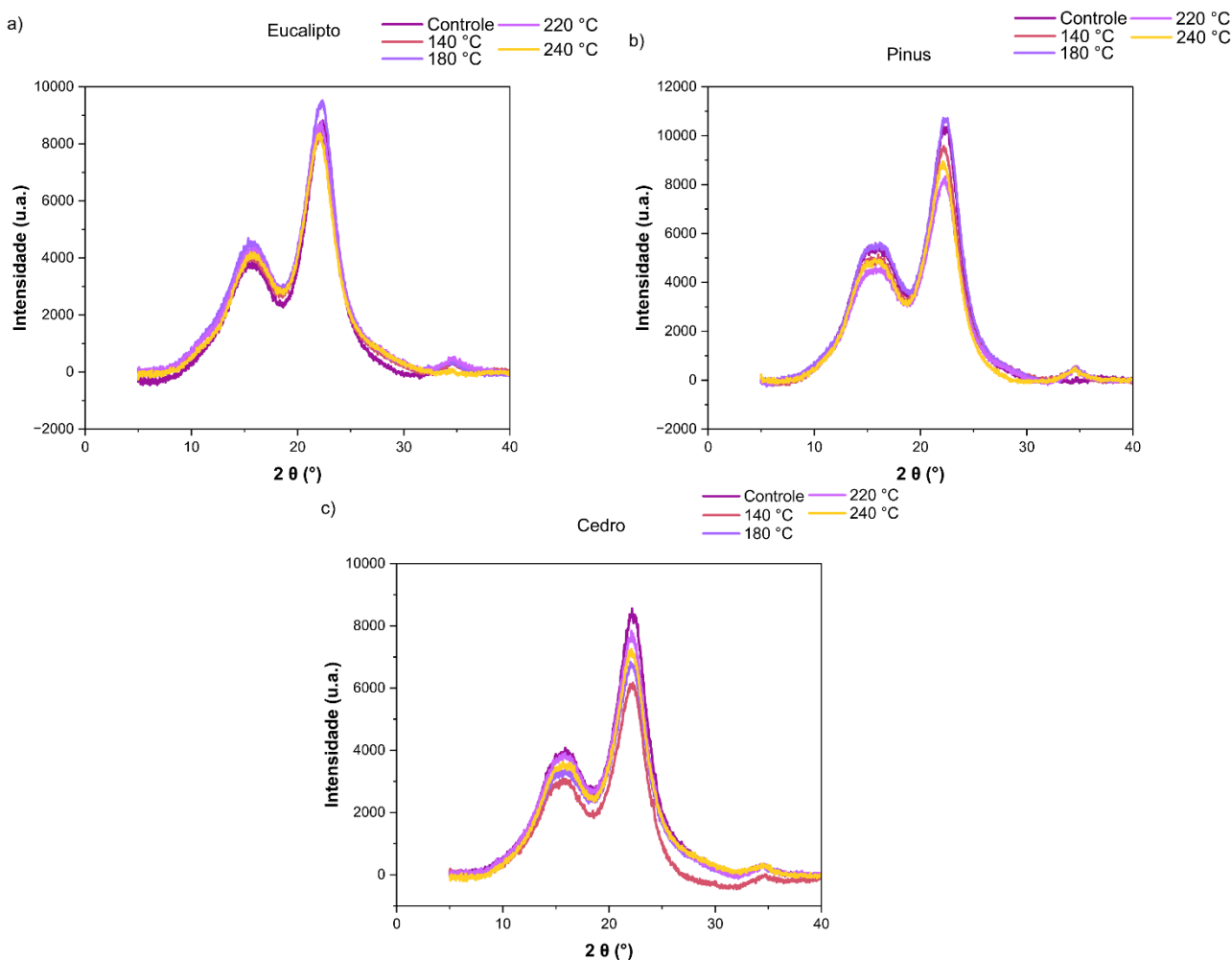


Figura 11 – Difratoqramas de raios X (DRX) das amostras de madeira termicamente modificadas: (a) *Eucalyptus* sp., (b) *Pinus* sp. e (c) *Cedrela* sp. Fonte: próprio autor

Eucalyptus sp. apresentou o maior ICr inicial, exibindo tendência de redução com o aumento da temperatura e atingindo o menor valor a 240 °C. A espécie demonstrou maior sensibilidade inicial ao tratamento térmico, com redução de 7,25% já a 140 °C, contrastando com o comportamento de *Cedrela* sp. e *Pinus* sp., que apresentaram redução de apenas 1,88% e aumento de 0,09%, respectivamente. A maior degradação inicial corrobora os resultados de FTIR, que mostram alterações em todos os espectros nesta temperatura. Este comportamento confirma a maior sensibilidade térmica de *Eucalyptus* sp. em temperaturas mais baixas, conforme discutido por Soratto *et al.* (2020). Cheng *et al.* (2017) em estudos com eucalipto, afirmam que dois processos simultâneos competem durante a modificação térmica da madeira, sendo eles processos de degradação e processos de

reorganização estrutural. Os autores enfatizam que o resultado final observado no índice de cristalinidade representa um balanço líquido entre esses dois processos, e que dependem das condições específicas do tratamento (temperatura, espécie, tempo, umidade, atmosfera) e das características da madeira, podendo resultar em aumento ou diminuição da cristalinidade.

Shen *et al.* (2019) encontraram resultados similares em madeira de eucalipto submetidas a temperaturas de até 150 °C. Os autores relataram uma diminuição progressiva da cristalinidade, atribuindo a desacetilação das hemiceluloses e formação de ácido acético, que contribui para a hidrólise ácida parcial da celulose em altas temperaturas, destruindo a estrutura da celulose e levando a uma diminuição do grau de polimerização, e por fim, diminuindo a cristalinidade. Lourenço *et al.* (2020) corroboram esses resultados, relatando uma diminuição da cristalinidade da celulose em madeiras de *Eucalyptus* spp. submetidos às temperaturas de 160 °C e 230 °C.

Apesar de não haver aumento do ICr em relação ao controle, observa-se uma recuperação da cristalinidade em relação a 140 °C nas temperaturas de 180°C e 220°C, podendo ser explicada pelo rearranjo das cadeias de celulose após a remoção parcial de componentes amorfos, permitindo uma melhor organização das regiões cristalinas remanescentes (WANG *et al.*, 2022).

Tabela 1. Médias do índice de cristalinidade (ICr) calculadas a partir das duplicatas das madeiras de *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica.

Índice de cristalinidade (%)			
Tratamento	<i>Eucalyptus</i> sp.	<i>Cedrela</i> sp.	<i>Pinus</i> sp.
Controle	73,61	68,05	66,69
140 °C	68,27	66,77	66,75
180 °C	69,36	63,68	66,26
220 °C	68,68	65,94	63,50
240 °C	66,42	66,55	65,46

Média geral	69,27 2,61*	66,20 1,91*	65,73 1,60*
CV (%)	3,80%	2,90%	2,40%

Os valores após o asterisco (*) representam o desvio padrão e os valores em % o coeficiente de variação.

Pinus sp. manteve um comportamento mais estável que as outras espécies, sendo sua redução máxima de 4,78% na temperatura de 220 °C. Essa estabilidade é confirmada em seus menores valores de desvio padrão e coeficiente de variação, sendo cerca de 37% inferiores aos de *Eucalyptus* sp. e 17% inferiores aos do *Cedrela* sp. No tratamento a 140 °C observa-se um pequeno aumento no ICr de 0,09%, seguido novamente por reduções. Esse comportamento pode estar relacionado à temperatura de transição vítrea (Tg) de componentes específicos da madeira (SALMEN, 1982; CONCEIÇÃO et al., 2025). O aumento ocorre porque à 140 °C a temperatura está próxima à Tg de componentes amorfos, permitindo a reorganização molecular (MEDEIROS et al., 2022). A estabilidade inicial observada para a espécie, confirma sua maior resistência térmica, atribuída ao seu maior teor de lignina e menor proporção de holocelulose (SCHULZ et al., 2020a), como evidenciado nos resultados obtidos para FTIR no presente estudo.

Para a madeira de *Cedrela* sp., nota-se a mesma tendência de comportamento de *Eucalyptus* sp., apresentando diminuição do ICr para todas as temperaturas testadas. A maior redução observada para a espécie (6,42%) ocorreu na temperatura de 180 °C, comportamento diferente de *Eucalyptus* sp., que apresentou menor diminuição nessa temperatura. Wu et al. (2021) e Cheng et al. (2017) em estudos com *Pinus massoniana* e *Eucalyptus* spp. destacam que a cristalinidade segue um comportamento não linear, e tal variação demonstra a complexidade da relação entre temperatura de modificação térmica e cristalinidade.

A diversidade de resultados encontrados na literatura, mostra que a relação entre a modificação térmica e a cristalinidade é complexa, e depende de diversos fatores, como a natureza do material, as condições específicas do tratamento térmico (incluindo temperatura e duração), e os métodos de análise empregados (KUBOVSKÝ et al., 2020; GARCIA-IRUELA et al., 2021).

5.1.3 Análise Termogravimétrica (TG/DTG)

As curvas termogravimétricas (TG) e de termogravimetria derivada (DTG) das madeiras de *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp. e *Pinus* sp. (Figura 12) nas condições iniciais (controle) nas faixas de 50 °C a 600 °C, destacam as características típicas de perda de massa associadas à eliminação de água e decomposição dos principais componentes lignocelulósicos. As curvas TG representam a perda de massa das amostras (em porcentagem) em função da temperatura, e as curvas DTG correspondem à derivada primeira das curvas TG, representando a taxa de variação da massa residual por grau Celsius (%/°C), em função da temperatura.

Segundo Schulz *et al.* (2020a), a redução percentual da massa em função da temperatura apresenta quatro intervalos distintos, representado por quatro fases características: de 40-150°C ocorre a eliminação da umidade inter e intracelular da madeira; entre 150-380°C acontece a degradação das hemiceluloses; no intervalo de 380-420°C verifica-se a degradação da celulose; e acima de 420°C inicia-se a decomposição da lignina presente na estrutura da madeira. As fases iniciais de degradação mostram pouca variação entre as espécies, refletindo uma estabilidade geral, que será progressivamente alterada com as temperaturas de modificação térmica subsequentes.

No controle, observa-se o comportamento natural da madeira, com perdas associadas à eliminação de água livre (~85 °C) seguida pela degradação das hemiceluloses (~250 °C) e, posteriormente, da celulose (~350 - 365 °C) (SANTOS e SILVA, 2021). A lignina, componente mais resistente da madeira, apresenta degradação mais lenta e contínua, principalmente visível na Fase IV, contribuindo para o resíduo final em altas temperaturas (SILVA, 2024). O comportamento do controle serve de parâmetro para comparar os efeitos da modificação térmica nos outros tratamentos.

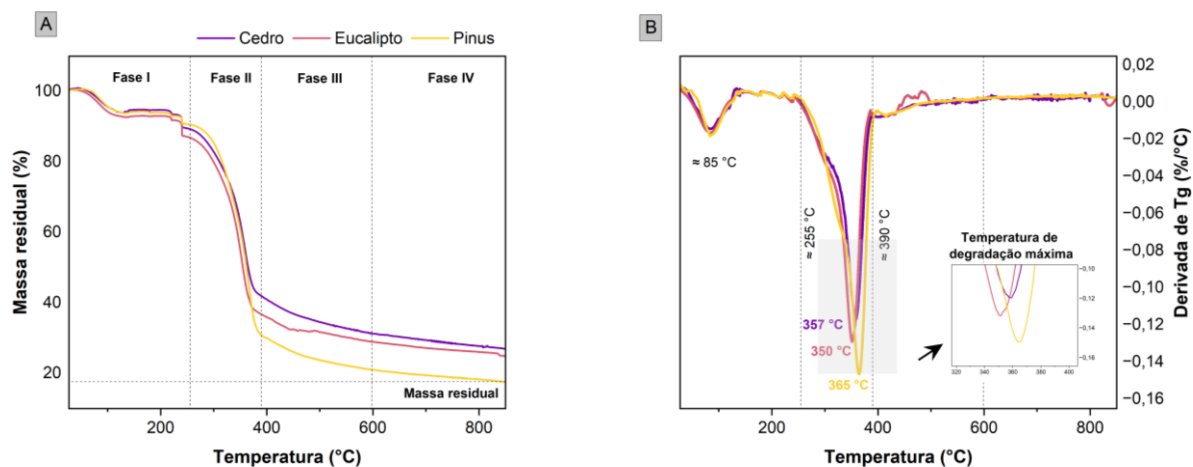


Figura 12 – a) Curvas termogravimétricas (TG) e b) suas derivadas (DTG) para as madeiras de *Cedrela* sp., *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na condição de controle. Fonte: próprio autor.

Para a madeira de *Pinus* sp. no tratamento controle, observa-se uma menor estabilidade térmica inicial em relação às demais espécies, demonstrada pela maior taxa de degradação e menor retenção de massa residual. O comportamento pode estar relacionado à presença de componentes mais voláteis na madeira in natura, que após a modificação térmica são removidos, conferindo maior estabilidade à espécie.

Nos tratamentos a 140 °C e 180 °C, mostrados na Figura 13 e 14, observa-se que as modificações térmicas iniciais levam a alterações que impactam principalmente nos componentes hidrofílicos da madeira. Essas modificações podem ser visíveis na Fase I do gráfico, onde ocorre uma redução de massa residual entre 80°C e 100°C, representando a perda de água e compostos voláteis hidrofílicos. Comparando ao controle, nota-se que as curvas TG apresentam um menor declive e perda de massa menos acentuada (~82-83°C), enquanto os picos endotérmicos nas curvas DTG (linhas tracejadas) mostram intensidades progressivamente menores (controle > 140 °C > 180 °C).

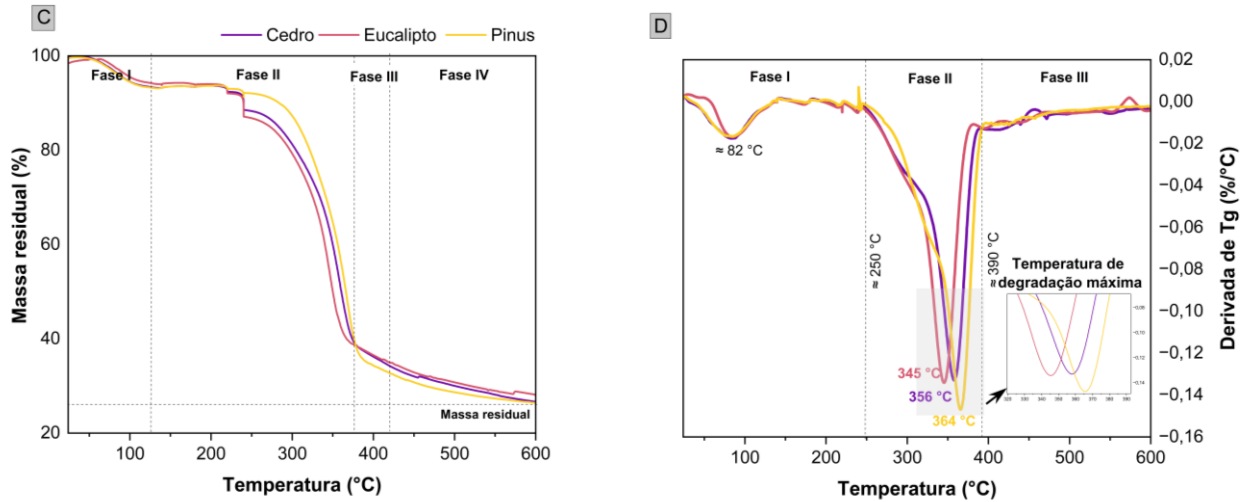


Figura 13 – c) Curvas termogravimétricas (TG) e d) suas derivadas (DTG) para as madeiras de *Cedrela* sp., *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na temperatura de 140 °C. Fonte: próprio autor.

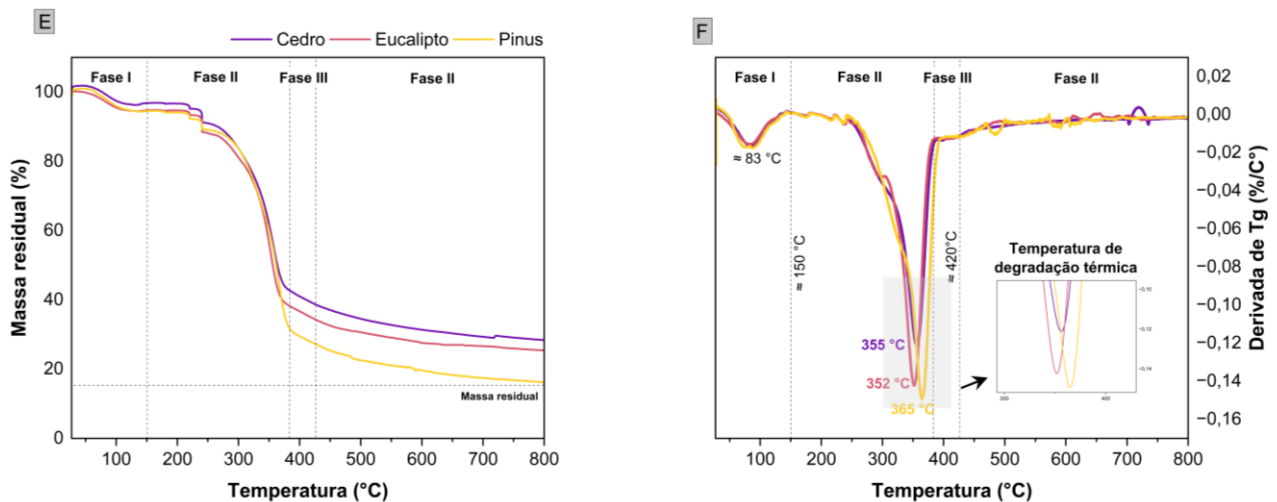


Figura 14 – e) Curvas termogravimétricas (TG) e f) suas derivadas (DTG) para as madeiras de *Cedrela* sp., *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na temperatura de 180 °C. Fonte: próprio autor.

Essa redução indica que a modificação térmica diminuiu a capacidade de retenção de água da madeira, através da remoção de componentes hidrofílicos e modificação estrutural das hemiceluloses, tornando-a menos hidrofílica e conseqüentemente mais resistente à absorção de umidade (ALBREKTAS *et al.*, 2020; CONCEIÇÃO *et al.*, 2025). O aumento da

intensidade do efeito demonstra que quanto maior a temperatura, menor a quantidade de água e voláteis perdidos durante o aquecimento inicial, o que pode ser visto pela redução da hidrofobicidade do material, principalmente na espécie *Cedrela* sp. Apesar disso, a degradação térmica das hemiceluloses e da celulose ocorre em temperaturas similares às do controle, indicando que tratamentos abaixo de 180°C preservam boa parte da estabilidade térmica da madeira (COLIN et al., 2023).

Na temperatura de 140°C, observa-se uma similaridade antes não observada entre os picos de degradação térmica das madeiras de *Cedrela* sp. e *Eucalyptus* sp. As madeiras de *Cedrela* sp. antes e após a temperatura de 140°C, apresenta maior massa residual e menor taxa de degradação em relação a *Eucalyptus* sp., porém a 140°C essa relação se inverte temporariamente, sendo a espécie *Eucalyptus* sp. que passa a apresentar menor degradação e maior massa residual. Esse comportamento é consistente com os resultados de FTIR, que identificaram 140°C como uma temperatura crítica para o *Eucalyptus* sp., evidenciada por alterações mais evidentes nos grupos funcionais.

Na Figura 15 e 16, observa-se que os tratamentos mais intensos, a 220 °C e 240 °C, resultam em alterações químicas e estruturais mais expressivas. É possível notar um deslocamento das temperaturas de degradação para faixas mais baixas, particularmente nas hemiceluloses, que são mais susceptíveis ao calor (SIKORA et al., 2022). A celulose também apresenta menor resistência térmica, com os picos de degradação ocorrendo em temperaturas menores (ORNAGHI et al., 2024). Além disso, há uma redução significativa na massa residual final, o que evidencia degradação parcial da lignina.

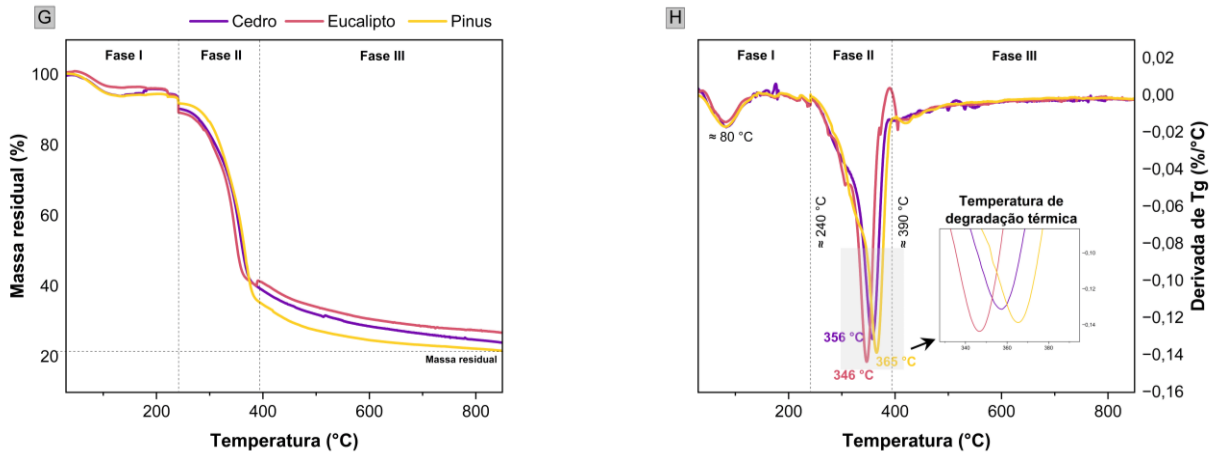


Figura 15 – g) Curvas termogravimétricas (TG) e h) suas derivadas (DTG) para as madeiras de *Cedrela* sp., *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na temperatura de 220 °C. Fonte: próprio autor.

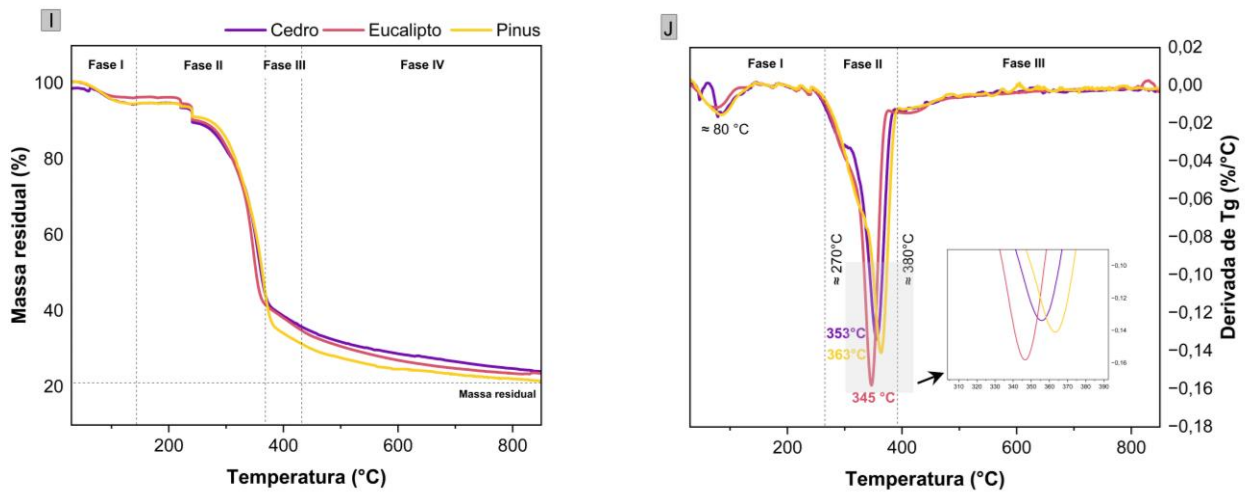


Figura 16 – i) Curvas termogravimétricas (TG) e j) suas derivadas (DTG) para as madeiras de *Cedrela* sp., *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. ilustrando as fases típicas de decomposição térmica na temperatura de 240 °C. Fonte: próprio autor.

De maneira geral, o aumento da temperatura de modificação térmica promove maior resistência à absorção de umidade e também gera modificações na estabilidade térmica, sendo esses efeitos mais acentuados a partir de 220 °C. Após essa temperatura, as madeiras de *Cedrela* sp. e *Eucalyptus* sp. demonstram maior sensibilidade térmica, enquanto o *Pinus* sp. passa a demonstrar maior estabilidade. A inversão do comportamento das espécies estudadas é evidenciada pelo aumento da estabilidade térmica do *Pinus* sp.

em relação às demais espécies, diferindo do seu comportamento no controle, 140 °C e 180 °C.

A mudança é corroborada pela menor taxa de degradação e maior retenção de massa residual observada para *Pinus* sp., confirmando que em maiores temperaturas a espécie demonstra maior estabilidade térmica, conforme observado nas análises de FTIR. A maior estabilidade observada está relacionada ao seu maior teor de lignina e estrutura de traqueídeos mais homogênea, enquanto as folhosas como *Cedrela* sp. e *Eucalyptus* sp. têm maior proporção de hemiceluloses e estrutura celular mais complexa, tornando-as mais susceptíveis à degradação térmica (SCHULZ *et al.*, 2020a).

Os resultados encontrados estão em consonância com a literatura, que confirmam as principais faixas de degradação encontradas no presente estudo. Guirardi (2020) relata faixas típicas de decomposição total das hemiceluloses (< 350 °C), celulose (350 a 380 °C) e lignina (>380 °C), resultados consistentes com os obtidos, tanto para o controle quanto para as amostras modificadas.

Hill *et al.* (2021) confirmam que a degradação das hemiceluloses pode ser observada em menores temperaturas, quando a madeira é aquecida por longos períodos, sendo esse componente o mais sensível termicamente, justificando os deslocamentos dos picos de degradação das hemiceluloses para temperaturas menores nos tratamentos mais intensos. Similarmente, Candelier *et al.* 2016 afirmam que a modificação térmica de madeiras em temperaturas de 180°C a 250°C resulta em degradação química progressiva dos polímeros da madeira, sendo as hemiceluloses as primeiras a serem degradadas. Esses achados corroboram o padrão de degradação e os deslocamentos de temperatura observados nas curvas de TG e DTG deste estudo, principalmente a maior sensibilidade das espécies folhosas (*Cedrela* sp. e *Eucalyptus* sp.) comparada ao *Pinus* sp., visto que possuem maior proporção de hemiceluloses em comparação às coníferas (HILL, 2006; COSTA, 2022).

5.2 Propriedades físicas e cor

5.2.1 Densidade aparente

As médias de densidade aparente são mostradas na Tabela 2, onde observa-se uma variação da mesma entre as espécies e tratamentos estudados. A ANOVA seguida pelo teste de Tukey demonstram que as espécies de *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. apresentam um comportamento homogêneo, em contrapartida, o *Eucalyptus* sp. demonstrou diferença significativa entre os tratamentos, sendo os tratamentos à 140 °C, 220 °C e 240 °C os que resultaram em menores valores de densidade aparente.

Tabela 2. Valores médios de densidade aparente da madeira de *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp. e *Pinus* sp. submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica.

Densidade aparente (kg.m ⁻³)			
Tratamentos	<i>Eucalyptus</i> sp.	<i>Cedrela</i> sp.	<i>Pinus</i> sp.
Controle	650,4 A	398,4 A	708,7 A
	52,6*	30,1*	20,9*
140 °C	560,2 BC	379,7 A	697,8 A
	28,3*	22,9*	31,7*
180 °C	591,9 AB	399,1 A	676,2 A
	60,7*	19,7*	35,1*
220 °C	542,2 C	387,5 A	673,4 A
	65,4*	29,7*	46,2*
240 °C	554,0 BC	363,8 A	658,8 A
	37,2*	22,3*	43,2*

Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Os valores após o asterisco (*) representam o desvio padrão.

A madeira de *Eucalyptus* sp. tratada a 140°C apresentou elevada redução nos valores de densidade aparente em relação ao controle. Esta redução está diretamente relacionada à plastificação da lignina nesta temperatura, conforme observado por Oliveira (2019) para madeiras de *Dinizia excelsa*. A autora ressalta que a plastificação da lignina facilita a entrada de moléculas de água, que expandem a estrutura e reduzem de modo significativo a densidade da madeira. Hill *et al.* (2021) corroboram essa informação, afirmando que o amolecimento da estrutura aumenta a movimentação molecular, promovendo o inchaço das regiões menos organizadas da parede celular, resultando em mudanças dimensionais que afetam a densidade final da madeira.

De forma complementar, Brito *et al.* (2006) destacam em estudo realizado com *Eucalyptus grandis* que a diminuição da densidade na temperatura de 140 °C também está relacionada à eliminação de água, principalmente resultante da degradação das hidroxilas presentes na madeira. O autor enfatiza que a redução observada pode ter ocorrido devido à diminuição mais acentuada da massa em relação ao volume, explicando os menores valores de densidade obtidos.

Com o aumento da temperatura para 180°C, o comportamento é inverso, aumentando a densidade aparente significativamente, de maneira equivalente ao controle. Esta recuperação parcial é consistente com os resultados de FTIR e DRX, que também mostraram estabilização dos componentes estruturais a 180°C, incluindo recuperação do ICr. Oliveira (2019) observou comportamento semelhante no aumento da densidade aparente de *Dinizia excelsa* submetida à temperatura de 180°C. A autora relatou que esta espécie, assim como *Eucalyptus* sp., apresentou inicialmente uma redução da densidade aparente, porém na temperatura de 160°C, seguida por um aumento quando submetida a 180°C.

Nas temperaturas mais elevadas (220°C e 240°C), a densidade aparente volta a diminuir, com reduções de 15,93% e 15,89% em relação ao controle, respectivamente, indicando degradação mais intensa dos componentes estruturais. O comportamento de diminuição da densidade aparente em maiores temperaturas é um comportamento esperado, uma vez que temperaturas acima de 200°C promovem a degradação térmica severa dos componentes da parede celular (FIGUEROA e MORAES, 2009; GAFF *et al.*, 2023), resultando em maior formação de compostos voláteis e perda de massa mais acentuada que as alterações volumétricas.

Em relação à madeira de *Cedrela* sp., não houve diferenças observadas nos valores de densidade aparente com o aumento da temperatura. A estabilidade nos valores de densidade aparente pode estar relacionada a estabilidade dimensional natural do gênero *Cedrela* (FERNANDES *et al.*, 2018) e à presença de extrativos que atuam como protetores durante o processo térmico. Segundo Santos Júnior *et al.* (2024), algumas espécies podem apresentar manutenção da densidade devido à remoção de componentes voláteis e reorganização estrutural, onde as mudanças são explicadas pela relação entre a perda de massa e a alteração do volume (HILL, 2006). Para *Cedrela* sp., este equilíbrio entre

degradação e reorganização estrutural resulta na preservação da integridade dimensional, confirmando as características observadas na estabilidade da espécie.

A madeira de pinus, pertencente ao grupo das coníferas, também apresentou um comportamento homogêneo, não havendo diferença para a densidade aparente entre as temperaturas. Poubel (2014) observou o mesmo padrão em madeiras de *Pinus* sp., onde a modificação térmica não afetou a densidade das madeiras tratadas à 180, 200 e 220°C. Santos e Silva (2021) encontraram resultados similares para *Pinus caribaea* submetidos a 160 e 200 °C, justificando a não significância pela desproporcionalidade entre perda de massa e retração volumétrica. Esses resultados refletem a menor susceptibilidade das coníferas à degradação térmica, particularmente em relação às hemiceluloses, influenciando diretamente a densidade (SCHULZ *et al.*, 2020a).

O comportamento homogêneo do pinus corrobora os resultados obtidos nas análises químicas, confirmando sua maior estabilidade térmica. Medeiros (2023) destaca diferenças significativas entre coníferas e folhosas que influenciam sua resposta ao tratamento térmico. As coníferas, por possuírem uma estrutura de lignina distinta e uma maior quantidade de resinas em comparação com as folhosas, podem apresentar uma resposta diferenciada ao tratamento térmico (LEPAGE, 1986).

O comportamento diferenciado entre as espécies pode ser explicado Hassani *et al.* (2022), que atribuem as variações nas propriedades da madeira tratada termicamente à variabilidade natural das madeiras. A existência de fatores determinantes como a proporção entre madeira juvenil e adulta, a distribuição de lenho inicial e tardio, e as diferenças entre cerne e alburno influenciarão diretamente a resposta da madeira ao tratamento térmico, induzindo variações na densidade.

5.2.2 Molhabilidade da superfície

Na Tabela 3 são mostrados os ângulos médios da gota de contato séssil com as superfícies das madeiras de *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp. e *Pinus* sp. submetidas a modificação térmica. A análise estatística demonstrou diferenças entre as espécies e tratamentos, com interação significativa espécie x tratamento, demonstrando que cada espécie responde de forma

diferente à modificação térmica. As madeiras de *Eucalyptus* sp. e *Cedrela* sp. apresentaram um padrão de comportamento estatisticamente similar, com redução progressiva da molhabilidade com o aumento da temperatura. Para ambas as espécies, os tratamentos de 220 °C e 240 °C apresentaram um maior ângulo de contato, indicando maior hidrofobicidade. Para a madeira de pinus, não houve diferença entre as médias dos tratamentos.

Tabela 3. Ângulo de contato médio para *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp. e *Pinus* sp. em função das diferentes temperaturas de modificação térmica.

Tratamentos	Ângulo de contato (°)		
	<i>Eucalyptus</i> sp.	<i>Cedrela</i> sp.	<i>Pinus</i> sp.
Controle	38,95Bb	59,34Ba	52,54 Bab
	3,04*	7,16*	3,71*
140°	56,61Bb	62,26Ba	25,89 Bc
	14,36*	3,06*	1,43*
180°	65,56 Bb	70,54Ba	31,92 Bc
	12,22*	3,06*	1,40*
220°	86,17 Ab	97,19Aa	49,50 Bc
	15,01*	7,03*	1,20*
240°	98,83 Ab	104,01Aa	49,61 Bc
	12,65*	2,03*	6,52*

Na mesma coluna, letras maiúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey; na mesma linha, letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Os valores após o asterisco (*) representam o desvio padrão.

O aumento gradual dos ângulos de contato para a espécie *Eucalyptus* sp. e *Cedrela* sp. é causado pela reação de desidratação de carboidratos durante a modificação térmica, o que diminui a quantidade de grupos hidrofílicos presentes e limita o acesso dos grupos hidroxila livres à água (XU *et al.*, 2019). Nos presentes resultados, *Eucalyptus* sp. apresentou incrementos progressivos nos ângulos de contato variando de 45,4% a 153,8% em relação ao controle, entre 140°C e 240°C. A espécie *Cedrela* sp. também demonstrou aumentos, porém menos acentuados, variando de 4,9% a 75,3%.

Esse comportamento pode ser atribuído aos mecanismos de migração e deposição de compostos hidrofóbicos na superfície da madeira, devido a facilitação do transporte de

extrativos solúveis e insolúveis em água durante a modificação térmica (GRININS *et al.*, 2024). O aumento da temperatura intensifica o movimento da água no interior da estrutura da madeira, favorecendo o transporte de extrativos solúveis, enquanto os insolúveis migram através da fase de transporte de vapor durante as altas temperaturas (SERNEK *et al.*, 2004), simultaneamente aos compostos orgânicos voláteis (COVs) que são depositados na superfície da madeira (POHLEVEN *et al.*, 2019).

Candan *et al.* (2021) corroboram esses achados, ao investigarem o efeito da modificação térmica nas propriedades de rugosidade superficial e molhabilidade de *Sorbus aucuparia*, uma folhosa de rápido crescimento. Os autores concluíram que a madeira se tornou mais hidrofóbica com o aumento da temperatura e duração do tratamento, aumentando os ângulos de contato em 35% e 47% após tratamento a 160°C e 180°C, respectivamente, indicando uma possível mudança na estrutura da superfície.

As coníferas são reconhecidas por apresentarem características que naturalmente favorecem sua maior hidrofobicidade, como seu maior teor de lignina (28-36%) em comparação com as folhosas (26-34,2%) (FENGEL e WEGENER, 1989), além da presença de resina e sua estrutura celular específica, fatores que contribuem para reduzir sua afinidade com a água (PEDRAZZI *et al.*, 2019). Entretanto, os resultados obtidos para pinus demonstram um comportamento atípico nos tratamentos iniciais, com redução de 50,7% (140 °C) e 39,2% (180 °C) do ângulo de contato em relação ao controle, contrariando o padrão esperado.

Este comportamento de aumento da permeabilidade é explicado pela dinâmica dos extrativos durante as fases iniciais da modificação térmica. As diminuições observadas sugerem que esses extrativos podem estar sendo mobilizados para fora da superfície ou volatilizados, expondo grupos mais hidrofílicos da parede celular e influenciando temporariamente o comportamento esperado para esse grupo de espécies (NUOPPONEN *et al.*, 2003). Metsä-Kortelainen e Viitanen *et al.* (2012) encontraram resultados similares para *Pinus sylvestris* e *Picea abies*, onde a modificação térmica em temperaturas intermediárias reduziu o ângulo de contato, aumentando a molhabilidade em comparação ao controle.

Na figura 15, observa-se que as gotas apresentam maior espalhamento superficial a 140°C e 180°C em comparação ao controle, confirmando a redução dos ângulos de contato observada na Tabela 3.

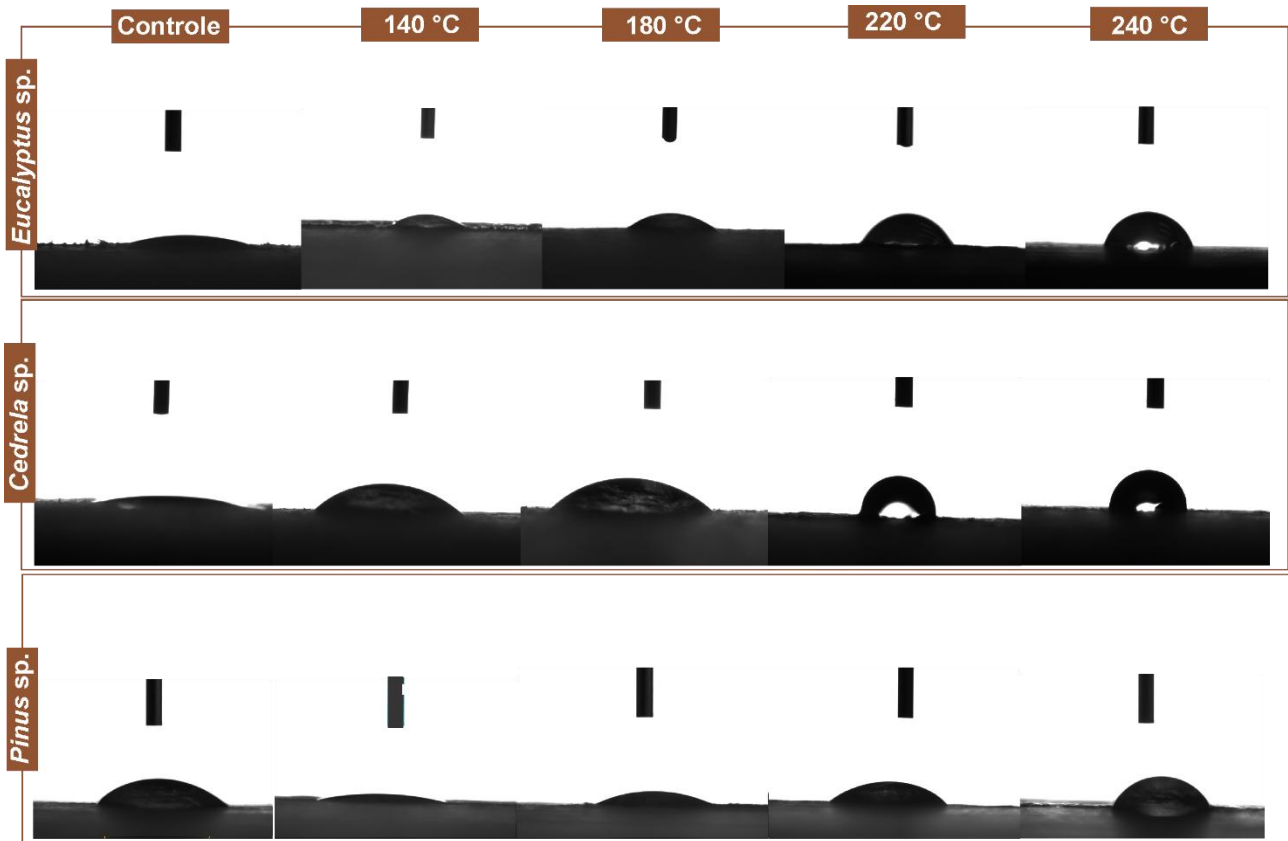


Figura 17 - Perfil das gotas de água sobre a superfície da madeira de *Eucalyptus sp.*, *Cedrela sp.* e *Pinus sp.* em função das diferentes temperaturas de modificação térmica, demonstrando a evolução do ângulo de contato e da molhabilidade das espécies. Fonte: Próprio autor.

Aydin (2024) destaca que diferentes espécies de madeiras apresentam graus variados de molhabilidade, sendo atribuído às suas características anatômicas e químicas distintas, sendo que a presença de lignina, celulose e hemiceluloses desempenham um importante papel na molhabilidade da madeira.

A importância dos extrativos é fundamentada pelo fato de que estes compostos têm um efeito relevante na molhabilidade da madeira devido à complexidade em sua composição (JANKOWSKA *et al.*, 2018). Alguns deles, quando presentes na interface madeira-líquido, podem orientar seu grupo funcional hidrofílico para o grupo polar do líquido, estabelecendo ligações de hidrogênio e proporcionando alterações aparentes na tensão superficial, interferindo diretamente na molhabilidade (GARDNER *et al.*, 1995).

O comportamento observado nas temperaturas intermediárias para madeira de *Pinus* sp. está relacionado ao processo de inativação da superfície, que segundo o Forest Products Laboratory (2010), é causado pela migração de extrativos hidrofóbicos para a superfície (processo natural da madeira) ou pela modificação físico-química da superfície ocasionada pela modificação térmica. Entretanto, nas temperaturas mais elevadas (220 °C e 240°C), observou-se uma recuperação favorável da molhabilidade, com reduções moderadas no ângulo de contato de 5,8% e 5,6% respectivamente, retornando a valores próximos ao controle. Os resultados obtidos indicam que, com o aumento da temperatura de tratamento, há uma tendência benéfica dos ângulos de contato se aproximarem dos valores do controle, restaurando sua melhor molhabilidade característica.

5.2.3 Cor da madeira

As análises dos parâmetros colorimétricos das madeiras de *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica são mostradas na Tabela 4. A ANOVA seguida pelo teste de Tukey constatou diferenças entre os tratamentos, demonstrando que a modificação térmica resulta em transformações significativas na coloração das madeiras das três espécies. Os métodos SCE (Componente Especular Incluso) e SCE (Componente Especular Excluído) apresentaram padrões estatísticos similares, e também as mesmas classificações de agrupamento por cor, indicando que ambos os métodos são eficazes para caracterização colorimétrica da madeira modificada termicamente.

Tabela 4. Parâmetros colorimétricos pelo método SCE (Componente Especular Excluído) e SCI (Componente Especular Incluído) para madeiras de *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. submetidas a diferentes tratamentos térmicos.

Método	Espécie	Tratamento	L*	a*	b*	C	h*	Classificação (Cluster)
SCE	<i>Eucalyptus</i> sp.	Controle	62,25 A 6,33*	13,93 AB 1,98*	21,83 A 1,11*	25,96 A 1,31*	57,53 A 4,14*	Rosa (04)
		140°C	59,11 A 1,99*	14,78 A 0,88*	21,57 A 0,57*	26,16 A 0,89*	55,59 AB 1,19*	Rosa (04)
		180 °C	52,87 B 2,02*	14,53 A 1,07*	18,88 B 1,07*	23,85 B 1,92*	52,27 BC 3,36*	Marrom-avermelhado (25)
		220°C	38,53 C 1,28*	12,62 B 0,46*	14,14 C 0,63*	18,96 C 0,63*	48,23 C 1,42*	Marrom-escuro (12)
		240°C	34,50 C 1,99*	10,24 C 0,61*	11,95 D 1,49*	15,762 D 1,37*	49,24 C 3,01*	Marrom-arroxeadado (08)
SCE	<i>Pinus</i> sp.	Controle	73,07 A 3,16*	7,57 C 2,36*	26,25 A 2,74*	27,45 A 2,18*	73,70 A 6,4*	Branco (02)
		140°C	70,63 A 3,47*	11,22 B 1,33*	21,21 B 0,90*	24,03 B 1,07*	62,15 B 2,80*	Marrom-oliva (13)
		180°C	64,01 B 4,34*	13,54 AB 2,00*	20,14 B 1,76*	24,29 B 2,43*	56,22 C 2,70*	Marrom-oliva (13)
		220°C	52,76 C 2,46*	15,74 A 0,63*	19,61 B 1,09*	25,15 AB 1,13*	51,21 D 1,22*	Marrom-avermelhado (25)
		240°C	39,85 D 2,39*	11,74 B 1,62*	15,05 C 2,12*	19,09 C 2,63*	52,03 CD 1,35*	Marrom-escuro (12)
SCE	<i>Cedrela</i> sp.	Controle	62,73 A 3,8*	14,21 A 1,30*	23,02 A 0,74*	27,07 A 0,99*	58,33 A 2,40*	Rosa (04)
		140°C	59,11 B 1,99*	14,78 A 0,88*	21,57 B 0,57*	26,16 A 0,89*	55,59 AB 1,19*	Rosa (04)
		180°C	52,87 C	14,85 A	19,57 C	24,58 B	52,84 B	Marrom-avermelhado (25)

			2,02*	1,07*	0,25*	0,49*	2,30*	
		220°C	38,45 D	12,72 B	14,21 D	19,08 C	48,15 C	Marrom-escuro (12)
			1,20*	0,51*	0,62*	0,59*	1,64*	
		240°C	34,50 E	10,24 C	11,95 E	15,76 D	49,23 C	Marrom-arroxeadado (08)
			1,99*	0,61*	1,49*	1,37*	3,01*	
		Controle	62,93 A	13,93 AB	21,77 A	25,90 AB	57,47 A	Rosa (04)
			6,36*	1,98*	1,15*	1,35*	4,15*	
		140°C	59,73 A	14,80 A	21,52 A	26,12 A	55,49 AB	Rosa (04)
			1,99*	0,87*	0,54*	0,86*	1,20*	
SCI	<i>Eucalyptus</i> sp.	180°C	53,58 B	14,81A	19,45 B	24,47 B	52,73 BC	Marrom-avermelhado (25)
			2,01*	1,06*	0,28*	0,46*	2,33*	
		220°C	39,20 C	12,58 B	14,14 C	18,90 C	48,46 D	Marrom-escuro (12)
			1,35*	0,46*	0,63*	0,58*	1,37*	
		240°C	35,19 C	12,62B	14,14 C	15,63 D	49,03 CD	Marrom-arroxeadado (08)
			2,03*	0,46*	0,63*	1,38*	3,03*	
		Controle	73,90 A	7,55 C	26,20 A	27,40 A	73,71 A	Branco (02)
			3,16*	1,63*	2,70*	2,14*	6,40*	
		140°C	71,35 A	11,21 B	21,20 B	24,01 B	62,15 B	Marrom-oliva (13)
			3,46*	0,63*	0,91*	1,07*	2,81*	
SCI	<i>Pinus</i> sp.	180 °C	64,75 B	13,52 AB	20,09 B	24,23 B	56,20 C	Marrom-oliva (13)
			4,48*	1,32*	1,77*	2,44*	2,70*	
		220°C	52,76 C	15,74 A	19,61 B	25,15 AB	51,21 D	Marrom-avermelhado (25)
			2,46*	2,37*	1,09*	1,13*	1,22*	
		240°C	40,64 D	11,66 B	14,91 C	18,93 C	51,94 CD	Marrom-escuro (12)
			2,32*	2,01*	2,18*	2,68*	1,43*	
		Controle	63,37 A	14,24 A	23,02 A	27,08 A	58,29 A	Rosa (04)
			3,83*	1,30*	0,77*	1,02*	2,37*	
	<i>Cedrela</i> sp.	140°C	59,73 B	14,80 A	21,52 B	26,12 A	55,49 AB	Rosa (04)
			1,99*	0,87*	0,54*	0,86*	1,20*	

SCI	180°C	53,58 C	14,81 A	19,45 C	24,47 B	52,73 B	Marrom-avermelhado (25)
		2,01*	1,06*	0,28*	0,46*	2,33*	
	220°C	39,13 D	12,72 B	14,07 D	18,98 C	47,88 C	Marrom-escuro (12)
		1,26*	0,51*	0,61*	0,58*	1,64*	
	240°C	35,19 E	10,20 C	11,81 E	15,63 D	49,03 C	Marrom-arroxeadado (08)
		2,03*	0,62*	1,50*	1,38*	3,04*	

L* = luminosidade (0 = preto, 100 = branco); a* = coordenada cromática vermelho (+) a verde (-); b* = coordenada cromática amarelo (+) a azul (-); C = saturação/croma; h* = ângulo de tinta;

Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Os valores após o asterisco (*) representam o desvio padrão.

A Figura 16 demonstra a distribuição das médias dos parâmetros colorimétricos, permitindo visualizar os padrões de agrupamento por temperatura (a) e por espécie (b). Observa-se que há uma distância entre os grupos de temperatura, com o tratamento controle posicionado na região de maior luminosidade, enquanto as temperaturas mais intensas (220°C e 240°C) concentram-se na faixa de menor L^* . À medida que a temperatura de tratamento aumenta, os componentes do gráfico se deslocam para a região de menor luminosidade, com os tratamentos mais intensos se agrupando na faixa de L^* entre 30-45. O gráfico por espécie (b) evidenciou um comportamento diferente entre as coníferas e folhosas. *Eucalyptus* sp. e *Cedrela* sp. demonstram um comportamento similar, com a degradação térmica seguindo a mesma trajetória, iniciando nas zonas de menor luminosidade (L^*) e coordenada b^* intermediária. Em contraste, *Pinus* sp. apresenta uma maior amplitude de variação, tendo seu ponto inicial em região de maior luminosidade que as folhosas, e também maior valor de b^* .

A diferença observada entre as espécies estudadas, é atribuída às características intrínsecas de cada espécie, refletida em diferenças químicas, físicas e anatômicas, contribuindo para o contraste observado na degradação (SCHULZ *et al.*, 2020b). Schulz *et al.* (2020a) encontraram resultados similares, onde a maior amplitude de variação de cor foi observada para *Pinus elliotii*, em comparação com as espécies *Corymbia maculata* e *Eucalyptus grandis*.

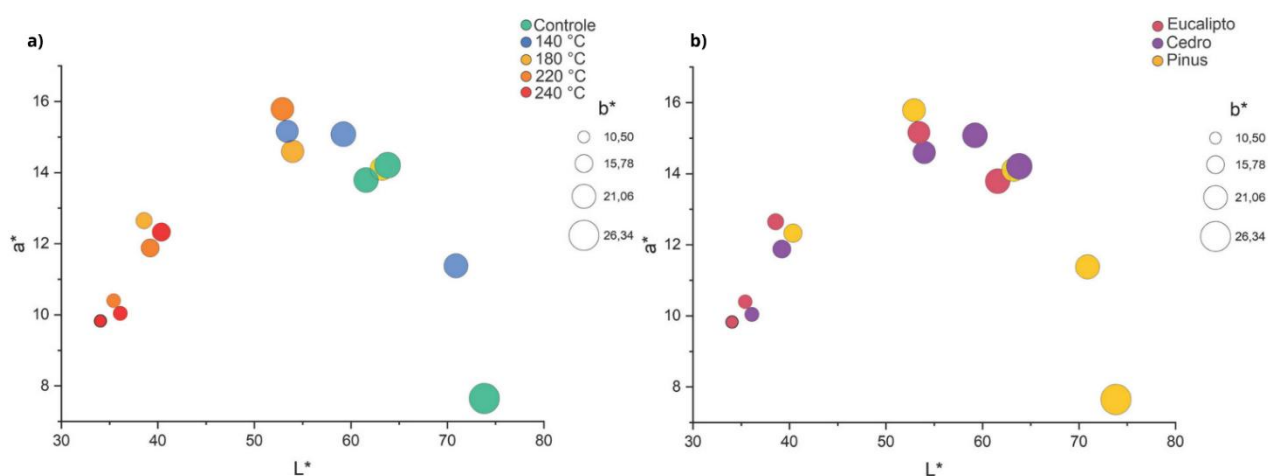


Figura 18 - Gráficos de bolha da análise colorimétrica no espaço CIE Lab* de madeiras submetidas à modificação térmica. a) Efeito das temperaturas de tratamento comparado ao controle. b) Comparação entre espécies madeireiras antes e após modificação térmica. O tamanho das bolhas representa os valores da coordenada b* (eixo azul-amarelo). L* indica luminosidade (claro-escuro) e a* representa o eixo verde-vermelho do espaço de cor.

Fonte: Próprio autor.

O parâmetro L* foi o mais sensível às modificações térmicas, apresentando uma redução progressiva com o aumento da temperatura para todas as espécies estudadas. *Eucalyptus* sp. apresentou redução de 44,35% entre o controle e 240 °C, enquanto *Pinus* sp. reduziu em 45,25 % e *Cedrela* sp. em 44,75%. Os resultados corroboram com Jurczyková *et al.* (2023), que correlacionam o escurecimento diretamente à formação de grupos carbonila e carboxila, resultantes principalmente da degradação de estruturas de ligação dupla carboxila, bifelina e anel conjugado na lignina.

A coordenada cromática a* apresentou menores variações, porém consistentes entre as espécies. *Eucalyptus* sp. e *Cedrela* sp. mostraram tendência de redução dos valores de a* nas temperaturas acima de 180 °C, representando a diminuição da pigmentação vermelha após a modificação térmica, sendo resultado da degradação térmica de taninos e compostos fenólicos característicos das folhosas, que são os principais responsáveis pela coloração avermelhada das madeiras (CALONEGO *et al.*, 2017). *Pinus* sp. teve um aumento progressivo da coordenada até 220 °C, seguido de redução à 240°C, demonstrando uma maior estabilidade para esse parâmetro. De modo geral, na temperatura mais intensa, todas as espécies demonstraram redução do componente vermelho.

Os valores de b* apresentaram redução significativa com o aumento da temperatura em todas as espécies, indicando perda da tonalidade amarelada característica das madeiras não modificadas. Nota-se que a redução percentual foi mais acentuada na espécie *Cedrela* sp., seguido por *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. Conforme demonstrado na Figura 16, o pinus apresenta o maior valor inicial desse parâmetro, o que é confirmado na literatura, já que a pigmentação amarela é a principal responsável pela formação das cores no gênero *Pinus* (MARINI, 2019).

Nas coníferas predomina a lignina do tipo guaiacil, enquanto nas folhosas a lignina siringil-guaiacil, que possuem maior quantidade de grupos metoxila (-OCH₃). Durante o tratamento térmico os grupos metoxila das folhosas são removidos preferencialmente, formando estruturas conjugadas e cromóforos que absorvem luz na região visível, alterando a cor da madeira e explicando o comportamento das coordenadas a* e b* (ZHANG *et al.*, 2018). O comportamento do parâmetro b* serve como indicador mais sensível da variação de cromóforos, uma vez que os grupos C-O formados durante o processo oxidativo influenciam diretamente nesta coordenada cromática, apresentando correlação inversa com a relação O/C da lignina modificada (ZHANG *et al.*, 2018). Sendo assim, as coordenadas a* e b* servem de indicadores das transformações químicas da lignina ocorridas na modificação térmica. Os resultados de saturação (C) e ângulo de tinta (h*) confirmaram as tendências observadas nos demais parâmetros, com redução da saturação das cores e alteração do matiz com o incremento da temperatura de tratamento.

A análise de cluster (Figura 17) confirmou a formação de grupos distintos de cor, demonstrando que os parâmetros colorimétricos são eficazes para caracterizar as modificações térmicas. *Eucalyptus* sp. e *Cedrela* sp. demonstraram o mesmo padrão de escurecimento das madeiras, coincidindo nos mesmos grupos de cluster em todas as temperaturas estudadas, mostrando a similaridade da mudança de cor na modificação térmica em espécies folhosas. *Pinus* sp. apresentou um comportamento diferente das folhosas, mostrando que há diferenças na resposta térmica da cor entre folhosas e coníferas.

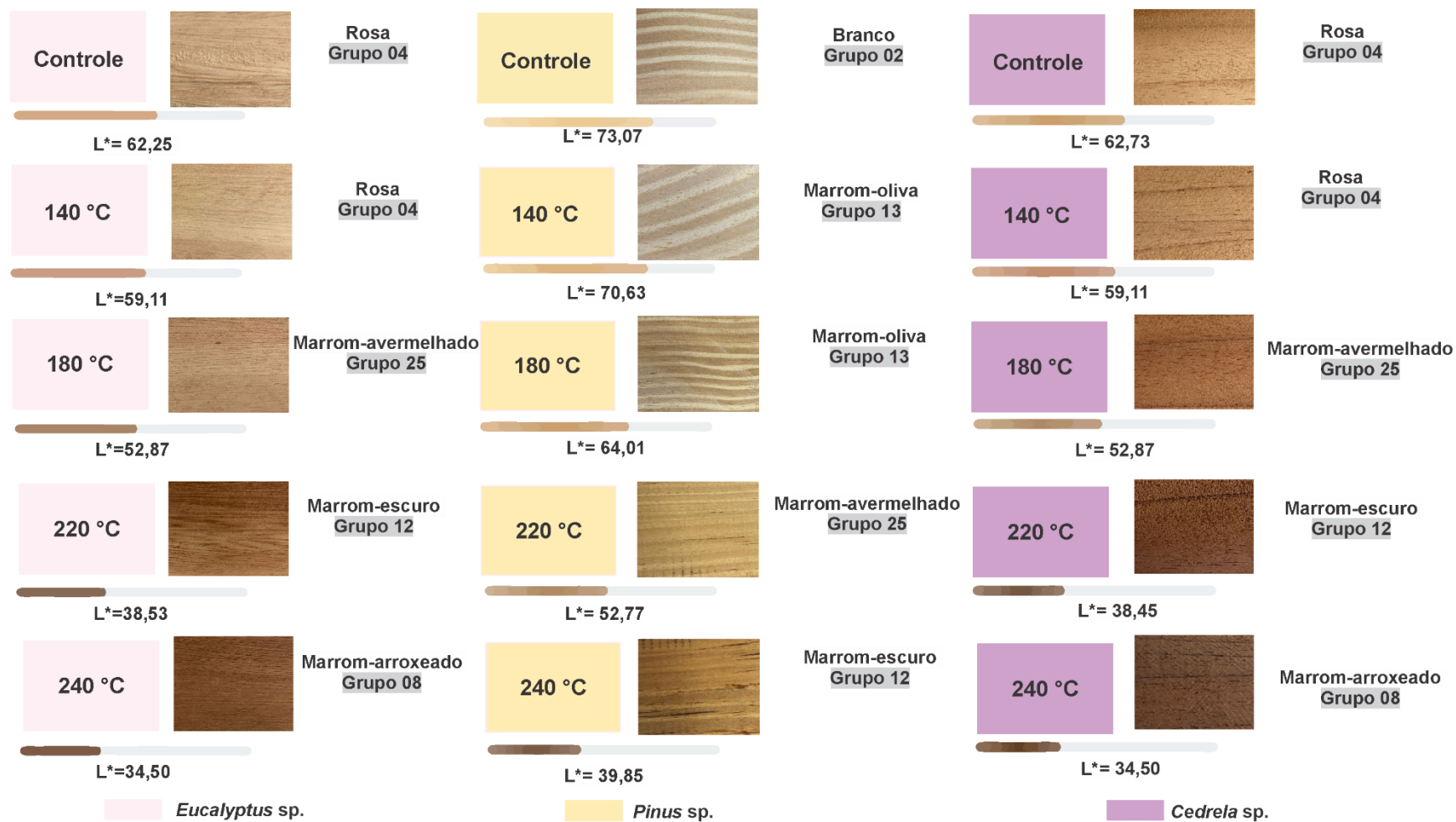


Figura 19 - Classificação de cor por análise de cluster das madeiras de *Eucalyptus sp.*, *Pinus sp.* e *Cedrela sp.* submetidas a diferentes temperaturas de modificação térmica.

Nas temperaturas de 140 °C, as folhosas mantiveram seu agrupamento semelhante às madeiras sem tratamento, apresentando escurecimento apenas a partir de 180 °C, mostrando uma estabilidade na cor em temperaturas moderadas, relacionado à sua composição química específica. Figueroa (2012) encontrou resultados similares para *Eucalyptus saligna*, destacando que madeiras folhosas com coloração originalmente rosada apresentaram alterações na tonalidade somente a partir da temperatura de 150 °C. Em contraste, o pinus apresentou mudança de agrupamento já a partir de 140 °C. Mitsui (2004) afirma que a alteração de cores em folhosas ocorre de forma mais gradual comparada às coníferas, atribuindo a diferença no teor de lignina. Andrady *et al.* (1998) corroboram essa importância da lignina, evidenciando que a mesma é responsável por 80 a 95% do coeficiente de absorção de luz da madeira, explicando seu papel determinante nas alterações cromáticas observadas na modificação térmica.

Todas as espécies convergiram para tonalidades marrom-escuro entre 220°C e 240°C, indicando que temperaturas intensas superam as diferenças dos componentes iniciais. Estes resultados são consistentes com os reportados por Mendonza *et al.* (2020) e Schulz *et al.* (2020a), confirmando que a modificação térmica promove alterações perceptuais significativas na aparência da madeira, com maior variação nas temperaturas mais intensas.

5.3 Propriedades mecânicas

5.3.1. Flexão estática

A Tabela 5 e Figura 20 mostram o comportamento do MOE e MOR entre as espécies e tratamentos estudados. A ANOVA seguida pelo teste de Tukey constatou que há diferença no MOE entre os tratamentos apenas para a madeira de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., sendo *Eucalyptus* sp. a espécie mais afetada, corroborando sua maior sensibilidade à modificação térmica, evidenciada também para as outras propriedades avaliadas. Para *Pinus* sp., houve diferença apenas na maior temperatura estudada. Em relação ao MOR, houve diferença

para todas as espécies estudadas, sendo os menores valores observados nos tratamentos mais intensos (220 e 240 °C).

Tabela 5. Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) em MPa para *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp. e *Pinus* sp. submetidos a diferentes temperaturas de modificação térmica.

Tratamentos	MOE [MPa]			MOR [MPa]		
	<i>Eucalyptus</i> sp.	<i>Cedrela</i> sp.	<i>Pinus</i> sp.	<i>Eucalyptus</i> sp.	<i>Cedrela</i> sp.	<i>Pinus</i> sp.
Controle	10866 A	5026 A	13004 A	98,32 AB	50,39 A	125,53 AB
	1310*	635*	650*	9,75*	6,89*	11,75 *
	12,06%	12,64%	5,00%	9,92%	13,67%	9,36%
140 °C	8443 BC	4749 A	12961 A	72,78 BC	33,60 BC	143,05 A
	400*	429*	1268*	4,90*	4,36*	13,96*
	4,74%	9,02%	9,78%	6,73%	12,96%	9,76%
180 °C	9839 AB	4392 A	12467 A	105,06 A	32,19 BC	108,41 B
	920*	411*	1342*	14,18*	2,18*	13,89*
	9,35%	9,36%	10,77%	13,50%	6,77*	12,81%
220 °C	8351 BC	5149 A	13890 A	56,80 C	41,58 AB	107,52 B
	621*	316*	1304*	7,03*	5,27	8,87*
	7,44%	6,15%	9,39%	12,37%	12,67*	8,25%
240 °C	7056 C	4717 A	10108 B	27,72 D	19,71 C	81,00 C
	1056*	372*	539*	1,78*	2,91*	8,64*
	14,97%	7,88%	5,33%	6,43%	14,78%	10,67%

Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Os valores após o asterisco (*) representam o desvio padrão e os valores em % o coeficiente de variação.

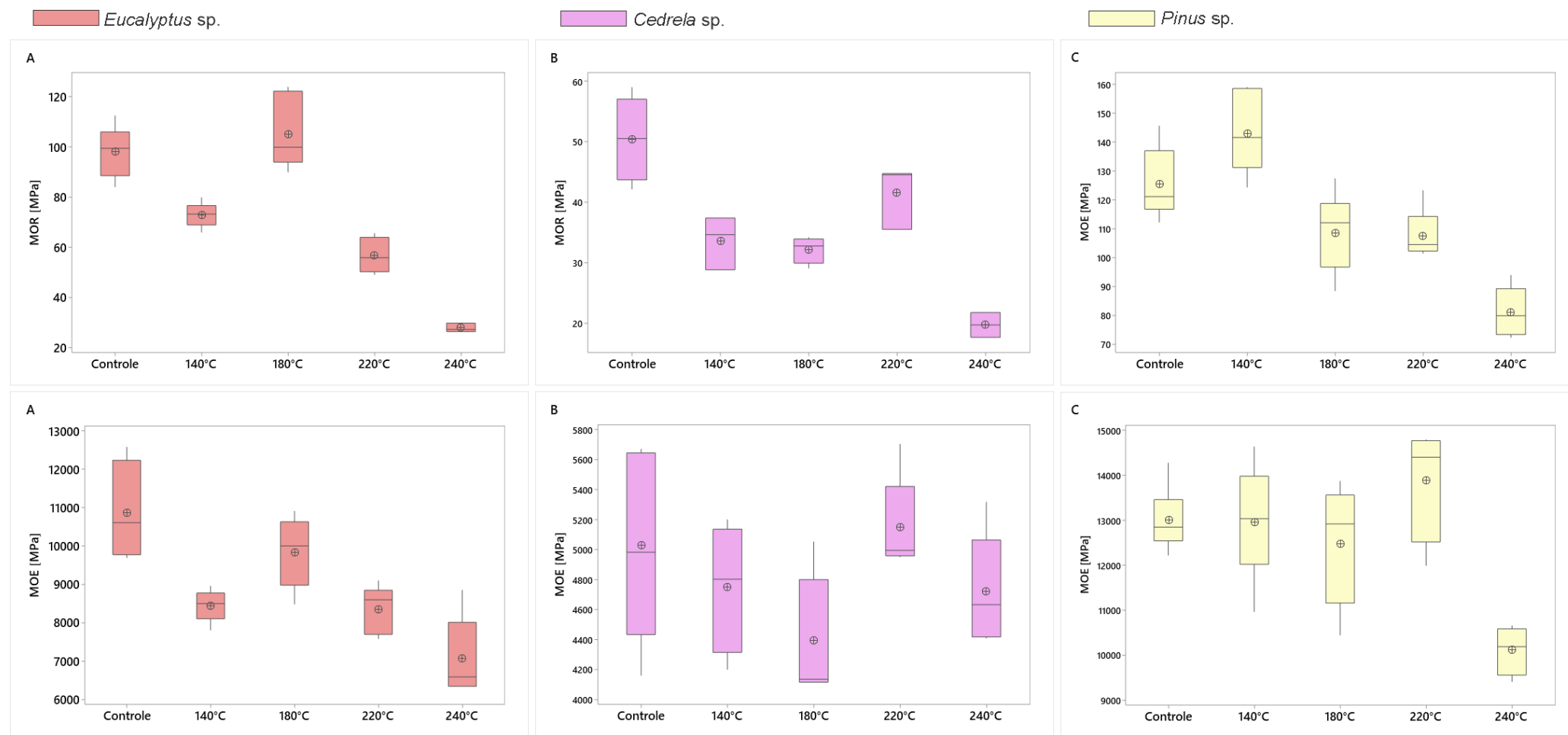


Figura 20 - Boxplots das propriedades mecânicas de rigidez para três espécies de madeira submetidas a diferentes tratamentos térmicos. **A:** *Eucalyptus* sp. (vermelho); **B:** *Cedrela* sp. (rosa); **C:** *Pinus* sp. (amarelo). Linhas superior, média e inferior representam diferentes propriedades mecânicas avaliadas em MPa.

Para compreender o comportamento mecânico das madeiras após a modificação térmica, é fundamental analisar a relação entre MOE, MOR e densidade. Geralmente, existe uma correlação positiva entre densidade aparente, MOE e MOR, onde madeiras mais densas tendem a apresentar valores mais elevados dessas propriedades (MIRANDA *et al.*, 2021). Isso ocorre porque a densidade reflete a quantidade de material lenhoso por unidade de volume, influenciando diretamente a capacidade da madeira de resistir a forças aplicadas. De acordo com Cruz *et al.* (2024) a densidade é uma propriedade física que pode ser diretamente relacionada com a resistência e rigidez da madeira, sendo um importante indicador de sua qualidade.

No presente trabalho, essa relação foi evidenciada para as três espécies estudadas, onde os tratamentos que mantiveram as maiores densidades também apresentaram maiores valores de MOE e MOR. *Pinus* sp. apresentou a maior densidade aparente entre as espécies estudadas, seguido por *Eucalyptus* sp. e *Cedrela* sp., estabelecendo uma correlação positiva e direta com os valores de MOE e MOR. A Figura 21 mostra a matriz de dispersão das três espécies de madeiras estudadas, confirmando essa correlação positiva, sendo seu valor maior que 0,8 para as variáveis avaliadas, indicando uma forte correlação entre as propriedades.

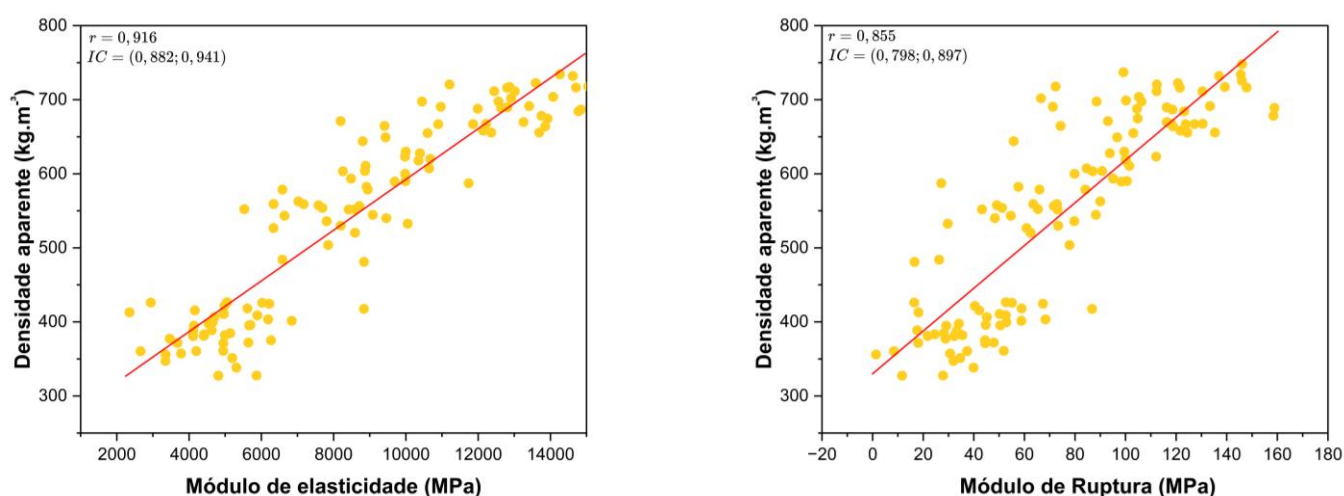


Figura 21 – Correlação de Pearson entre densidade aparente, módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) das madeiras de *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e *Cedrela* sp. avaliadas conjuntamente. Fonte: Próprio autor.

Resultados similares foram encontrados por Pietrobon (2022) que avaliou as correlações entre densidade aparente e propriedades mecânicas de 15 espécies de madeiras tropicais, encontrando correlações maiores que 0,7 entre a densidade aparente e as propriedades mecânicas investigadas, incluindo resistência à compressão paralela às fibras, durezas paralela e perpendicular às fibras, e módulo de elasticidade, indicando que a densidade aparente pode ser um bom estimador para diversas propriedades mecânicas.

Analisando o comportamento de MOE e MOR entre as espécies, *Eucalyptus* sp. apresentou maior sensibilidade às mudanças térmicas, exibindo comportamento não linear tanto no MOE quanto no MOR. Figueroa (2012) corrobora esse resultado em seus estudos com *Eucalyptus saligna*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*. O autor constatou que o eucalipto é a espécie mais afetada pelos efeitos da temperatura no ensaio de flexão estática, apresentando uma forte redução do MOE mesmo em temperaturas mais baixas, atribuindo a transição vítrea da lignina. Conceição *et al.* (2025) define a temperatura de transição vítrea como a temperatura de plastificação, passando de um estado organizado e rígido (vítreo) para uma condição menor ordenada, no qual as cadeias poliméricas adquirem maior mobilidade. Esse processo é acompanhado de muitas mudanças nas propriedades mecânicas do material, afetando principalmente o módulo de elasticidade (BACK e SALMÉN, 1982), influenciando no desempenho mecânico da madeira.

A redução significativa do MOE a 140°C pode ser relacionada diretamente a esse processo, confirmada pelas alterações químicas detectadas por FTIR e DRX, que evidenciaram degradação dos grupos hidroxila, modificações nas unidades siringil da lignina e diminuição do ICr. Estes resultados indicam o início da plastificação da lignina (Böröcsök e Pásztory, 2021), reduzindo a rigidez estrutural da madeira.

Oliveira (2019) ressalta que a temperatura de 140°C é um ponto de transição crítico, onde a lignina começa sua plastificação, reduzindo sua rigidez e facilitando maior penetração de água, causando expansão do material e enfraquecimento das fibras. Esse processo explica a redução do MOE de *Eucalyptus* sp. a 140°C, pois a lignina perde parte de sua função estrutural. Além disso, as hemiceluloses, por sua natureza amorfa, são mais susceptíveis à degradação térmica, formando ligações cruzadas que comprometem a resistência mecânica (HILL *et al.*, 2021). Esta combinação de fatores explica a maior redução observada no MOE para a espécie nesta temperatura.

A densidade aparente também reduziu 13,9% a 140°C, corroborando com as alterações estruturais decorrentes da transição vítrea da lignina. Este comportamento confirma que a plastificação da lignina causa não apenas perda de rigidez mecânica, mas também acarreta na expansão da estrutura da madeira, tornando o material menos denso (OLIVEIRA, 2019). Contudo, houve uma recuperação parcial do MOE a 180°C, podendo ser atribuída à estabilidade observada para as bandas correspondentes à celulose e hemiceluloses, evidenciada nos espectros FTIR nesta temperatura. Esse comportamento também é confirmado pela recuperação do ICr e densidade aparente a 180°C, que aumentaram em relação ao tratamento anterior, aproximando-se dos valores do controle.

Wang *et al.* (2022) explicam que este comportamento pode estar relacionado ao rearranjo das cadeias de celulose após a remoção parcial de componentes amorfos, permitindo uma melhor organização das regiões cristalinas remanescentes e, conseqüentemente, uma manutenção nas propriedades mecânicas. Oliveira (2020) em estudo com madeiras de *Eucalyptus grandis* relatou que madeiras tratadas a 185°C apresentaram menor perda de MOE (37%) em relação às temperaturas de 155°C, 165°C e 175°C, que mostraram reduções superiores a 50%, confirmando a existência de temperaturas ótimas onde ocorre menor degradação das propriedades mecânicas durante a modificação térmica.

Em contraste com *Eucalyptus sp.*, a espécie *Cedrela sp.* demonstrou maior estabilidade térmica, não apresentando mudanças nos valores de MOE com o aumento da temperatura. Para o MOR, observou-se alteração apenas na maior temperatura, o que corrobora a estabilidade da espécie evidenciada nos espectros FTIR. Embora *Cedrela sp.* tenha apresentado a menor densidade aparente entre as espécies estudadas, seus resultados demonstraram maior resistência à modificação térmica, confirmada também pela menor degradação dos componentes em relação a *Eucalyptus sp.*

Segundo Candelier *et al.* (2016), madeiras com menor densidade tendem a ser mais resistentes a degradação térmica, atribuindo principalmente às diferenças na composição das hemiceluloses. Os autores relatam que as hemiceluloses mais acetiladas liberam maior quantidade de ácido acético, que catalisam as reações e resultam em maior degradação. Este padrão pode explicar o melhor desempenho de *Cedrela sp.* em relação a *Eucalyptus sp.*, uma vez que sua menor densidade pode estar associada a uma composição química mais favorável à resistência térmica. Além dos aspectos relacionados às hemiceluloses, Soares *et al.* (2018) demonstraram que os extrativos têm a capacidade de interagir com as

moléculas de água, interferindo nos mecanismos de inchamento e contração da madeira, sugerindo que estes compostos também podem atuar como protetores durante o tratamento térmico.

Para *Pinus* sp. foram observadas diferenças entre os valores de MOE apenas na maior temperatura de modificação térmica. Em relação aos valores de MOR, observa-se um aumento na temperatura de 140°C. Esse resultado pode ser atribuído ao aumento no ICr observado nesta temperatura. Birinci *et al.* (2022) corroboram essa informação, demonstrando que as propriedades mecânicas da madeira são diretamente influenciadas pela cristalinidade, sendo que o aumento resulta na melhoria dessas propriedades.

Todas as espécies apresentaram reduções no MOR em temperaturas mais elevadas (220°C e 240°C). Na espécie *Eucalyptus* sp., o MOR apresentou redução mais expressiva, atingindo 71,80% a 240°C em relação ao controle. Juízo *et al.* (2018) também relataram diminuição expressiva no MOR em *Eucalyptus* sp., verificando-se redução de 73,34% na temperatura de 240 °C, confirmando a maior sensibilidade da espécie.

Para *Pinus* sp., o MOR foi reduzido em 35,5% a 240°C comparado ao controle. Comportamento similar foi reportado por Ribeiro *et al.* (2021) em *Pinus elliottii*, onde temperaturas de 200°C e 240°C resultaram em reduções do MOR de 24,7% e 48,9%, respectivamente, confirmando que temperaturas acima de 200°C causam uma maior degradação das propriedades mecânicas independentemente da espécie estudada.

Quanto ao comportamento do MOE, os resultados demonstram maior variabilidade entre espécies e tratamentos. Segundo Baz (2024), o MOE geralmente é menos afetado pela modificação térmica, havendo divergências na literatura quanto ao seu comportamento, podendo em alguns casos, ocorrer o aumento desta propriedade. Lima (2019), corrobora essa informação, observando uma tendência de aumento do MOE com o tratamento térmico em mogno africano, obtendo os maiores valores a 200°C. Paula (2021) destaca que os resultados dos estudos sobre o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira podem ser contraditórios, especialmente quanto aos benefícios ou prejuízos causados pela temperatura.

5.3.2. Ensaio de propagação de ondas de excitação e ultrassônicas

Nas Tabelas 6 e 7 são mostrados os coeficientes de determinação (R^2) por tratamento térmico (incluindo uma análise geral de todos os tratamentos) e as respectivas equações de regressão para os métodos de excitação por impulso e ultrassônicos, respectivamente. Os valores de R^2 obtidos variaram entre 71,40% e 97,96%, todos superiores à 70%, que é estabelecido como indicativo de um bom coeficiente, confirmando que o MOE dinâmico é um preditor confiável do MOE estático para madeiras termicamente modificadas.

O método de excitação por impulso (Tabela 6) demonstrou superioridade em termos de precisão, com valores variando entre 92,37% e 97,96%, indicando uma maior confiabilidade no método. Dentre os modos vibracionais, o longitudinal apresentou a maior precisão entre os avaliados, seguido pelo modo flexional (Apêndices C e D). O resultado encontrado está em consonância com a literatura, que demonstra que as propriedades de vibração no modo longitudinal tendem a ser superiores às dos modos transversais (SEGUNDINHO *et al.*, 2018). Esse comportamento pode ser atribuído à presença de defeitos e descontinuidades superficiais na estrutura do material, que exercem maior influência sobre o modo de vibração transversal, comprometendo sua precisão (OTANI *et al.*, 2022).

Apesar da superioridade do modo longitudinal, o modo transversal também apresentou superioridade em termos de precisão, variando de 94,01% a 97,90%. A precisão do método de vibração transversal observada corrobora com os achados de Danihelová *et al.* (2022), onde essas propriedades vibracionais mostraram-se menos afetadas pelas mudanças microestruturais decorrentes da modificação térmica, particularmente nas alterações da orientação das microfibrilas da camada S2.

No método de propagação de ondas ultrassônicas (Tabela 7), observou-se uma diferença na precisão entre as frequências utilizadas. A frequência de 500 kHz apresentou valores de R^2 superiores (90,14% a 96,94%) em comparação à frequência de 90 kHz (76,00% a 97,10%), principalmente na análise geral de todos os tratamentos, diferindo em 17,8% (Apêndices A e B). Este resultado pode ser atribuído à maior resolução espacial proporcionada por frequências mais elevadas, que geram um feixe ultrassônico mais concentrado. De acordo com o princípio da propagação de ondas ultrassônicas, a resolução espacial é inversamente proporcional ao comprimento de onda, de modo que frequências mais altas produzem comprimentos de ondas menores, caracterizando de forma mais detalhada e precisa o material (PEIXOTO *et al.*, 2010). A maior resolução é importante para a caracterização de madeiras modificadas termicamente, uma vez que o processo promove

alterações heterogêneas na microestrutura do material, sendo necessário técnicas mais detalhadas para detectar possíveis alterações.

Embora frequências mais altas apresentem naturalmente menor amplitude de sinal, conforme observado por Tiitta *et al.* (2020), o uso de gel de acoplamento no equipamento de 500 kHz compensa essa limitação, garantindo boa transmissão do sinal e consequentemente um maior R^2 . Trinca e Gonçalves (2009) demonstraram que frequências acima de 500 kHz são mais adequadas para corpos de prova de dimensões laboratoriais, pois permitem obter relação comprimento/comprimento de onda (L/λ) superior a 3,0, condição necessária para evitar interferências que comprometem a precisão das medições ultrassônicas. Oliveira *et al.* (2006) enfatizam a importância de adequar a frequência do transdutor com o tamanho do corpo de prova para obter medições confiáveis, confirmando que a compatibilidade entre essas variáveis é fundamental para a assertividade dos resultados.

Tabela 6 - Coeficientes de determinação (R^2) para o método de excitação por impulso em relação ao MOE estático, por tratamento.

Tratamentos	Coeficiente de determinação (R^2)	
	Flexional	Longitudinal
Controle	MOE = 623,6 + 0,710 MOEd 97,49%	MOE = 1234 + 0,572 MOEd 97,96%
140 °C	MOE = 450,3+ 0,704 MOEd 94,01%	MOE = 747,2 +0,598 MOEd 92,37%
180 °C	MOE = 744,2 + 0,711 MOEd 94,39%	MOE = 957,6 +0,584 MOEd 92,98%
220 °C	MOE = 143,5 + 0,769 MOEd 94,63%	MOE = 912,9 +0,601 MOEd 92,94%
240 °C	MOE = 157,8 + 0,807 MOEd 96,86%	MOE = 441,8 +0,682 MOEd 97,35%
Geral	MOE = 456,0 + 0,737 MOEd 95,00%	MOE = 527,6 +0,722 MOEd 96,16%

Tabela 7 - Coeficientes de determinação (R^2) para o método de ondas ultrassônicas em relação ao MOE estático, por tratamento.

Tratamentos	Coeficiente de determinação (R^2)	
	Frequência de 90 kHz	Frequência de 500 kHz
Controle	MOE = 155,6 + 0,9870 MOEd 96,20%	MOE = 1833+0,576 MOEd 94,38%
140 °C	MOE = 2942 + 0,5234 MOEd 88,70%	MOE = 782,4+0,628 MOEd 94,34%
180 °C	MOE = -3201 + 1,515 MOEd 78,40%	MOE = 1592 +0,578 MOEd 90,14%
220 °C	MOE = -816,4 + 1,208 MOEd 94,40%	MOE = 1073 +0,645 MOEd 91,92%
240 °C	MOE = -1426 + 1,346 MOEd 97,10%	MOE = 43,1 + 0,735 MOEd 96,94%
Geral	MOE = 2975 + 0,6256 MOEd 76,00%	MOE = 1060 +0,631 MOEd 93,80%

A regressão linear realizada para o conjunto completo de dados, considerando todos os tratamentos térmicos e métodos empregados, simultaneamente, apresentaram valores expressivos de R^2 , variando de 71,40% para o método de ondas ultrassônicas na frequência de 90 kHz a 97,96% para o método de excitação por impulso na direção longitudinal.

Resultados similares foram encontrados por Carrasco *et al.* (2017), ao estudarem madeiras de 29 espécies diferentes obtiveram um R^2 acima de 90% para vibração transversal, destacando a alta confiabilidade dos métodos não destrutivos. A consistência do R^2 do método entre diferentes espécies reforça a vasta aplicabilidade da técnica de excitação por impulso. Silva (2021), ao investigar madeiras de cedro indiano e eucalipto através da técnica de excitação por impulso, obteve coeficientes de determinação superiores a 70% entre MOEd e MOE na flexão estática para ambas as espécies.

A variação no R^2 observada ao longo do gradiente de temperaturas reflete as mudanças graduais na estrutura da madeira durante o processo de modificação térmica, influenciando a precisão dos modelos de predição (PAULA, 2021). Os tratamentos extremos (controle e 240 °C) apresentaram os maiores valores de R^2 , sugerindo uma maior previsibilidade das propriedades da madeira nessas condições. Para a madeira sem tratamento, os valores elevados de R^2 são consequência do seu estado natural de equilíbrio, enquanto na madeira tratada a 240 °C, os valores são reflexo da degradação intensa das hemiceluloses e zonas amorfas da celulose, resultando em uma estrutura mais homogênea. Essa uniformidade estrutural, decorrente da realocação da lignina e degradação das hemiceluloses, proporciona um comportamento mecânico mais consistente e previsível, refletindo-se em valores de R^2 mais elevados (ANDRADE, 2021). As temperaturas intermediárias apresentaram maior dispersão nos dados, o que pode ser explicado pelas mudanças químicas e estruturais que ocorrem nessas condições.

Mania *et al.* (2023) demonstraram que a modificação térmica afeta de forma diferenciada as propriedades dinâmicas da madeira, onde diferentes temperaturas de tratamento resultaram em variações na velocidade de propagação, mostrando que em temperaturas intermediárias as mudanças estruturais são heterogêneas, resultando em maior dispersão dos dados e, conseqüentemente, menor precisão preditiva dos modelos.

5.3.3. Propriedades de resistência

A análise geral das propriedades de resistência demonstrou respostas diferentes em relação às temperaturas de modificação térmica e as três espécies estudadas (Tabela 8 e Figura 22). Observa-se uma tendência geral de degradação em temperaturas acima de 220 °C para a maioria das propriedades e espécies. Este comportamento pode ser atribuído à degradação térmica dos componentes estruturais da madeira, especialmente as hemiceluloses, que apresentam degradação mais significativa acima de 200 °C (FIGUEROA e MORAES, 2009; GAFF *et al.*, 2023). Essa degradação resulta em alterações na parede celular e no surgimento de microfissuras, comprometendo a integridade estrutural do material (BLOKLAND *et al.*, 2020).

Dentre as espécies estudadas, *Eucalyptus* sp. demonstrou maior sensibilidade às altas temperaturas, apresentando degradação progressiva na resistência à tração e dureza Janka. *Cedrela* sp. demonstrou um comportamento intermediário entre as espécies, com redução significativa apenas na resistência à tração. *Pinus* sp. mostrou-se mais resistente aos efeitos térmicos, mantendo relativa estabilidade em todas as propriedades avaliadas. A resistência à tração foi a propriedade de resistência mais afetada pela modificação térmica em todas as espécies, com reduções de 60,20% (*Eucalyptus* sp.), 60,90% (*Cedrela* sp.) e 51,30% (*Pinus* sp.) na temperatura de 240°C.

Resultados semelhantes foram relatados por Oliveira (2020) em seu estudo com madeira de eucalipto. A autora observou uma redução ainda mais severa nas propriedades de resistência à tração, chegando a 72% de diminuição em relação ao controle quando a madeira foi submetida a uma temperatura superior a 180 °C. Além disso, a mesma constatou que essa redução se intensificava progressivamente conforme as temperaturas estudadas aumentavam. A maior degradação pode ser atribuída ao processo mais intensivo utilizado (autoclave com vapor saturado e pressão de 7,5 kgf/cm²), além de uma taxa de aquecimento maior (1,66°C/min).

Para a madeira de *Eucalyptus* sp., observou-se que a diminuição da resistência à tração é proporcional ao aumento do tratamento, com maiores reduções nos tratamentos a 220 °C e 240 °C. Esse padrão de comportamento corrobora os achados por OLIVEIRA (2019) em

madeira de *Dinizia excelsa*, onde a espécie apresentou uma redução progressiva na resistência nas temperaturas de 220 °C e 240 °C.

Medeiros *et al.* (2025) destacam que a degradação térmica dos componentes da parede celular, incluindo a celulose e as hemiceluloses, é o principal fator responsável pela redução na resistência. Essa afirmação é corroborada pela maior resistência da espécie *Pinus* sp., que demonstra maior estabilidade estrutural, particularmente na região aromática da lignina, evidenciada nos resultados do FTIR pela manutenção da intensidade das bandas em 1600 cm⁻¹ e 1510 cm⁻¹ (vibrações C=C aromáticas) e 1270-1230 cm⁻¹ (ligações C-O da lignina) mesmo a 240°C.

O maior teor de lignina característico das coníferas atua como um componente estrutural de reforço, conferindo maior estabilidade térmica ao conjunto da parede celular (SCHULZ *et al.*, 2020a). Lepage (1986) e Bächle *et al.* (2010) salientam que as folhosas possuem menor resistência térmica que as coníferas. Os autores salientam que essa diferença está relacionada principalmente à composição das hemiceluloses entre esses dois grupos. Nas coníferas, as galactomananas, que possuem ligações mais resistentes à degradação ácida, são majoritárias, enquanto nas folhosas, as xilanas predominam e são facilmente hidrolisadas em meio ácido. Outro fator que contribui para a menor resistência térmica das folhosas é a maior presença de grupos acetilas nas hemiceluloses (ESTEVES *et al.*, 2013). A combinação desses múltiplos fatores contribui para a maior resistência térmica e mecânica das coníferas, corroborando com os resultados observados no presente estudo.

Tabela 8 - Médias das propriedades de resistência à tração, dureza Janka e compressão axial para madeiras de *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp. e *Pinus* sp. em MPa em diferentes temperaturas de modificação térmica.

Propriedades de Resistência [MPa]									
Tratamentos	<i>Eucalyptus</i> sp.			<i>Cedrela</i> sp.			<i>Pinus</i> sp.		
	f_{t0}	f_{H90}	f_{c0}	f_{t0}	f_{H90}	f_{c0}	f_{t0}	f_{H90}	f_{c0}
Controle	102,48 A	49,99 A	56,65 A	20,89 A	19,84 B	27,59 A	96,40 A	55,95 A	56,08 A
	12,41*	3,60*	1,55*	3,24*	1,30*	2,50*	7,26*	4,66*	5,90*
	12,11%	7,20%	2,74%	15,49%	6,58%	9,06%	7,53%	8,32%	10,52%
140°C	82,31 B	44,11 AB	58,85 A	21,50 A	25,60 A	27,65 A	65,02 B	39,37 B	56,93 A
	7,93*	4,25*	8,18*	1,78*	2,89*	0,67*	5,18*	3,78*	4,09*
	9,64%	9,63%	13,90%	8,32%	11,28%	2,44%	7,97%	9,60%	7,18%
180°C	72,80 BC	40,91 B	57,23 A	17,45 A	21,07 B	29,91 A	53,77 B	49,11 A	63,07 A
	2,95*	4,08*	5,78*	1,48*	2,09*	2,89*	7,09*	4,85*	6,01*
	4,06%	9,97%	10,10%	8,48%	9,93%	9,67%	13,19%	9,87%	9,53%
220°C	59,64 C	35,76 BC	57,70 A	10,05 B	26,36 A	30,72 A	47,76 B	55,02 A	56,60 A
	4,44*	4,23*	2,90*	1,38*	2,85*	2,10*	2,36*	4,38*	5,40*
	7,44%	11,82%	5,03%	13,76%	10,81%	6,84%	4,94%	7,97%	9,54%
240°C	40,82 D	28,11 C	50,24 A	8,17 B	21,08 B	28,67 A	46,92 B	48,79 A	56,84 A
	5,91*	5,30*	4,83*	1,24*	2,04*	2,52*	3,12*	3,47*	4,31*
	14,48%	18,84%	9,56%	15,24%	9,69%	8,79%	6,65%	7,12%	7,58%

f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{H90} = resistência à dureza normal às fibras; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras. Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Os valores após o asterisco (*) representam o desvio padrão e os valores em % o coeficiente de variação.

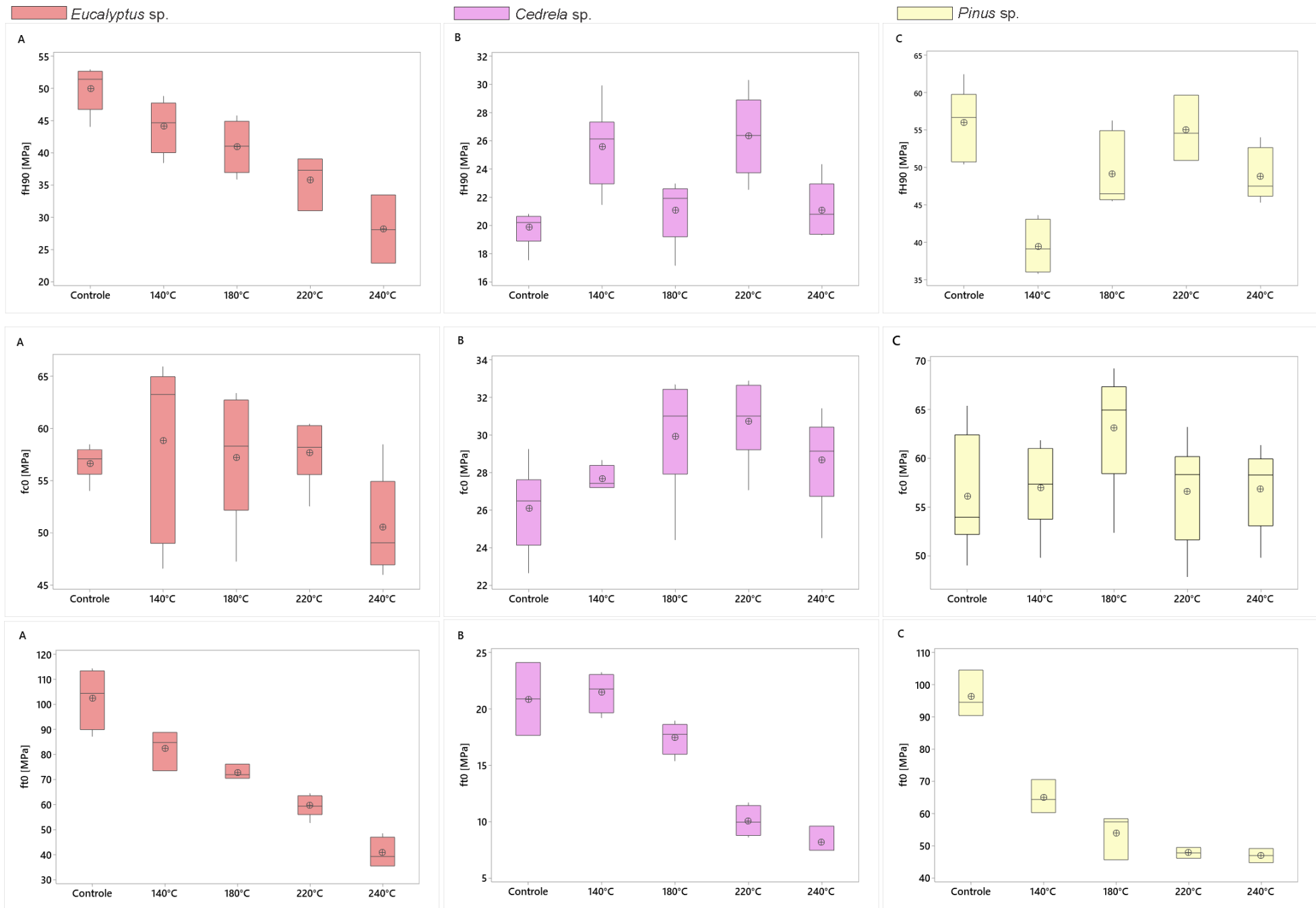


Figura 22 -Boxplots das propriedades mecânicas de resistência para três espécies de madeira submetidas a diferentes tratamentos térmicos. **A:** *Eucalyptus sp.* (vermelho); **B:** *Cedrela sp.* (rosa); **C:** *Pinus sp.* (amarelo). Linhas superior, média e inferior representam diferentes propriedades mecânicas avaliadas em MPa.

Os resultados de resistência à dureza Janka variaram entre as espécies em função de suas características anatômicas e químicas específicas. *Eucalyptus* sp. apresentou uma maior redução na dureza Janka quando exposto às temperaturas mais elevadas. Juizo *et al.* (2021) relataram resultados similares para clones de *Eucalyptus* submetidos à temperatura de 200°C por 4 horas, observando reduções na dureza Janka na maioria dos clones testados, sendo atribuídas à degradação dos componentes moleculares durante o aquecimento.

Pinus sp. demonstrou diminuição nessa propriedade apenas a 140 °C, temperatura que coincide com a transição vítrea de componentes amorfos da lignina (SALMEN, 1982), promovendo amolecimento e reorganizações estruturais da parede celular. Os resultados encontrados corroboram com o comportamento observado no ensaio de molhabilidade a 140 °C para a espécie, onde a mesma apresentou redução de 50,7% do ângulo de contato indicando uma organização estrutural que afeta a resistência superficial. Após essa temperatura, observa-se uma estabilização dessa propriedade, onde os valores voltam a não se distinguir do controle, aumentando em cerca de 15,68% em relação a temperatura de 140 °C.

Conceição *et al.* (2025) e Modes *et al.* (2017) relataram uma melhoria na dureza janka de *Pinus caribaea* e *Pinus taeda*, respectivamente, na temperatura de 160 °C, seguida por uma diminuição nas temperaturas mais intensas. Ates, Akyildiz e Ozdemir (2009) também relataram aumento desta propriedade em *Pinus brutia* na temperatura de 180 °C, confirmando os resultados do presente estudo. De acordo com Boonstra *et al.* (2007), a modificação térmica pode aumentar algumas das propriedades mecânicas devido a redução da higroscopicidade da madeira, também tornando a madeira mais resistente, compensando os efeitos da perda de massa. Os autores afirmam que devido a perda de umidade ocorrer principalmente pelos topos, o aumento da dureza janka pode ser justificado por esse processo.

Os valores de dureza Janka para *Cedrela* sp. apresentaram variações ao longo das temperaturas de modificação térmica. Observa-se uma melhoria da propriedade nas temperaturas de 140 °C e 220 °C. A manutenção da resistência à dureza, e até mesmo a melhoria observada está relacionada às características intrínsecas da espécie, incluindo sua composição química diferenciada e estrutura anatômica. Segundo Hill (2006), madeiras com menor conteúdo de hemiceluloses e maior proporção de extrativos naturais tendem a

apresentar maior estabilidade durante o tratamento térmico, uma vez que as hemiceluloses são os componentes mais termossensíveis da parede celular.

A resistência à compressão paralela às fibras foi a propriedade que apresentou maior estabilidade na modificação térmica, não sendo observadas diferenças significativas entre os tratamentos para nenhuma das espécies. Esta estabilidade sugere que as alterações químicas provocadas pelo tratamento térmico afetam minimamente os mecanismos de resistência à compressão. Figueroa (2012) em estudos com *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna* observou que a propriedade de compressão paralela às fibras apresenta o menor coeficiente de redução dentre as propriedades de resistência.

A manutenção da resistência à compressão pode ser explicada pelas mudanças estruturais que ocorrem durante a modificação térmica. O aumento das regiões cristalinas na madeira, decorrente da degradação preferencial das zonas amorfas, funciona como suporte estrutural (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2024), e quando combinada a reticulação da lignina, cria novas conexões entre componentes limitando o movimento das microfibrilas de celulose submetidas a pressão nesta direção (BAYANI *et al.*, 2019). Boonstra *et al.* (2007) afirma que a reticulação da lignina restringe o movimento das microfibrilas de celulose e fortalece a lamela média durante a compressão paralela às fibras, resultando em um aumento de resistência até determinada temperatura.

6 CONCLUSÕES

A modificação térmica da madeira representa mais do que uma técnica de tratamento da madeira, ela é uma ponte entre o conhecimento científico e a urgência de encontrar soluções sustentáveis para o setor madeireiro. O presente estudo demonstrou que é possível transformar madeiras de rápido crescimento em materiais com características tecnológicas superiores, demonstrando que cada espécie responde de maneira única ao tratamento. As análises químicas, físicas e mecânicas evidenciaram que a modificação térmica não é um processo isolado, mas sim um sistema interdependente, onde as transformações são consecutivas e sinérgicas. As alterações químicas nos componentes

da madeira (degradação de hemiceluloses, modificação da lignina) influenciam diretamente as propriedades físicas (densidade, estabilidade dimensional, higroscopicidade), que por sua vez afetam o comportamento mecânico (resistência, rigidez). Essas mudanças estruturais e composicionais também se manifestam nas alterações de cor, que refletem as transformações químicas dos componentes.

Para estudos futuros, os métodos não destrutivos validados neste trabalho abrem caminho para uma avaliação mais rápida e econômica da qualidade da madeira, sendo necessário explorar mais espécies e temperaturas. Em relação a aplicação industrial, existe um intervalo de temperatura entre 140 °C e 180 °C que pode oferecer um equilíbrio ideal entre melhoria das propriedades e preservação da integridade estrutural, demandando estudos mais aprofundados para determinar as condições ótimas de tratamento para cada espécie e aplicação final desejada.

REFERÊNCIAS

ABREU NETO, R. et al. Efeito do tratamento térmico na morfologia das fibras na pirólise da madeira. **Ciência e Tecnologia da Madeira**, [s.l.], v. 55, n. 1, p. 95-108, 2021.

ADIBASKORO, T. et al. Modulus of elasticity, thermal expansion, and pyrolysis shrinkage of Norway spruce under high temperature. **Fire Technology**, [s.l.], v. 57, p. 2451-2490, 2021.

AFLALO, M. **Estruturas em madeira: forma e método**. 2020. 185 f. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

AGNES, E. A. **Desenvolvimento de compósitos a base de polietileno de baixa densidade e nanofibras de celulose**. 2022. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2022.

ALBREKTAS, D. et al. The Influence of Thermal Modification on the Resistance to Water Impact Properties and Strength of Wood Used in Outdoor Conditions. **Wood Research**, [s.l.], v. 65, n. 3, p. 353-364, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken, PA, 2022.

_____. **ASTM D7334-08**: Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement. West Conshohocken, 2022.

_____. **ASTM E494-15**: standard practice for measuring ultrasonic velocity in materials. West Conshohocken, 2015.

ANDRADE, F. W. C. **Eficiência de métodos não destrutivos para classificação e predição de propriedades de madeira modificada termicamente**. 2021. 131 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2021.

ANDRADE, J. K. B.; PAES, J. B. Deck de madeira: considerações sobre a modificação térmica para a melhoria da qualidade do piso. In: ANDRADE, J. K. B. (Org.). **Estudos em Ciências Florestais e Agrárias**. Campina Grande: Licuri, 2023. p. 27-45.

ANDRADY, A. L.; HAMID, S.H.; HU, X.; TORIKAI, A. Effects of increased solar ultraviolet on materials. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**. P. 96-103. 1998.

ARRIAGA, F. et al. Mechanical properties of wood: a review. **Forests**, Basel, v. 14, n. 6, p. 1202, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ATES, S.; AKYILDIZ, M. H.; OZDEMIR, H. Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood. **Bioresources**, Raleigh, v. 4, n. 3, p. 1032-1043, 2009.

AYDIN, I. Surface Tension, Contact Angle and Wettability of Wood. **Wood Industry and Engineering**, v. 6, n. 1, p. 18-27, 2024.

BÄCHLE, H.; ZIMMER, B.; WINDEISEN, E.; WEGENER, G. Evaluation of thermally modified beech and spruce wood and their properties by FT-NIR spectroscopy. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 44, p. 421-433, 2010.

BACK, E. L.; SALMÉN, N. L. Glass Transition of Wood Components Hold Implications for Molding and Pulping Processes. **Tappi Journal**, Norgross, EUA, v. 65, n. 7, p. 107-110, 1982

BANIK, M. T.; LINDNER, D. L.; JUSINO, M. A. Intraspecific interactions among wood-decay fungi alter decay rates and dynamics of interspecific interactions. **Fungal Ecology**, v. 68, p. 101314, 2024.

BARAÚNA, E. E. P. et al. Umidade de equilíbrio da madeira de Eucalyptus Spp. para o município de Montes Claros, Minas Gerais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, e15711931160, 2022.

BARREIROS, R. M. et al. Comportamento químico e físico da madeira natural e termorretificada de clones de eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 1, e67304, 2023.

BATISTA, D. C. Retificação térmica, termorreificação, tratamento térmico, tratamento com calor ou modificação térmica?. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 463–480, jan. 2019.

BAYANI, S.; TAGHIYARI, H. R.; PAPADOPOULOS, A. N. Physical and mechanical properties of thermally-modified beech wood impregnated with silver nanosuspension and their relationship with the crystallinity of cellulose. **Polymers**, [s.l.], v. 11, p. 1538, 2019.

BAZ, R. J. Q.. **Qualidade de colagem de elementos de MLC segundo a ABNT NBR 7190-6 (2022) considerando dois tratamentos: CCA e termorreificação**. 2024. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2024.

BENHAMOU, A. A. et al. How can cellulosic fibers enhance adhesion in engineered wood? **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 161, p. 100852, 2024.

BESSALA, L. F. B. et al. Effects of different heat treatment media on odorous constituents, chemical decomposition and mechanical properties of two hardwoods. **RSC Advances**, [s.l.], v. 14, n. 11, p. 7414-7429, 2024.

BHUIYAN, M. T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. **Journal of Wood Science**, [s.l.], v. 46, n. 6, p. 431-436, 2000.

BIRINCI, E.; KARAMANOĞLU, M.; KESIK, H. I.; KAYMAKCI, A. Effect of heat treatment parameters on the physical, mechanical, and crystallinity index properties of Scots pine and beech wood. **BioResources**, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 4713-4729, 2022.

BLOKLAND, J. V. et al. Crack formation, strain distribution and fracture surfaces around knots in thermally modified timber loaded in static bending. **Wood Science and Technology**, [s.l.], v. 54, p. 1001-1028, 2020.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s.l.], v. 64, n. 3, p. 204-211, 2006.

BOONSTRA, Michiel J. et al. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of forest science**, [s.l.], v. 64, n. 7, p. 679-690, 2007.

BÖRCSÖK, Z.; PÁSZTORY, Z. The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s.l.], v. 79, n. 3, p. 511-526, 2021.

BRITO, J. O. et al. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termoretificação. **CERNE**, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.

BRODA, M.; PLAZA, N. Z. Durability of model degraded wood treated with organosilicon compounds against fungal decay. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. v. 178, p. 105562, 2023.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; BALLARIN, A. W. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, n. 4, p. 453-460, 2012.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; BALLARIN, A. W. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, n. 4, p. 453-460, 2012.

CALONEGO, F. W. et al. Propriedades Físicas da Madeira Juvenil e Madura Modificada Termicamente de *Hevea brasiliensis* (Euphorbiaceae). **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 2, p. e20170841, 2020.

CALONEGO, F. W. **Caracterização tecnológica da madeira de Schizolobium parahyba (Vell.) blake modificada termicamente**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, n. 71, p. 30-41, 2001.

CANDAN, Z.; GÖRGÜN, H. V.; KORKUT, S.; ÜNSAL, Ö. Surface roughness and wettability performance of thermally modified rowan wood as a fast-growing species. **Drewno**, [s.l.], v. 64, n. 208, p. 35-44, 2021.

CANDATEN, L. et al. Determination of total extractives and cellulose content of Ipê wood subjected to thermal modification process. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, [s.l.], v. 22, n. 1, e22006, 2023.

CANDELIER, K.; DIBDIAKOVA, J. A review on life cycle assessments of thermally modified wood. **Holzforschung**, [s.l.], v. 75, n. 3, p. 199-224, 2021.

CANDELIER, K.; THEVENON, M. F.; PETRISSANS, A. et al. Control of heat treatment of wood and its effects on resistance to decay: a revision. **Proceedings of Forest Sciences**, [s.l.], v. 73, p. 571-583, 2016.

CARRASCO, E. V. M. et al. Caracterização mecânica de madeiras por meio de excitação por impulso. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, 2017.

CHEN, C. et al. Structure-property-function relationships of natural and engineered wood. **Nature Reviews Materials**, London, v. 5, p. 642-666, 2020.

CHENG, X. Y. et al. Effect of thermal treatment on functional groups and degree of cellulose crystallinity of eucalyptus wood (*Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*). **Forest Products Journal**, [s.l.], v. 67, n. 1-2, p. 135-140, 2017.

COLIN, B. et al. Wood behavior during thermal transition between torrefaction and pyrolysis: chemical and physical modifications. **Wood Material Science & Engineering**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 244-253, 2021.

CONCEIÇÃO, F. P. da et al. Efeito da modificação térmica nas propriedades de madeiras exóticas de plantios comerciais. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 25, p. e135681, 2025.

COSTA, H. W. D. et al. Brittleness increase in Eucalyptus wood after thermal treatment. **International Wood Products Journal**, London, v. 11, n. 1, p. 38-42, 2020.

CRUZ, S. S. et al. Utilização de ondas acústicas para a caracterização de propriedades físicas e mecânicas das madeiras. **Peer Review**, [s.l.], v. 6, n. 12, p. 97-116, 2024.

DALLA COSTA, H. W. et al. **Funcionalização da madeira de eucalipto**. 2022. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

DANIHELOVÁ, A.; VIDHOLDOVÁ, Z.; GERGEL', T.; SPIŠIAKOVÁ KRUŽLICOVÁ, L.; PÁSTOR, M. Thermal Modification of Spruce and Maple Wood for Special Wood Products. **Polymers**, [s.l.], v. 14, n. 14, p. 2813, 2022.

ELRHAYAM, Y. et al. Harnessing artificial neural networks and linear regression models for modeling thermal modification processes: characterization by FTIR and prediction of the mechanical properties of Eucalyptus wood. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s.l.], v. 176, p. 106809, 2024.

ESTEVEES, B.; PEREIRA, H. Wood modification by heat treatment: a review. **BioResources**, [s.l.], v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.

ESTEVEES, B. et al. Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR. **Maderas. Ciencia y tecnología**, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 245-258, 2013.

FATHI, H.; KAZEMIRAD, S.; NASIR, V. Lamb wave propagation method for nondestructive characterization of the elastic properties of wood. **Applied Acoustics**, Amsterdam, v. 171, p. 107565, 2021.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: Walter de Gruyter, 1984.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood - Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. 2nd Edition. Berlin: Walter de Gruyter, 1989.

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**, [s.l.], v. 25, n. 1, 2018.

FIGUEIREDO, A. T. de; BARRADO, C. M. **Processos da indústria química**. Curitiba: Intersaberes, 2023. 2 MB, PDF. (Série química em processo).

FIGUEROA, M. M. J. **Coeficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura**. 2012. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. DE. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

FOREST PRODUCT LABORATORY. **Wood handbook - Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

GAFF, M. et al. Impact of thermal modification on color and chemical changes of African padauk, merbau, mahogany, and iroko wood species. **Reviews on Advanced Materials Science**, [s.l.], v. 62, n. 1, p. 20220277, 2023.

GARCÍA-IRUELA, A. et al. Changes in cell wall components and hygroscopic properties of *Pinus radiata* caused by thermal treatment. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s.l.], v. 79, n. 4, p. 851-861, 2021.

GARDNER, D. J.; WOLCOTT, M. P.; WILSON, L.; HUANG, Y.; CARPENTER, M. **Our understanding of wood surface chemistry in 1995**. Madison: USDA / Forest Product Society, 1995.

GÉRARDIN, P. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood - a review. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 73, n. 3, p. 559-570, 2016.

GOODELL, B.; WINANDY, J. E.; MORRELL, J. J. Degradação fúngica da madeira: dados emergentes, novos insights e percepções em mudança. **Coatings**, v. 10, p. 1210, 2020.

GRININS, J.; SOSINS, G.; BRAZDAUSKS, P.; ZICANS, J. Chemical Composition and Mechanical Properties of Wood after Thermal Modification in Closed Process under Pressure in Nitrogen. **Materials**, v. 17, n. 7, p. 1468, 2024.

GUIRARDI, B. D. **Efeito da termorreificação nas propriedades da madeira de desbaste de *Tectona grandis* L.f.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

HASSANI, S. et al. Os efeitos da idade da árvore, espessura e profundidade da madeira na densidade e propriedades mecânicas da madeira de choupo preto tratada termicamente (*Populus nigra*). **BioResources**, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 4086-4101, 2022.

HILL, C.; ALTGEN, M.; RAUTKARI, L. Thermal modification of wood - a review: chemical changes and hygroscopicity. **Journal of Materials Science**, v. 56, p. 6581-6614, 2021.

HILL, C. A. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. John Wiley & Sons, 2006.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2024**. São Paulo: IBÁ, 2024. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2024.

INO, A.; SHIMBO, L. (org.). **Projetar e construir com madeira**. São Paulo: Blucher, 2023. 184 p.: il.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: IPT, 1989.

ISHAK, W. H. W.; ROSLI, N. A.; AHMAD, I. Influência da celulose amorfa na degradação mecânica, térmica e hidrolítica de biocompósitos de poli(ácido láctico). **Scientific Reports**, London, v. 10, n. 11342, 2020.

JANKOWSKA, A. et al. The role of extractives and wood anatomy in the wettability and free surface energy of hardwoods. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 3082-3097, 2018.

JESUS, D. S. **Melhoria das propriedades físicas, acústicas, mecânicas e biológicas da madeira pela técnica de acetilação**. 2023. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Sul da Bahia, Eunápolis, 2023.

JUIZO, C. G. F. et al. Thermal modification of eucalyptus wood and use for floors of low traffic environments. **Floresta**, Curitiba, v. 51, n. 2, p. 457-465, 2021.

JUIZO, C. G. F. et al. Propriedades tecnológicas da madeira de eucalipto submetida ao tratamento térmico. **Nativa**, v. 6, n. 5, p. 537-542, 2018.

JURCZYKOVÁ, T.; ŠÁROVEC, O.; KAČÍK, F.; HÁJKOVÁ, K.; JURCZYK, T.; HRČKA, R. Chromophores' Contribution to Color Changes of Thermally Modified Tropical Wood Species. **Polymers**, [s.l.], v. 15, n. 19, p. 4000, 2023.

KAUR, P.; BHARDWAJ, N. K.; SHARMA, J. A study elucidating the relation between cellulose dissolution and crystallinity after cellulase treatment at different doses. **3 Biotech**, Berlin, v. 11, n. 8, p. 371, 2021.

KILINÇARSLAN, S.; TÜRKER, Y. S. The effect of industrial heat treatment on the wettability and dimensional stability of ash (*Fraxinus excelsior*) wood. **Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences**, Isparta, v. 25, n. 3, p. 473-480, 2021.

KUBOVSKÝ, I.; KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F. Structural Changes of Oak Wood Main Components Caused by Thermal Modification. **Polymers**, [s.l.], v. 12, n. 2, p. 485, 2020.

KUMAR, K. V.; PANWAR, N. L. Pyrolysis technologies for biochar production in waste management: a review. **Clean Energy**, [s.l.], v. 8, n. 4, p. 61-78, 2024.

LAUDARES, S. et al. Efeitos da termorreificação nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. e67304, 2023.

LEE, S. H. et al. Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 408-419, 2018.

LENGOWSKI, E. C. et al. Properties of thermally modified teakwood. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 23, e2312410, 2021.

LEPAGE, E. S. Química da madeira. In: **LEPAGE, E. S. Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986a. cap. 4, p.69-98.

LI, M. et al. Structural characterization of steam-heat treated *Tectona grandis* wood analyzed by FT-IR and 2D-IR correlation spectroscopy. **Chinese Chemical Letters**, v. 26, n. 2, p. 221-225, 2015.

LI, X. et al. Effects of UV light irradiation on color changes in thermally modified rubber wood based on FTIR. **BioResources**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 5179-5197, 2020.

LIMA, A. C. B. **Efeito da modificação térmica nas propriedades da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)**. 2019. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2019.

LOBATO, C. C. S. et al. Densidade básica e estabilidade dimensional de madeiras tropicais modificadas por tratamentos térmicos. **Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Sinop, v. 8, n. 5, p. 708-714, 2020.

LOURENÇO, A.; ARAÚJO, S.; GOMINHO, J.; EVTUGUIN, D. Cellulose Structural Changes during Mild Torrefaction of Eucalyptus Wood. **Polymers**, [s.l.], v. 12, n. 12, p. 2831, 2020.

MANIA, P.; FLACH, A.; PILARSKA, M. Sound Wave Absorption Coefficient and Sound Velocity in Thermally Modified Wood. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 13, n. 14, p. 8136, 2023.

MANGINI, T. S. et al. A modificação térmica influencia na estabilidade dimensional da madeira de espécies de um sistema agroflorestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 51, e4006, 2023.

MARINI, L. J. **Estimativa de propriedades físicas e mecânicas de *Pinus sp.* por colorimetria**. 2019. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

MASTOURI, A. et al. Physicochemical properties of thermally treated poplar wood in silicone and rapeseed oils: A comparative study. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 43, p. 102511, 2021.

MEDEIROS, D.T. de et al. Physical-mechanical alterations in *Qualea paraensis* wood after heat treatment. **Madera y bosques**, [s.l.], v. 27, n. 2, 2021.

MEDEIROS, J. R. et al. Efeito dos processos de modificação térmica nas propriedades químicas, mecânicas e acústicas da madeira. **Caderno Pedagógico**, [s.l.], v. 22, n. 5, p. e15077-e15077, 2025.

MEDEIROS, P. N. et al. Resistência biológica e agentes deterioradores da madeira. In: ANDRADE, J. K. B. (Org.). **Fundamentos e pesquisas em Ciências Ambientais e Agrárias**. Campina Grande: Licuri, 2023. p. 73-89.

MEDEIROS, R. R. de. **Efeitos do tratamento térmico e do intemperismo na resistência aos cupins de uma madeira de rápido crescimento**. 2021. 41 f. Dissertação (Mestrado

em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

MELO, R. R. et al. Ultrasound to determine physical-mechanical properties of *Eucalyptus grandis* wood. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 23, n. 1, p. 1-10, 2021.

MENDOZA, Z. M. S. H.; BORGES, P. H. M.; MORAIS, P. H. M. Modificação térmica em madeiras tropicais. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 17, p. 382, 2020.

METSÄ-KORTELAJINEN, S.; VIITANEN, H. Wettability of sapwood and heartwood of thermally modified Norway spruce and Scots pine. **European Journal of Wood Products**, [s.l.], v. 70, p. 135-139, 2012.

MIRANDA, J. A. S. et al. Relação entre densidade básica e resistência à flexão estática das madeiras de três espécies nativas do cerrado. In: **Madeiras Nativas E Plantadas Do Brasil: Qualidade, Pesquisas E Atualidades-Volume 2**. Campina Grande: Editora Científica Digital, 2021. p. 144-153.

MITSUI, K.; TSUCHIKAWA, S. Low atmospheric temperature dependence on photodegradation of wood. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, [s.l.], v. 81, n. 2, p. 84-88, 2005.

MODES, K. S. et al. Efeito da termorreificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 291-302, 2017.

MORETTI, B. S.; FURTINI NETO, A. E.; PINTO, S. I. C.; FURTINI, I. V.; MAGALHÃES, C. A. S. Crescimento e nutrição mineral de mudas de cedro australiano (*Toona ciliata*) sob omissão de nutrientes. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 453-463, 2011.

NETO, P. M. et al. Resistência biológica e agentes deterioradores da madeira. In: ANDRADE, J. K. B. (Org.). **Fundamentos e pesquisas em Ciências Ambientais e Agrárias**. Campina Grande: Licuri, 2024. p. 73-89.

N'GUESSAN, J. L. L. et al. Wood extractives: Main families, functional properties, fields of application and interest of wood waste. **Forest Products Journal**, Madison, v. 73, n. 3, p. 194-208, 2023.

NUOPPONEN, Mari et al. The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods. **Wood Science and Technology**, v. 37, p. 109-115, 2003.

OLIVEIRA, A. L. C. **Taxa de carbonização de madeiras de espécies folhosas e características mecânicas do angelim-vermelho em altas temperaturas**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

OLIVEIRA, C. A. B. **Influência do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas de madeiras de reflorestamento**. 2020. 95 f., il. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2020.

OLIVEIRA, F. G. R. DE . et al.. Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultrassônica em madeiras. **Revista Árvore**, [s.l.], v. 30, n. 1, p. 141–145, jan. 2006.

ORNAGHI, H. L., Jr.; FACCIO, M.; SOARES, M. R. F. Thermal degradation kinetics of natural fibers: determination of the kinetic triplet and prediction of the lifetime. **Polysaccharides**, [s.l.], v. 5, p. 169-183, 2024.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. **Caracterização do módulo de elasticidade de materiais isotrópicos por meio da técnica de excitação por impulso**. Informativo técnico-científico ITC-05/ATCP. Ribeirão Preto: ATCP Engenharia Física, 2013 2022. 27 p.

OTANI, Lucas Barcelos et al. **Determinação dos módulos elásticos de madeiras e derivados empregando a Técnica de Excitação por Impulso**. Informativo técnico-científico ITC-05/ATCP. Ribeirão Preto: ATCP Engenharia Física, set. 2022. 19 p.

PAULA, M. H. **Propriedades tecnológicas de madeiras submetidas a tratamentos térmicos para estabilização dimensional**. 2021. 231 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

PEDRAZZI, C. et al. **Química da madeira**. Santa Maria: UFSM, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências Florestais, 2019. 69 p. (Coleção Ciências Rurais, n. 27).

PEIXOTO, G. C. X. et al. Bases físicas da formação da imagem ultrassonográfica. **Acta Veterinaria Brasilica**, [s.l.], v. 4, n. 1, p. 15-24, 2010.

PENG, Q. et al. The effect of the changes in chemical composition due to thermal modification on the mechanical properties of *Pinus densiflora*. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 358, p. 129303, 2022.

PERIYASAMY, S. et al. Recent advances in consolidated bioprocessing for conversion of lignocellulosic biomass into bioethanol – A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 453, p. 139783, 2023.

PIERNIK, M. et al. Cor como um indicador de propriedades em alburno de pinheiro silvestre termicamente modificado. **Materiais**, [s.l.], v. 15, n. 16, p. 5776, 2022.

PIETROBON, I. M. **Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras pela dureza e pela densidade aparente de espécies de madeira provenientes de florestas nativas**. 2022. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

POHLEVEN, J.; BURNARD, M. D.; KUTNAR, A. Volatile organic compounds emitted from untreated and thermally modified wood: a review. **Wood and Fiber Science**, v. 51, n. 3, p. 231-254, 2019.

POUBEL, D. S. **Estabilidade da cor da madeira de *Pinus* termicamente modificada e tratada com nanopartículas**. 2014. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2014.

PROTA. ***Cedrela odorata***. Plant Resources of Tropical Africa, 2022. Disponível em: [https://uses.plantnet-project.org/en/Cedrela_odorata_\(PROTA\)](https://uses.plantnet-project.org/en/Cedrela_odorata_(PROTA)). Acesso em: 21 maio de 2025.

RIBEIRO, H. V. et al. **Retificação térmica de uma conífera de rápido crescimento**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

RODRIGUES, M. G. **Reutilização de um bio-solvente para fracionamento de madeira**. 2024. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química - Bioprocessos e Biosistemas) - Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2024.

SALMEN, L. **Temperature and water induced softening behaviour of wood fiber based material**. 1982. 150 f. Tese (Doutorado em Tecnologia) - Department of Paper Technology, The Royal Institute of Technology, Estocolmo, 1982.

SANTANA, M. C. et al. As Florestas nativas e plantadas como agentes prestadores de serviços ecossistêmicos. **A Sustentabilidade Ambiental da Agricultura e de Florestas Tropicais: Uma Visão Científica, Ecológica, Política e Social**, 2021.

SANTOS, V. B.; SILVA, G. C. Efeito da modificação térmica nas propriedades físicas da madeira de *Pinus caribaea* var. hondurensis Barrett & Golfari. **Caderno de Ciências Agrárias**, [s.l.], v. 13, p. 1-7, 2021.

SANTOS, V. G. **Aproveitamento da água residual da termorreificação do cedro indiano e avaliação do potencial de aplicação como biofertilizante**. 2023. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos) - Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2023.

SANTOS JÚNIOR, J. A. et al. Propriedades físicas da madeira modificada termicamente. In: **TÓPICOS ESPECIAIS EM ENGENHARIA FLORESTAL**. [S.l.: s.n.], 2024. v. 1, cap. 12, p. 246-259.

SCHULZ, H. R. et al. Chemical, mechanical, thermal, and colorimetric features of the thermally treated *Eucalyptus grandis* wood planted in Brazil. **Journal of Korean Wood Science and Technology**, Seoul, v. 49, n. 3, p. 226-233, 2021.

SCHULZ, H. R. et al. Avaliação de propriedades termoquímicas e físico-mecânicas de três espécies florestais de rápido crescimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 3, p. e-12818, 2020a.

SCHULZ, H. R.; ACOSTA, A. P.; BARBOSA, K. T.; GALLIO, E.I; BELTRAME, R.I; GATTO, D. A. Efeito do tratamento térmico da madeira de *Pinus elliottii* nos parâmetros físico-mecânicos e colorimétricos. **BIOFIX Scientific Journal**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 86-93, 2020b.

SEGAL, L. et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-Ray diffractometer. **Textile Research Journal**, [s.l.], v. 29, n. 10, p. 786-794, 1959.

SEGUNDINHO, P. G. DE A. et al. Variação dos módulos de elasticidade e ruptura em madeira de cedro-australiano por meio de ensaios não destrutivo e destrutivo. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1163–1178, jul. 2018.

SENALIK, C. A.; FARBER, B. Mechanical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - wood as an engineering material**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 2021. cap. 5, p. 1-46. (General Technical Report FPL-GTR-282).

SERNEK, Milan; KAMKE, Frederick A.; GLASSER, Wolfgang G. Comparative analysis of inactivated wood surfaces. **Holzforschung**, v. 58, n. 1, p. 22-31, 2004.

SHEN, Y.; GAO, Z.; HOU, X.; CHEN, Z.; JIANG, J.; SUN, J. Análise espectral e térmica da secagem da madeira de eucalipto em diferentes temperaturas e métodos. **Tecnologia de Secagem**, [s.l.], v. 38, n. 3, p. 313-320, 2019.

SIKORA, A. et al. Impacto da modificação térmica na cor e nas mudanças químicas da madeira de abeto e carvalho. **Journal of Wood Science**, [s.l.], v. 64, n. 4, p. 406-416, 2018.

SIKORA, A. et al. Degradation of chemical components of thermally modified Robinia pseudoacacia L. wood and its effect on the change of mechanical properties. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 24, p. 15652, 2022.

SILVA, K. C. A. **Chips de resíduos madeireiros termotratados para uso na maturação da cachaça**. 2024. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024.

SILVA, L. S. Z. R. S.; PANZERA, T. H.; GARCIA, C. T.; SILVA, D. A. L.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Propriedades físico-mecânicas da madeira de cajueiro estimadas por métodos não destrutivos com base na densidade aparente e frequência natural de vibração. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 4, e66096, 2023.

SILVA, R. C. S. et al. Identificação anatômica e avaliação da melhoria na estabilidade dimensional em espécies amazônicas termorretificadas. **Matéria**, [s.l.], v. 27, n. 2, p. e13205, 2022.

SILVA, V. A. N. **Caracterização não destrutiva de elementos de madeira usando a técnica de excitação por impulso**. 2021. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2021.

SIVRIKAYA, H. et al. Vacuum-heat treatment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood pre-treated with propanetriol. **Wood Material Science & Engineering**, [s.l.], v. 17, n. 5, p. 328-336, 2020.

SOARES, V. C. et al. Higroscopicidade da madeira de *Eucalyptus grandis* tratada por imersão em extrato de barbatimão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 119, p. 475-482, 2018.

SORATTO, D. N. et al. Effect of thermal treatment variables on the thermogravimetric properties of eucalypt wood. **Maderas, Cienc. tecnol.**, Concepción, v. 22, n. 2, p. 241-250, abr. 2020.

SOUZA, C. G. F. **Influência da aplicação repetida de forças na rigidez de peças fletidas de madeira lamelada colada**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

THYBRING, E. E.; FREDRIKSSON, M. Wood modification as a tool for understanding moisture in wood. **Forests**, Basel, v. 12, n. 3, p. 372, 2021.

TIITTA, M. et al. Detection of natural defects in wood using air-coupled ultrasound and ferroelectret and piezoelectric sensors. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 54, n. 4, p. 1051-1064, 2020.

TIMAR, M. C.; VARODI, A.; HACIBEKTASOGLU, M.; CAMPEAN, M. Color and FTIR analysis of chemical changes in beech wood (*Fagus sylvatica* L.) after light streaming and heat treatment in two different environments. **BioResources**, [s.l.], v. 11, n. 4, p. 8325-8343, 2016.

TRACHE, D. et al. Nanocelulose: dos fundamentos às aplicações avançadas. **Frontiers in Chemistry**, Lausanne, v. 8, p. 392, 2020.

TRINCA, A. J.; GONÇALVES, R. Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 1-8, 2009.

WANG, D.; FU, F.; LIN, L. Molecular-level characterization of changes in the mechanical properties of wood in response to thermal treatment. **Cellulose**, [s.l.], v. 29, n. 6, p. 3131-3142, 2022.

WANG, X. et al. A thermal modification technique combining bulk densification and heat treatment for poplar wood with low moisture content. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 291, p. 123395, 2021.

WEI, X. et al. Structure, Mechanical Performance, and Dimensional Stability of Radiata Pine (*Pinus radiata* D. Don) Scrimbers. **Advances in Polymer Technology**, [s.l.], v. 2019, p. 5209624, 2019.

WENTZEL, M.; BRISCHKE, C.; MILITZ, H. Dynamic and static mechanical properties of Eucalyptus nitens thermally modified in an open and closed reactor system. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, [s.l.], v. 21, n. 2, p. 141-152, 2019.

WILLEMS, W.; ALTGEN, M.; RAUTKARI, L. A molecular model for reversible and irreversible hygroscopicity changes by thermal wood modification. **Holzforschung**, [s.l.], v. 74, n. 4, p. 420-425, 2019.

WU, Z. et al. Efeitos do tratamento térmico nas propriedades interfaciais da madeira de *Pinus massoniana*. **Coatings**, [s.l.], v. 11, n. 5, p. 543, 2021.

XU, J.; ZHANG, Y.; SHEN, Y.; LI, C.; WANG, Y.; MA, Z.; SUN, W. New Perspective on Wood Thermal Modification: Relevance between the Evolution of Chemical Structure and Physical-Mechanical Properties, and Online Analysis of Release of VOCs. **Polymers**, v. 11, n. 7, p. 1145, 2019.

YUE, K. et al. Strength grading of Chinese poplar wood for structural use following thermal modification. **Polymer Testing**, Amsterdam, [s.l.], v. 123, p. 108032, 2023.

ZELINKA, S. L. et al. Review of Wood Modification and Functionalization Technologies. **Forests**, [s.l.], v. 13, n. 7, p. 1004, 2022.

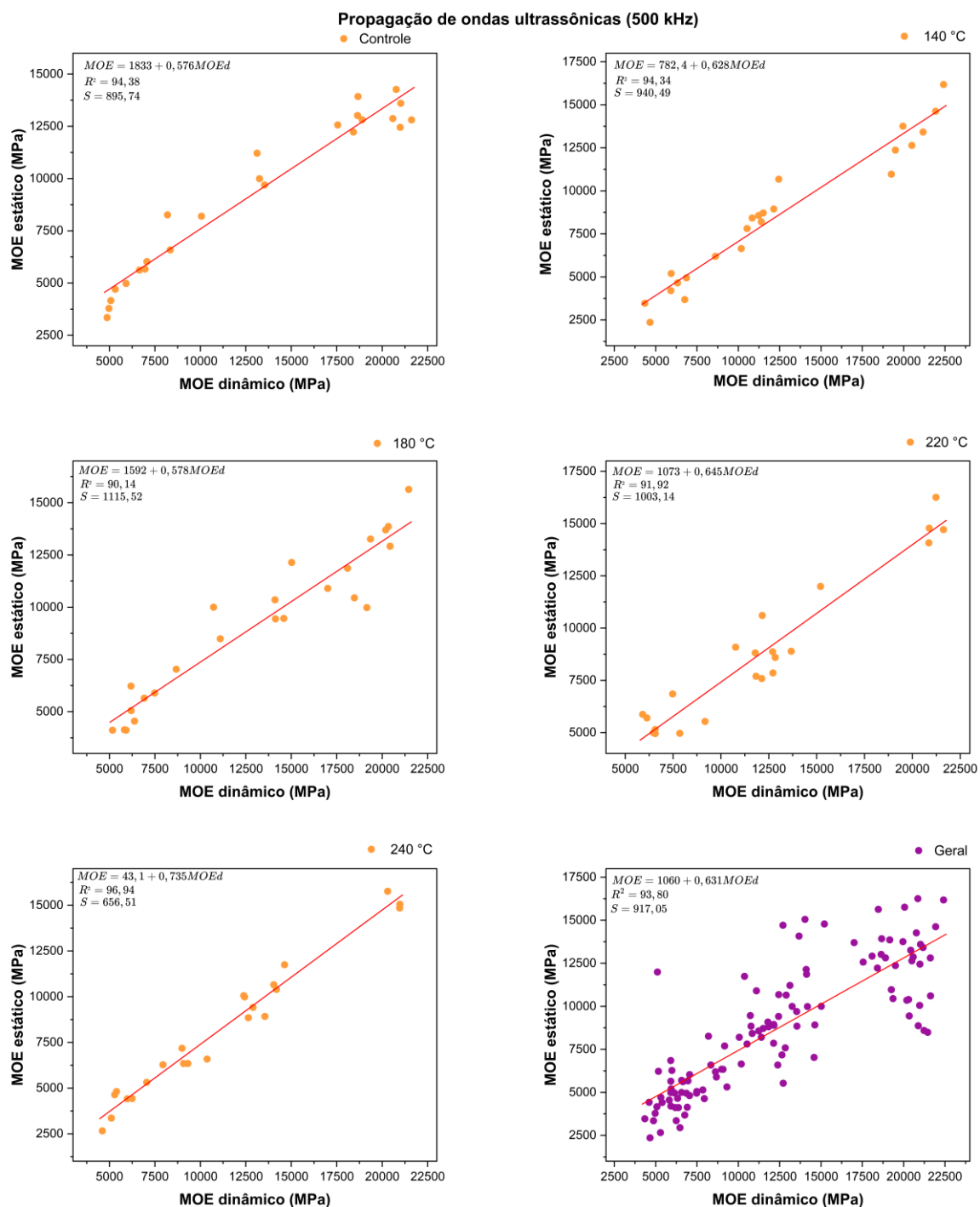
ZHANG, L. et al. Evaluation of the colour parameters on hygroscopicity and dimensional stability of thermally modified *Populus tomentosa* Carr. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v. 205, p. 117506, 2023.

ZHANG, P.; WEI, Y.; LIU, Y.; GAO, J.; CHEN, Y.; FAN, Y. Heat-Induced Discoloration of Chromophore Structures in Eucalyptus Lignin. **Materials**, [s.l.], v. 11, n. 9, p. 1686, 2018.

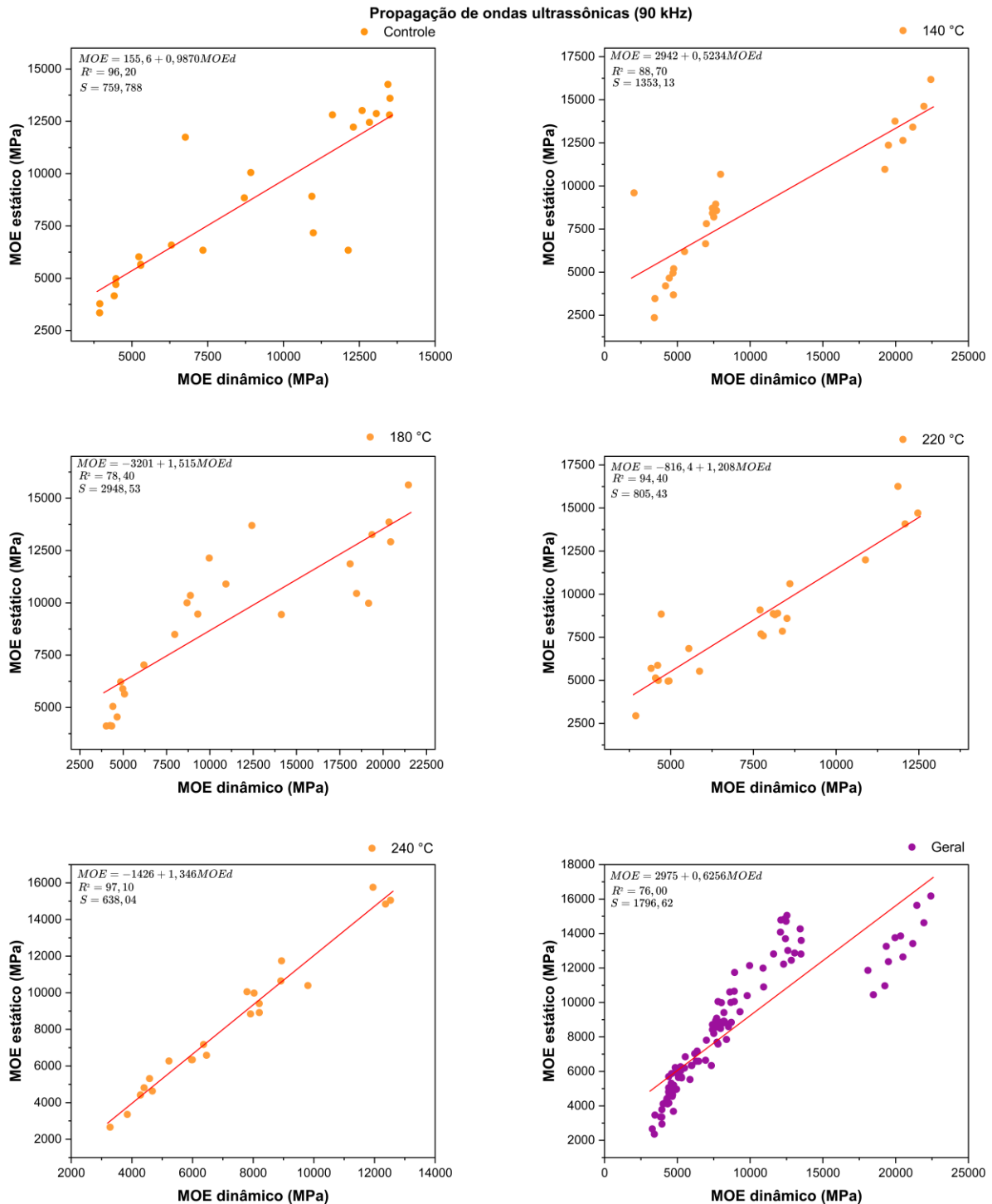
ZHANG, T. et al. Effects of heat treatment on physical-mechanical properties of Eucalyptus regnans. **BioResources**, [s.l.], v. 10, n. 2, p. 3531-3540, 2015.

APÊNDICE

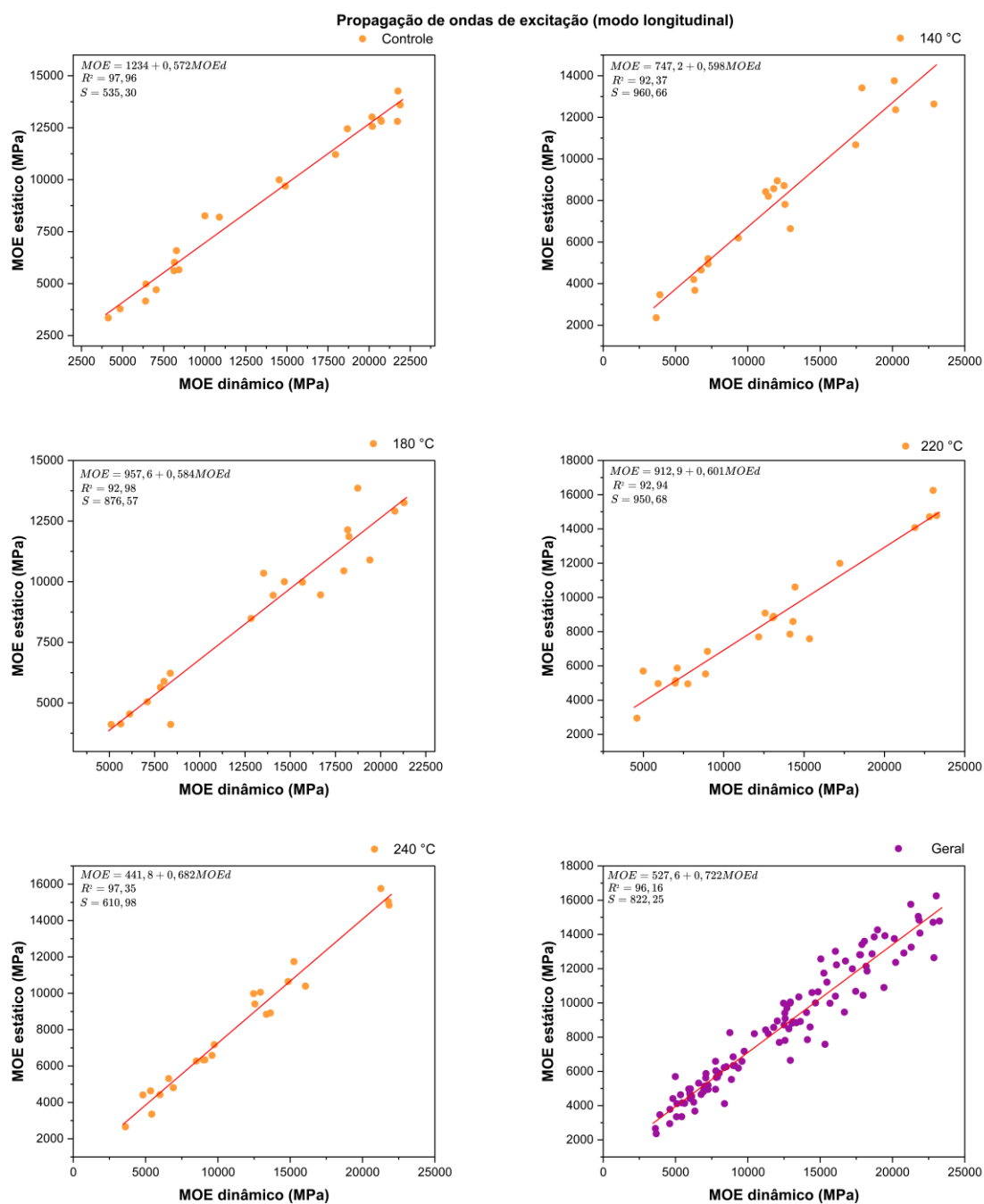
APÊNDICE A – Análise da relação MOE dinâmico e MOE estático em diferentes temperaturas para propagação de ondas ultrassônicas (500 kHz) em madeiras de *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp., e *Pinus* sp.



APÊNDICE B – Análise da relação MOE dinâmico e MOE estático em diferentes temperaturas para propagação de ondas ultrassônicas (90 kHz) em madeiras de *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp., e *Pinus* sp.



APÊNDICE C – Análise da relação MOE dinâmico e MOE estático em diferentes temperaturas para propagação de ondas de excitação no modo longitudinal, em madeiras de *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp., e *Pinus* sp.



APÊNDICE D – Análise da relação MOE dinâmico e MOE estático em diferentes temperaturas para propagação de ondas de excitação no modo flexional, em madeiras de *Eucalyptus* sp., *Cedrela* sp., e *Pinus* sp.

