

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE - UNICENTRO PROGRAMA  
DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS - PPGF**

**POTENCIAL TECNOLÓGICO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA  
POR PRÉ-HIDRÓLISE E DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**DISCENTE**

**Everton Lorenzett Tavares**

**ORIENTADOR**

**Everton Hillig**

**Irati - PR**

**2025**

**EVERTON LORENZETT TAVARES**

**POTENCIAL TECNOLÓGICO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA  
POR PRÉ-HIDRÓLISE E DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, para obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr Everton Hillig  
Orientador

Dr. Eraldo Antonio Bonfatti Júnior  
coorientador

Dr. Antônio José Vinha Zanuncio  
coorientador

**Irati - PR  
2025**

Catálogo na Publicação  
Rede de Bibliotecas da UNICENTRO

T231p Tavares, Everton Lorenzetti  
Potencial tecnológico da madeira de *Pinus taeda* L. modificada por pré-hidrólise e densificação termomecânica / Everton Lorenzetti Tavares. – Irati - PR, 2025.  
x, 114 f. : il. ; 28 cm.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, 2025.

Orientador: Everton Hillig

Coorientador: Eraldo Antonio Bonfatti Júnior

Coorientador: Antônio José Vinha Zanuncio

Banca examinadora: Éverton Hillig, Raquel Marchesan, Cilene Cristina Borges, Antonio José Vinha Zanuncio, Andrea Nogueira Dias

Bibliografia

1. Densificação da madeira. 2. Pré-hidrólise. 3. Modificações termomecânicas. 4. *Pinus taeda*. 5. Propriedades mecânicas. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais.

CDD 634.9



### ATA DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO Nº 66 - PPGF

Às oito horas e trinta minutos do dia dezoito de agosto de dois mil e vinte e cinco, no formato presencial e por videoconferência, sob a presidência do Prof. Dr. Éverton Hillig, em sessão pública, reuniu-se a Banca Examinadora de Defesa de Tese de Doutorado em Ciências Florestais, do pós-graduando **Everton Lorenzetti Tavares**, constituída pelos seguintes professores: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Raquel Marchesan, Universidade Federal do Tocantins, UFT, Primeira Examinadora. Prof<sup>ª</sup>. Dra. Cilene Cristina Borges, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Segunda Examinadora, Prof. Dr. Antonio José Vinha Zanuncio, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Terceiro Examinador, Prof<sup>ª</sup>. Dra. Andrea Nogueira Dias, Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, Quarta Examinadora, Prof. Dr. Éverton Hillig, Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, Orientador e Presidente da Banca Examinadora. Iniciados os trabalhos, o presidente deu conhecimento aos membros da Banca e o candidato das normas que regem a defesa de tese e definiu-se a ordem a ser seguida pelos examinadores para arguição. A seguir, o candidato passou a apresentação do trabalho intitulado “**POTENCIAL TECNOLÓGICO DA MADEIRA DE *PINUS TAEDA* L. MODIFICADA POR PRÉ-HIDRÓLISE E DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA**”. Encerrada a apresentação, o candidato foi arguido pelos membros da Banca Examinadora. Após as arguições e defesa, determinou-se um intervalo de tempo para que os membros da Banca procedessem ao julgamento. Na sequência, na presença do público e do pós-graduando, o presidente anunciou que Everton Lorenzetti Tavares foi APROVADO. A presidência ressaltou que a obtenção do título de **Doutor em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, está condicionada ao depósito da versão definitiva da tese impressa a laser, em 4 (quatro) cópias, 1 (uma) versão digital salva no formato PDF (*Portable Document Format*), com todas as correções feitas e atestadas pelo orientador, e comprovante de envio a uma revista científica de, no mínimo, 1 (um) artigo extraído da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias, e demais exigências da legislação vigente. O não atendimento no prazo anulará toda possibilidade de outorga definitiva do título, bem como o recebimento do diploma. Esta ata de defesa deverá ser homologada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e o título obtido deverá ser homologado pelo Comitê de Pós-Graduação da UNICENTRO. Nada mais havendo a ser tratado, a presente ata foi lavrada e assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo pós-graduando. Irati-PR, 19 de agosto de 2025.

Prof. Dr. Éverton Hillig  
Presidente/Orientador (UNICENTRO)

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Raquel Marchesan  
Membro (UFT)

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Cilene Cristina Borges  
Membro (UTFPR)

Prof. Dr. Antonio José Vinha Zanuncio  
Membro (UFU)

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Andrea Nogueira Dias  
Membro (UNICENTRO)

Everton Lorenzetti Tavares  
Pós-Graduando

*Este documento não substitui o diploma.*

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Campus Santa Cruz: Rua Salvatore Renna – Padre Salvador, 875, Bairro Santa Cruz – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 – FAX: (42) 3621-1090  
CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR

Campus Cedeteg: Alameda Élio Antonio Dalla Vecchia, 838, Bairro Vila Carli – Fone: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-167 – GUARAPUAVA – PR

Campus de Irati: Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez – Cx. Postal, 21 – Fone: (42) 3421-3000  
CEP 84.505-677 – IRATI – PR

## TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa Nº 66

**Everton Lorenzett Tavares**

### **"POTENCIAL TECNOLÓGICO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. MODIFICADA POR PRÉ-HIDRÓLISE E DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA."**

Tese aprovada em 19/08/2025, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof<sup>a</sup>. Dra. Raquel Marchesan,  
Universidade Federal do Tocantins,  
Primeira Examinadora.

Prof<sup>a</sup>. Dra. Cilene Cristina Borges,  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Segunda Examinadora.

Prof. Dr. Antonio José Vinha Zanuncio,  
Universidade Federal de Uberlândia  
Terceiro Examinador.

Prof<sup>a</sup>. Dra. Andrea Nogueira Dias,  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Quarta Examinadora.

Prof. Dr. Éverton Hillig,  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati – PR  
2025

Home Page: <http://www.unicentro.br>

**Campus Santa Cruz:** Rua Salvatore Renna – Padre Salvador, 875, Bairro Santa Cruz – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 – FAX: (42) 3621-1090  
CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR

**Campus Cedeteg:** Alameda Élio Antonio Dalla Vecchia, 838, Bairro Vila Carli – Fone: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-167 – GUARAPUAVA – PR

**Campus de Irati:** Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez – Cx. Postal, 21 – Fone: (42) 3421-3000  
CEP 84.505-677 – IRATI – PR



ePROTOCOLO

**Correspondência Interna 702/2025.**

Documento: **AtaetermodeAprovacao.pdf**.

Assinatura Avançada realizada por: **Andrea Nogueira Dias (XXX.258.396-XX)** em 14/10/2025 14:28 Local: UNICE/SC/PROAE, **Everton Hillig (XXX.289.800-XX)** em 17/10/2025 06:07, **Cilene Cristina Borges (XXX.273.366-XX)** em 21/10/2025 09:37 Local: CIDADAO, **Antonio Jose Vinha Zanuncio (XXX.608.396-XX)** em 28/10/2025 14:49.

Assinatura Simples realizada por: **Everton Lorenzett Tavares (XXX.188.449-XX)** em 15/10/2025 08:05 Local: CIDADAO, **Raquel Marchesan (XXX.527.049-XX)** em 14/11/2025 17:04.

Inserido ao documento **1.655.832** por: **Silvana Aparecida Kowalski** em: 14/10/2025 11:06.



Documento assinado nos termos do Art. 38 do Decreto Estadual nº 7304/2021.

A autenticidade deste documento pode ser validada no endereço:

<https://www.eprotocolo.pr.gov.br/spiweb/validarDocumento> com o código:

Dedico este trabalho àqueles que sempre me apoiaram e incentivaram. À minha família, com um carinho especial aos meus filhos, Eithor Senderski Tavares e Eloisa Senderski Tavares, que são minha inspiração constante; aos meus pais, Erondi Tavares da Silva e Lenir Maria Lorenzett Tavares, por todo amor e sabedoria compartilhados ao longo da vida; e ao meu irmão, Eduardo Lorenzett Tavares e à querida Katia Andreia Senderski pela amizade e apoio incondicional.

Minha gratidão eterna a todos vocês.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela saúde e vitalidade para superar mais esta jornada.

À Universidade Estadual do Centro-Oeste e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais pela oportunidade de aperfeiçoamento profissional e ampliação de conhecimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos para a condução desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Éverton Hillig, pela orientação, paciência, amizade, ensinamentos e constante apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Dr. Eraldo Antônio Bonfatti Júnior e Dr. Antônio José Vinha Zanuncio, pela coorientação, paciência, amizade, ensinamentos e constante ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva, mais conhecido como Colégio Florestal, por fornecer a madeira utilizada neste estudo, bem como a infraestrutura necessária para o processamento das toras, pranchas e corpos de prova.

A todos do Laboratório de Propriedades da Madeira da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela oportunidade de realização das análises essenciais para a conclusão deste trabalho.

A todos do Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal do Paraná, pela viabilização da análise de calorimetria.

A todos do Centro Integrado de Pesquisas de Biomassa, Biotecnologia e Bioenergia (BIO-3), pela oportunidade de realização da análise química da madeira.

A todos do Laboratório de Solos da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela oportunidade de utilização do espectrofotômetro para finalizar a análise química da madeira.

E a todos que, de alguma forma, me auxiliaram nesta caminhada.

## RESUMO

A crescente demanda por materiais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias aplicadas à modificação da madeira, especialmente aquelas provenientes de reflorestamento. Entre essas espécies, *Pinus taeda* destaca-se pela ampla disponibilidade e pelo potencial de valorização por meio de processos que aprimoram suas propriedades físico-mecânicas. Neste estudo, se investigou a modificação da madeira de *Pinus taeda* por meio de pré-hidrólise (auto-hidrólise, organossolve e alcalina) e densificação termomecânica. As tecnologias de pré-hidrólise, demonstraram eficácia ao alterar a estrutura química da madeira, especialmente ao reduzir teores de extrativos e hemiceluloses, e expor maior concentração de lignina. Essas modificações químicas tornaram a madeira mais suscetível à densificação, com resultados que aumentaram a densidade aparente em até 220% em relação à madeira *in natura* de pinus. As propriedades estéticas, como a coloração, também foram significativamente alteradas, com tons mais escuros e avermelhados atribuídos à degradação térmica das hemiceluloses e rearranjo da lignina. A combinação de pré-hidrólise e termodensificação reduziu a higroscopicidade da madeira e melhorou suas propriedades mecânicas, com aumentos de até 266% no Módulo de Ruptura (MOR) e 227% no Módulo de Elasticidade (MOE), tornando o material mais resistente. Além disso, a densificação proporcionou maior resistência ao fogo, reduzindo a perda de massa durante a combustão, aumentando o tempo de ignição e retardando o espalhamento do fogo, características essenciais para maior segurança estrutural em situações de incêndio. Ainda, evidenciou que a madeira densificada apresenta propriedades similares ou superiores às madeiras nativas comerciais, como Jatobá e Cumaru, destacando-se como uma alternativa viável e sustentável para substituir espécies nativas em aplicações estruturais e decorativas. As técnicas empregadas no trabalho não apenas aumentaram o desempenho físico e mecânico da madeira de Pinus, mas também demonstraram que seu uso pode reduzir a utilização de madeira oriundas de florestas nativas, promovendo sustentabilidade e inovação no setor madeireiro. Em aplicações estruturais, embora a densificação prolongue o tempo de chama e brasa, o que pode gerar combustão lenta, esse comportamento favorece o controle em casos de incêndio. Assim, o processo de termodensificação, combinado à pré-hidrólise, promove transformações que potencializam o uso do *P. taeda* como alternativa renovável e tecnológica. Este avanço tecnológico posiciona a madeira densificada como uma solução ecológica, reforçando o desenvolvimento de práticas sustentáveis.

**Palavras-chave:** Densificação da madeira; Pré-hidrólise; Modificações termomecânico; *Pinus taeda*; Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials has driven the development of technologies applied to wood modification, especially those from reforestation. Among these species, *Pinus taeda* stands out for its wide availability and potential for valorization through processes that improve its physical-mechanical properties. This study investigated the modification of *Pinus taeda* wood through pre-hydrolysis (autohydrolysis, organosolve and alkaline) and thermomechanical densification. Pre-hydrolysis technologies demonstrated effectiveness in altering the chemical structure of the wood, especially by reducing extractive and hemicellulose contents, and exposing a higher concentration of lignin. These chemical modifications made the wood more susceptible to densification, with results that increased apparent density by up to 220% compared to natural pine wood. Aesthetic properties, such as color, were also significantly altered, with darker and reddish tones attributed to thermal degradation of hemicelluloses and rearrangement of lignin. The combination of pre-hydrolysis and thermodensification reduced the hygroscopicity of the wood and improved its mechanical properties, with increases of up to 266% in the Modulus of Rupture (MOR) and 227% in the Modulus of Elasticity (MOE), making the material more resistant. In addition, densification provided greater fire resistance, reducing mass loss during combustion, increasing ignition time and delaying fire spread, essential characteristics for greater structural safety in fire situations. Furthermore, it showed that densified wood has properties similar to or superior to commercial native woods, such as Jatobá and Cumaru, standing out as a viable and sustainable alternative to replace native species in structural and decorative applications. The techniques employed in the study not only increased the physical and mechanical performance of pine wood, but also demonstrated that its use can reduce the use of wood from native forests, promoting sustainability and innovation in the timber sector. In structural applications, although densification prolongs the time of flame and embers, which can generate slow combustion, this behavior favors control in cases of fire. Thus, the thermodensification process, combined with pre-hydrolysis, promotes transformations that enhance the use of *P. taeda* as a renewable and technological alternative. This technological advance positions densified wood as an ecological solution, reinforcing the development of sustainable practices.

### **Keywords:**

Wood densification; Pre-hydrolysis; Thermomechanical modifications; *Pinus taeda*; Mechanical properties

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composição estrutural da parede celular.....	16
Figura 2. Estrutura química da celulose .....	17
Figura 3. Sistema de coordenadas de cores CIE L*a*b* .....	21
Figura 4. Localização da área de coleta da madeira.....	37
Figura 5. Diagrama ilustrando o método de seccionamento da tora de <i>Pinus taeda</i> para a preparação das amostras experimentais. ....	38
Figura 6. Sequência de procedimentos aplicados no tratamento e pré-hidrólise da madeira de <i>Pinus taeda</i> .....	40
Figura 7. Etapas do processamento termomecânico .....	42
Figura 8. Plano de corte dos corpos de prova destinados às análises físico-mecânicas.....	45
Figura 9. Teste de queima com curta exposição à chama .....	50
Figura 10. Inchamento em espessura após a imersão prolongada em água da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I). ....	57
Figura 11. Inchamento em espessura após a imersão prolongada em água da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II). ....	68
Figura 12. Principais defeitos identificados nos materiais densificados após o processo de tratamento, incluindo deformações, fissuras e outras irregularidades estruturais.....	80
Figura 13. Inchamento em espessura após a imersão prolongada em água da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento (Experimento III).....	82
Figura 14. Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais.....	87
Figura 15. Comparação das densidades aparentes da madeira <i>Pinus taeda</i> avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015). ....	88
Figura 16. Comparação do módulo de ruptura da madeira <i>Pinus taeda</i> avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015) .....	89
Figura 17. Comparação do módulo de elasticidade da madeira <i>Pinus taeda</i> avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015) .....	89
Figura 18. Comparação da Dureza Janka da madeira <i>Pinus taeda</i> avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015). ....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros utilizados no Experimento I conforme as diferentes concentrações de NaOH aplicadas durante o pré-tratamento. ....	43
Tabela 2. Parâmetros utilizados no Experimento II conforme as diferentes durações do pré-tratamento alcalino.....	43
Tabela 3. Parâmetros utilizados no Experimento III conforme os diferentes tipos de pré-tratamento aplicados.....	44
Tabela 4. Classificação da variação total da cor ( $\Delta E^*$ ) de madeiras. ....	48
Tabela 5. Composição química das amostras de madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I).....	52
Tabela 6. Colorimetria da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I). ....	54
Tabela 7. Taxa de compactação e propriedades físicas da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I).....	55
Tabela 8. Inflamabilidade da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I). ....	59
Tabela 9. Propriedades mecânicas da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I). ....	61
Tabela 10. Composição química estrutural da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II).....	63
Tabela 11. Colorimetria da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II). ....	65
Tabela 12. Taxa de compactação e propriedades físicas da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II).....	66
Tabela 13. Inflamabilidade da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II). ....	70
Tabela 14. Resistência mecânica da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II). ....	71
Tabela 15. Composição química estrutural da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento (Experimento III). ....	74
Tabela 16. Colorimetria da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento	

(Experimento III).....	77
Tabela 17. Taxa de compactação e propriedades físicas da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento (Experimento III).....	78
Tabela 18. Inflamabilidade da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento (Experimento III).....	83
Tabela 19. Resistência mecânica da madeira de <i>Pinus taeda</i> conforme o pré-tratamento (Experimento III).....	84
Tabela 20. Propriedades da madeira de <i>Pinus taeda</i> e termodensificada a 12% de teor de umidade, conforme o pré-tratamento (Experimento III).....	86

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1 MADEIRA: ASPECTO GERAIS .....	15
<b>3.1.1 Formação e Composição Anatômica</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1.2 Composição Química</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1.3 Propriedades da Madeira</b> .....	<b>19</b>
3.2 DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA .....	24
3.3 MODIFICAÇÕES TÉRMICAS EM MADEIRA .....	28
3.4 TERMODENSIFICAÇÃO EM MADEIRA.....	31
3.5 PRÉ-HIDRÓLISE EM MADEIRA .....	33
3.6 ALTERAÇÕES SUPERFICIAIS DA MADEIRA .....	35
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>37</b>
4.1 OBTENÇÃO DA MADEIRA.....	37
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	38
<b>4.2.1 Delineamento do Experimento I</b> .....	<b>42</b>
<b>4.2.2 Delineamento do Experimento II</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2.3 Delineamento do Experimento III</b> .....	<b>44</b>
4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DESTINADOS AOS TESTES EXPERIMENTAIS .....	45
4.4 TESTES E ANÁLISES .....	46
<b>4.4.1 Composição química da madeira</b> .....	<b>46</b>
<b>4.4.2 Propriedades físicas</b> .....	<b>47</b>
4.4.2.1 Colorimetria .....	47
4.4.2.2 Taxa de compactação .....	48
4.4.2.3 Densidade .....	48
4.4.2.4 Umidade de Equilíbrio Higroscópico .....	49
4.4.2.5 Inchamento em espessura .....	49
4.4.2.6 Teste de queima com curta exposição à chama .....	49

4.4.3	Propriedades mecânicas .....	50
4.4.4	Procedimentos estatísticos .....	51
5.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>52</b>
5.1	EXPERIMENTO I .....	52
5.1.1	Análise da composição química .....	52
5.1.2	Propriedades físicas .....	53
5.1.3	Propriedades mecânicas .....	60
5.2	EXPERIMENTO II .....	62
5.2.1	Análise da composição química .....	62
5.2.2	Propriedades físicas .....	64
5.2.3	Propriedades mecânicas .....	71
5.3	EXPERIMENTO III .....	73
5.3.1	Análise da composição química .....	73
5.3.2	Propriedades físicas .....	75
5.3.3	Propriedades Mecânicas .....	84
5.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS .....	91
6.	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>94</b>
7.	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>95</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>96</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a madeira tem sido utilizada como material construtivo em diferentes contextos, atendendo tanto ao uso doméstico quanto ao industrial (Pelit; Sönmez; Budakçi, 2015). Devido às suas propriedades físico-mecânicas, aliadas à excelente trabalhabilidade e estética, tornam esse material adequado para diversas finalidades (Khademi Bami; Mohebbi, 2011).

Em termos gerais, trata-se de um recurso leve, resistente e proveniente de fonte renovável, o que favorece sua competitividade em relação a materiais sintéticos ou de origem mineral, sobretudo em contextos que buscam reduzir custos e impactos ambientais (Tu *et al.*, 2014). Ainda assim, a madeira disponível comercialmente pode apresentar limitações quanto à estabilidade dimensional, durabilidade e resistência mecânica, restringindo seu uso em determinadas aplicações (Chen *et al.*, 2024).

Para atender às demandas de setores mais exigentes, torna-se importante direcionar o cultivo para espécies de crescimento rápido, capazes de fornecer madeira com características compatíveis com usos específicos. Essa estratégia reduz a exploração de florestas nativas e viabiliza o uso de recursos renováveis, sendo uma alternativa diante da falta de madeira plantada adequada para esse fim.

No Brasil, em 2023, a cultura do pinus ocupava aproximadamente 1,92 milhão de hectares, com predominância na região Sul, responsável por cerca de 89% da área plantada. Santa Catarina e Paraná concentram, respectivamente, 37,5% e 37% desse total (IBÁ, 2024). Entre as espécies cultivadas, o *Pinus taeda* é amplamente utilizado em setores como a indústria de celulose, a construção civil e a movelaria (Teixeira *et al.*, 2016).

O conhecimento aprofundado sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *P. taeda* é fundamental para a otimização de seu uso, permitindo o desenvolvimento de produtos com maior valor agregado. Dentre essas propriedades, a densidade merece destaque, por estar diretamente relacionada à estabilidade dimensional e à resistência mecânica (Iwakiri *et al.* (2008).

A fim de aprimorar essas características, diversas técnicas vêm sendo empregadas, com destaque para as modificações térmicas, físico-químicas e mecânicas, as quais promovem modificações estruturais e funcionais na madeira

(Conceição *et al.*, 2025). No presente trabalho, o enfoque recai sobre as modificações químicas associados à termodensificação, usualmente referidos como processos de densificação.

A densificação consiste na compressão da madeira sob temperatura e pressão controladas, resultando em aumento da densidade aparente, homogeneidade estrutural e resistência mecânica (Arruda; Del Menezzi, 2013; Pelit; Sönmez; Budakçı, 2015; Laine *et al.*, 2016; Bekhta *et al.*, 2017; Carvalho *et al.*, 2021). O desempenho do processo pode ser potencializado mediante a otimização de parâmetros como temperatura, pressão, umidade inicial e ciclos de prensagem (Pertuzzatti *et al.*, 2018).

Em determinadas abordagens, a densificação é precedida por modificações químicas que removem parcialmente componentes da parede celular (Silva, 2019). Existem processos específicos para remover cada classe de componente da madeira, um exemplo é a deslignificação, que emprega reagentes que promovem a fragmentação e solubilização da lignina, facilitando sua separação das fibras de celulose (Schieppati *et al.*, 2023). Inicialmente desenvolvida para o setor de papel e celulose, essa técnica tem sido adaptada para aplicações que requerem modificações estruturais mais profundas na madeira (Li *et al.*, 2021).

A remoção de constituintes celulares, no entanto, tende a reduzir a densidade do material e comprometer suas propriedades mecânicas. Nesse contexto, a associação de técnicas de remoção de elementos da matriz constituinte da madeira e posterior densificação apresenta-se como potencial alternativa, promovendo a reestruturação das paredes celulares e a recomposição da resistência do material (Silva, 2019; Maturana *et al.*, 2023).

O produto obtido por meio desses processos é uma madeira mais densa, homogênea e mecanicamente robusta, com potencial de aplicação ampliado nos setores da construção civil, do mobiliário e do design (Budakçı; Şenol; Korkmaz, 2022). Além da melhoria das propriedades mecânicas, observam-se ganhos na estabilidade dimensional e na resistência à variação higroscópica (Li *et al.*, 2021).

Todavia, o processo de densificação demanda controle rigoroso, infraestrutura específica e uso de reagentes que podem representar desafios econômicos e ambientais, o que limita sua disseminação em larga escala (Silva, 2019; Pertuzzatti *et al.*, 2018). Tais fatores devem ser cuidadosamente considerados na avaliação da viabilidade tecnológica e comercial dessa abordagem.

No Brasil, os processos de densificação da madeira ainda estão em fase experimental de desenvolvimento, o que dificulta produto ser competitivo no mercado. Embora se saiba que a modificação química tende a ser mais onerosa que a modificação térmica, ainda não há informações suficientes para afirmar seus entraves. Apesar disso, o contínuo desenvolvimento de tecnologias aplicadas ao *Pinus taeda* pode contribuir para ampliar sua participação no mercado e atender com maior precisão às demandas por materiais renováveis de alto desempenho.

A hipótese lançada neste estudo é que a madeira de *Pinus taeda* pode ter suas características físicas, mecânicas e estéticas melhoradas pelo uso conjunto dos tratamentos de pré-hidrólise e densificação, resultando em um material lignocelulósico com propriedades aprimoradas.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente estudo foi avaliar diferentes modificações de pré-hidrólise combinadas à densificação termomecânica, visando aprimorar as características do material lignocelulósico.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar a influência da pré-hidrólise na eficiência do processo de termodensificação;
- Avaliar o efeito da concentração de NaOH e do tempo de exposição na pré-hidrólise alcalina associada à termodensificação;
- Avaliar o efeito da solução da pré-hidrólise associada à termodensificação; e
- Analisar os efeitos da termodensificação nas propriedades químicas, físicas e mecânicas da madeira.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 MADEIRA: ASPECTO GERAIS

##### 3.1.1 Formação e Composição Anatômica

A madeira, ou xilema secundário, é um tecido vegetal lignificado composto por células diferenciadas responsáveis pela condução de água, suporte mecânico e armazenamento de substâncias (Groover; Mansfield, 2020). Ela é o resultado da atividade do câmbio vascular, um meristema lateral cujas células iniciais se dividem para formar tanto a madeira quanto o floema secundário, sendo produzida por plantas lenhosas pertencentes ao Reino Plantae, classificadas em duas grandes divisões: gimnospermas (coníferas) e angiospermas (folhosas) (Groover; Mansfield, 2020; Rodriguez-Zaccaro; Groover, 2019).

A constituição da madeira envolve tanto células mortas, como traqueídes, vasos e fibras, quanto células vivas, como os parênquimas axiais e radiais, que participam ativamente do armazenamento e da redistribuição de nutrientes e carboidratos, sendo responsáveis também pelo transporte radial de solutos, inclusive por mecanismos como a endocitose (Groover; Mansfield, 2020; Słupianek *et al.*, 2019).

Nas gimnospermas (coníferas), predominam traqueídes, células que exercem simultaneamente a condução axial e o suporte mecânico (Groover; Mansfield, 2020). Essas células, longas e estreitas, interconectam-se por meio de cavidades nas paredes celulares chamadas depressões, que permitem o fluxo de água e minimizam a propagação de bolhas de ar, garantindo a segurança hidráulica sob estresse hídrico (Rodriguez-Zaccaro; Groover, 2019).

Já nas angiospermas (folhosas), essas funções são diferenciadas: vasos promovem o transporte axial, enquanto fibras conferem resistência mecânica (Groover; Mansfield, 2020). Os vasos são compostos por elementos que se unem extremidade a extremidade, formando condutos longos e eficientes, porém mais suscetíveis à cavitação, processo pelo qual bolhas de ar (embolia) se formam no xilema, interrompendo o fluxo contínuo de água, especialmente em condições de estresse hídrico, como secas intensas (Rodriguez-Zaccaro; Groover, 2019).

Em ambas as divisões botânicas, ocorrem células parenquimáticas com

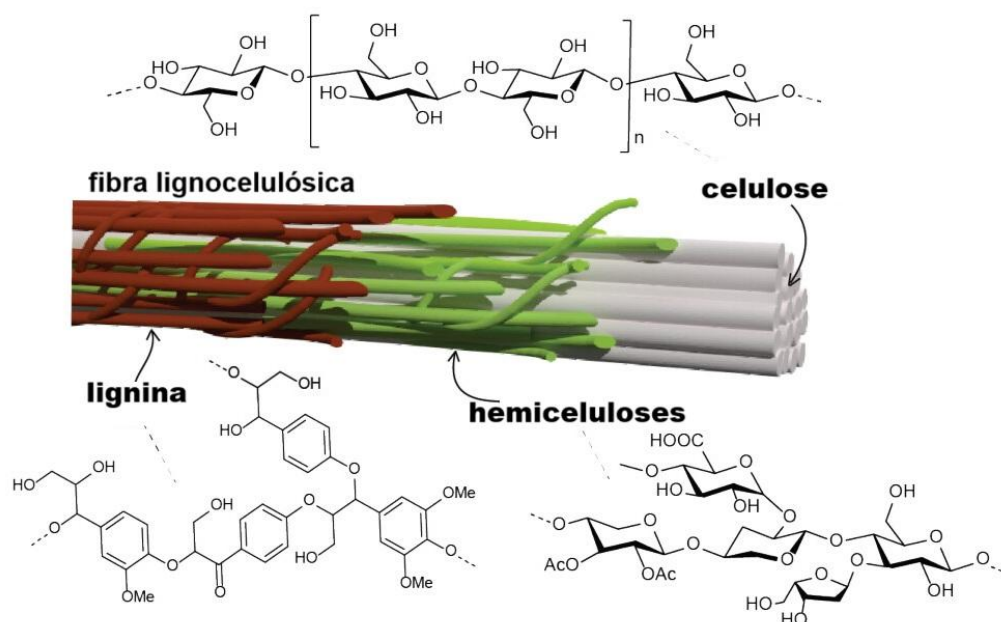
distribuição axial e radial, responsáveis por funções fisiológicas como armazenamento e redistribuição de fotoassimilados (Wiedenhoef; Miller, 2005; Groover; Mansfield, 2020).

A heterogeneidade da madeira é uma característica marcante, ocorrendo ao longo de diferentes níveis: entre espécies, indivíduos, idades, ambientes de crescimento, bem como dentro do mesmo indivíduo, ao longo do raio do fuste, entre a região da medula e a casca, e da base ao ápice do fuste (Silva, 2019). Essa variação anatômica está relacionada à plasticidade do desenvolvimento do tecido lenhoso frente a estímulos ambientais, como disponibilidade hídrica e nutrientes, afetando diretamente o padrão de diferenciação celular (Rodriguez-Zaccaro; Groover, 2019).

### 3.1.2 Composição Química

A madeira é um material natural de estrutura complexa, constituído por uma matriz lignocelulósica formada principalmente por três biopolímeros estruturais: celulose, hemicelulose e lignina, presente na parede celular (Carvalho, Walter *et al.*, 2009; Zhang, Xun; Li; Xu, 2022) (Figura 1).

Figura 1. Composição estrutural da parede celular



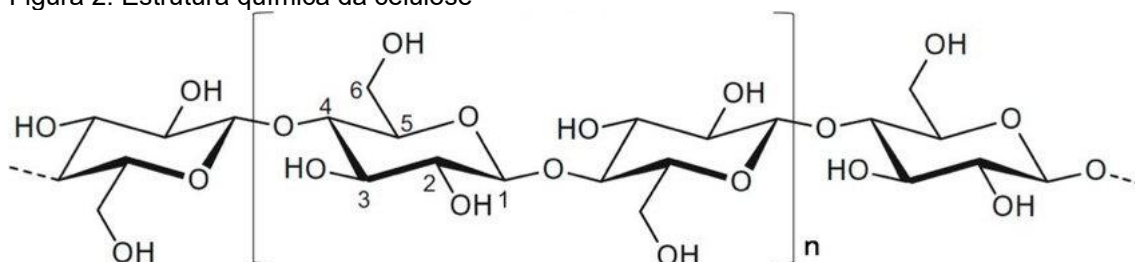
Fonte: Adaptado de Wakerley *et al.* (2017).

A parede celular da madeira é composta majoritariamente por celulose, representando cerca de 50% de sua estrutura. Hemiceluloses correspondem a

aproximadamente 25%, enquanto a lignina varia entre 20% e 25%. Já os extrativos estão presentes em menores proporções, entre 1% e 5%, dependendo da espécie (Cabral *et al.*, 2022).

A celulose é o principal componente da parede celular e consiste em um homopolissacarídeo linear de alta massa molar, com fórmula empírica  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , formado por unidades de  $\beta$ -D-glicose conectadas por ligações glicosídicas  $\beta$ -(1→4) (Carvalho, Walter *et al.*, 2009; Yoon; Han; Shin, 2014; Zhang, Xun; Li; Xu, 2022) (Figura 2). Sua configuração molecular facilita a criação de ligações de hidrogênio tanto dentro das cadeias quanto entre diferentes cadeias (especialmente entre os grupos hidroxila do C2 e C6 e o oxigênio do C5), resultando em regiões cristalinas que conferem elevada resistência à tração e baixa reatividade química e térmica (Quan; Gao; Song, 2016; Zhang, Xun; Li; Xu, 2022). Ainda assim, regiões amorfas estão presentes, sendo mais suscetíveis à degradação (Silva, 2019).

Figura 2. Estrutura química da celulose



Fonte: Zamora (2017).

As hemiceluloses são polissacarídeos heterogêneos de menor massa molar, compostos por unidades de hexoses (glicose, manose, galactose), pentoses (xilose, arabinose), ácidos urônicos e grupos acetila (Carvalho *et al.*, 2009; Zhang, Xun; Li; Xu, 2022). Sua estrutura é predominantemente amorfa e ramificada, formada por esqueletos como xiloglucanos, xilanos, mananos, glucomananos e  $\beta$ -(1→3)/(1→4)-glucanos, ligados principalmente por ligações  $\beta$ -(1→4) (Silva, 2019; Zhang, Xun; Li; Xu, 2022). Em folhosas, predominam as 4-O-metilglucuronoxilanas, enquanto em coníferas são mais comuns as galactoglucomananas parcialmente acetiladas (Carvalho *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2018; Yoon; Han; Shin, 2014). A reduzida cristalinidade dessas estruturas aumenta sua suscetibilidade à decomposição provocada por agentes térmicos, químicos ou enzimáticos (Stefanidis *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2007).

Tanto a celulose quanto as hemiceluloses são polímeros hidrofílicos,

interagindo intensamente com a água através das hidroxilas livres presentes em suas estruturas, o que explica o comportamento higroscópico da madeira (Bigan; Mutel, 2018). Essa interação favorece o inchamento e a contração volumétrica do material em resposta à umidade (Bigan; Mutel, 2018).

A lignina é um polímero fenilpropanóide amorfo, tridimensional e altamente ramificado, composto por unidades derivadas dos álcoois p-cumarílico, coniferílico e sinapílico, formando os monômeros p-hidroxifenil (H), guaiacil (G) e siringil (S), conectados por ligações éter (C–O–C) e carbono-carbono (C–C) (Carvalho *et al.*, 2009; Chio; Sain; Qin, 2019; Zhang, Xun; Li; Xu, 2022). Nas coníferas, predomina a lignina tipo guaiacil, mais resistente termicamente; já em folhosas, é comum a lignina tipo GS (guaiacil-siringil), de estrutura mais aberta e menos entrecruzada (Carvalho *et al.*, 2009; Chio; Sain; Qin, 2019). De modo geral, espécies de coníferas apresentam maiores teores de lignina do que folhosas, com valores médios variando entre 25 e 35% e 18 a 25%, respectivamente (Carvalho *et al.*, 2009). A lignina é o componente mais hidrofóbico da madeira, atuando como agente cimentante entre as células e contribuindo para a rigidez e resistência a agentes biológicos (Tribot *et al.*, 2019; Yoon; Han; Shin, 2014).

Além dos constituintes estruturais, a madeira contém uma fração de extrativos, compostos orgânicos de baixa massa molar como resinas, fenóis, ácidos graxos, álcoois, terpenos, esteroides e ceras, que influenciam características como cor, odor, resistência a microrganismos, inflamabilidade e higroscopicidade (Dammström; Salmén; Gatenholm, 2009; Zhang, Xun; Li; Xu, 2022). Esses compostos são solúveis em solventes como água, etanol ou acetona, e sua concentração pode variar de 5 a 30% dependendo da espécie (Dammström; Salmén; Gatenholm, 2009).

Já os componentes inorgânico da madeira, representa de 0,2% a 1%, nas cinzas, sendo constituída por sais como carbonatos, oxalatos, sulfatos e silicatos, além de elementos como cálcio, magnésio, potássio e manganês (Mori *et al.*, 2003; Molder *et al.*, 2021). A distribuição desses minerais varia conforme a espécie, o ambiente e entre diferentes partes da árvore, como lenho inicial e tardio, casca e xilema (te Molder *et al.*, 2021).

De forma geral, a celulose apresenta maior estabilidade térmica e química, sendo insolúvel em álcalis e resistente à hidrólise ácida em condições brandas (Yoon; Han; Shin, 2014; Song *et al.*, 2018). Em contraste, as hemiceluloses são mais

facilmente degradáveis por modificações térmicas ou químicas (Santos *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2018). A lignina, por sua vez, apresenta propriedades termoplásticas e elevada estabilidade, sendo extraída com maior eficiência em modificações hidrotérmicas com solventes orgânicos bipolares (Song *et al.*, 2018; Chio; Sain; Qin, 2019).

### **3.1.3 Propriedades da Madeira**

A qualidade da madeira costuma ser avaliada com base em suas características físicas e mecânicas, as quais influenciam diretamente sua aplicação para as mais diversas finalidades (Arriaga *et al.*, 2023; Fedorkov, 2023). Por outro lado, aspectos estéticos como a tonalidade e o padrão natural da madeira desempenham um papel relevante, pois influenciam sua aplicação em diferentes contextos e contribuem diretamente para a definição de seu valor no mercado (Garcia; Marinonio, 2016).

A densidade da madeira é uma propriedade física que é frequentemente considerada um dos melhores indicadores de sua qualidade, sendo que madeiras de maior densidade são preferidas tanto em aplicações construtivas quanto no processamento mecânico, por oferecerem maior resistência e durabilidade, além de proporcionarem melhores rendimentos em processos como a produção de celulose (Fedorkov, 2023). A densidade também impacta diretamente a estabilidade dimensional da madeira, diminuindo a tendência de deformações, como o empenamento (Fedorkov, 2023).

De acordo com o Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro (2025), a densidade básica da madeira é classificada em três categorias: baixa ou leve, para valores inferiores a 0,50 g/cm<sup>3</sup>; média, entre 0,50 e 0,72 g/cm<sup>3</sup>; e pesada, para densidades superiores a 0,72 g/cm<sup>3</sup>. Essa classificação tem grande importância para a compreensão das propriedades da madeira e a definição de sua aplicação em diversos setores, como construção civil, indústria moveleira e geração de energia.

O aumento da densidade pode ser alcançado através de modificações térmicas, como a termodensificação, que compacta as células da madeira, resultando em um material mais resistente (Silva, 2019). Além disso, o teor de umidade influencia diretamente a densidade da madeira, pois a água absorvida altera continuamente sua

massa, tanto acima quanto abaixo do ponto de saturação das fibras (PSP), e, em determinadas condições, também seu volume, que varia apenas abaixo do PSP em função da contração higroscópica, por isso, é comum adotar correções específicas para diferentes espécies (Arriaga *et al.*, 2023).

A coloração é uma propriedade organoléptica que, aliada às características anatômicas da madeira, contribui significativamente para a identificação de espécies, além de exercer um importante papel no aspecto decorativo do material, agregando valor estético (Marini *et al.*, 2020). Trata-se de uma das propriedades mais perceptíveis da madeira, sendo comumente a primeira característica observada em análises visuais (Almeida, 2017).

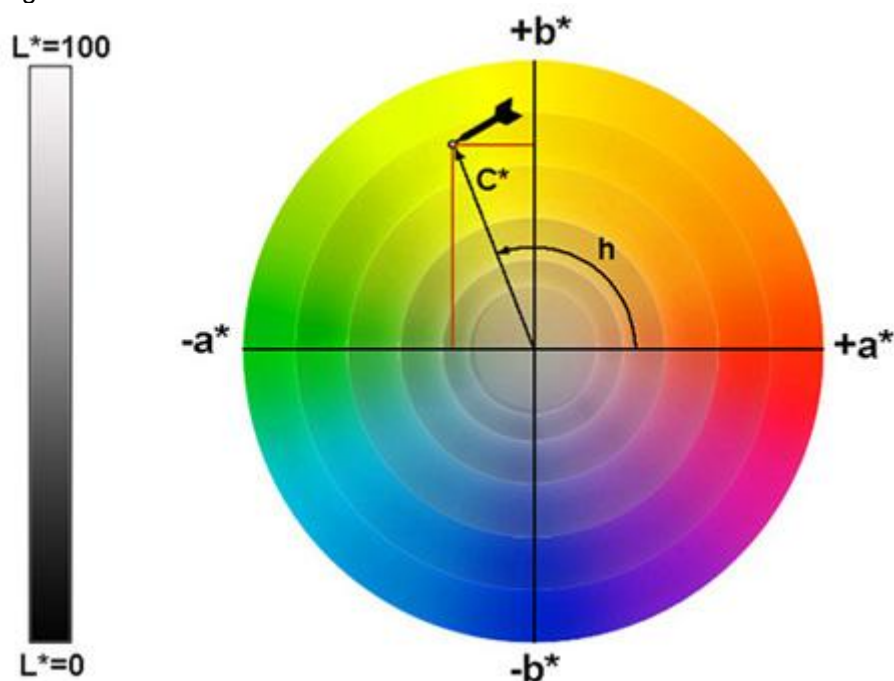
A cor pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a espécie, a estrutura anatômica, a composição química, a genética, a densidade e os tratamentos silviculturais (Marini *et al.*, 2020). Além de seu valor estético, a coloração e sua uniformidade impactam diretamente o valor comercial da madeira, influenciando tanto o preço quanto a aceitação do produto no mercado (Garcia; Marinonio, 2016). Por esse motivo, a cor da madeira é vista como um critério relevante de qualidade e classificação, devendo ser incorporada aos processos de caracterização tecnológica, sobretudo quando a madeira é destinada a usos de maior valor agregado (Garcia; Marinonio, 2016; Almeida, 2017).

É fundamental destacar a natureza subjetiva da cor, pois a percepção de cor pode variar entre os observadores devido a diferenças em sua sensibilidade (Zenid; Ceccantini, 2007). As madeiras geralmente apresentam uma gama de cores, como tons esbranquiçados, amarelados, avermelhados, acastanhados, pardos, enegrecidos e arroxeados (Almeida, 2017; Marini *et al.*, 2020; Zenid; Ceccantini, 2007). Em algumas situações, também podem ser observadas madeiras de outras cores, como o verde, encontrado em espécies como o palo-santo (*Bulnesia sarmientoi*), ou aquelas com variações cromáticas em padrões rajados, como o angelim-rajado (*Marmaroxylon racemosum*) (Zenid; Ceccantini, 2007).

Para padronizar a avaliação da cor da madeira, essa propriedade foi convertida em valores numéricos por meio do sistema CIE Lab\*, desenvolvido pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE). Esse modelo é baseado em três eixos principais: L\*, que representa a luminosidade e varia de 0% (preto) a 100% (branco); a\*, que vai do verde (-a) ao vermelho (+a); e b\*, que vai do azul (-b) ao amarelo (+b) (González-

Peña; Hale, 2009; Todorović *et al.*, 2012; Almeida, 2017; Marini *et al.*, 2020; Carvalho *et al.*, 2021) (Figura 3). Considerando configurações colorimétricas, brilho e saturação, o sistema permite uma representação precisa e uniforme das cores, sendo amplamente empregado na quantificação da cor da madeira e em outras indústrias que exigem controle rigoroso da aparência visual (Almeida, 2017; Marini *et al.*, 2020).

Figura 3. Sistema de coordenadas de cores CIE L\*a\*b\*



Fonte: Quantotec. Disponível em: <http://www.quantotec.com/sp/Colorimetria.htm>

Segundo Almeida (2017) e Garcia; Marinonio (2016), diversos fatores podem influenciar a cor da madeira, como o ataque de organismos xilófagos, incluindo fungos responsáveis por podridões, o uso de preservativos químicos, modificações térmicas e mecânicas, a exposição a condições climáticas, além da composição química da madeira (especialmente o teor de extrativos) e suas características anatômicas, como a distinção entre cerne e albarno ou as diferentes seções de corte.

A rigidez é uma importante propriedade mecânica que expressa sua resistência à deformação quando submetido a tensões (Pereira; Trindade, 2023). Essa característica pode ser quantificada por meio do módulo de elasticidade (MOE), um parâmetro que descreve o comportamento do material dentro do regime linear da curva tensão-deformação (Cai; Senalik; Ross, 2021).

O MOE pode ser determinado a partir de diferentes modos de solicitação mecânica, como flexão estática, tração uniaxial e compressão paralela às fibras (Cai;

Senalik; Ross, 2021). Quando avaliado em situações de tração ou compressão, o MOE é usualmente referido como módulo de Young, uma medida da resistência à deformação elástica no sentido longitudinal (Arriaga et al., 2023).

A quantificação desse parâmetro fornece subsídios essenciais para o dimensionamento de componentes estruturais, submetidos a cargas permanentes ou cíclicas, além de permitir inferências sobre a homogeneidade e qualidade da madeira empregada (Cai; Senalik; Ross, 2021).

A resistência é uma propriedade mecânica da madeira, definida como a capacidade do material de suportar tensões até o ponto de ruptura ou até que ocorra uma deformação excessiva (Cai; Senalik; Ross, 2021; Pereira; Trindade, 2023). Essa característica é tanto para a classificação estrutural quanto para o controle de qualidade, sendo um dos principais critérios utilizados na avaliação do desempenho mecânico da madeira (Cai; Senalik; Ross, 2021). Ela é comumente avaliada pelo módulo de ruptura (MOR), que é obtido por ensaios de flexão, indica a tensão máxima antes da falha (Cai; Senalik; Ross, 2021).

Tanto MOE quanto a MOR são influenciadas por fatores como umidade e temperatura. Segundo Arriaga *et al.* (2023), a resistência à flexão da madeira é significativamente influenciada pelo teor de umidade, especialmente quando abaixo do ponto de saturação das fibras. Os autores observaram que a redução do teor de umidade aumenta o módulo de ruptura (MOR), com variações de aproximadamente 4% para cada ponto percentual de redução, tendo como base o teor de 12%. Contudo, os mesmos autores alertam que, em condições extremamente secas (abaixo de 5% ou até 2%, dependendo da espécie), a madeira pode se tornar mais frágil e propensa à ruptura precoce.

O módulo de elasticidade (MOE) também apresenta sensível variação em função do teor de umidade, conforme apontado por Arriaga *et al.* (2023). Nesse mesmo intervalo abaixo do ponto de saturação das fibras, o aumento da umidade provoca uma redução linear do MOE, com perdas de cerca de 1,5% para cada ponto percentual de aumento, em relação à condição de 12% de umidade. Essa redução ocorre, segundo os mesmos autores, porque a água ligada às paredes celulares interfere na rigidez do material, amortecendo seu comportamento elástico.

De acordo com Fedorkov (2023) modificações térmicas vêm sendo empregadas para mitigar defeitos como empenamento, encurvamento, curvatura e

torção, que podem surgir após o corte da madeira e comprometer sua adequação ao uso final, promovendo maior estabilidade dimensional e reduzindo sua suscetibilidade a alterações geométricas indesejadas.

Contudo, essas alterações podem comprometer certas propriedades mecânicas da madeira, sobretudo quando aplicadas em condições mais severas. Segundo Xie *et al.* (2013), as modificações térmicas levam a uma redução na maioria das propriedades de resistência da madeira, sendo essa redução dominada pela temperatura e pelo tempo de modificação (Xie *et al.*, 2013). A redução no módulo de elasticidade (MOE) é geralmente menor que no módulo de ruptura (MOR), porém ambas podem apresentar perdas expressivas (Xie *et al.*, 2013). O MOR, tanto na resistência à flexão quanto ao impacto, pode diminuir em até 50%, e as perdas podem ser ainda maiores à medida que a temperatura ou o tempo de modificação aumentam (Xie *et al.*, 2013).

Além disso, as modificações térmicas causam maior redução no MOR em madeiras de folhosas do que em coníferas, devido ao maior teor de hemiceluloses nas folhosas, que são mais suscetíveis à degradação térmica, especialmente a xilana, que se degrada mais facilmente pelo calor do que os mananos presentes nas coníferas (Xie *et al.*, 2013).

Oltean; Teischinger; Hansmann, (2007) observaram que, à medida que o teor de umidade da madeira aumenta, ocorre uma redução proporcional no MOE e no MOR, variando de 1,3% a 3,3% para o MOE e de 2,1% a 7,1% para o MOR, dependendo da temperatura da madeira. Além disso, a temperatura exerce um efeito adicional, com um aumento de 1 °C podendo reduzir o MOE em até 0,59% e o MOR em até 0,59%, variando conforme a direção anatômica e o teor de umidade (Oltean; Teischinger; Hansmann, 2007). Esses resultados obtidos evidenciam as interações entre umidade e temperatura sobre o comportamento mecânico da madeira, particularmente nos processos de modificação térmica, e ressaltam a importância de um controle rigoroso dessas variáveis para manter a integridade estrutural do material.

Já a dureza, outra importante propriedade mecânica, indica a capacidade da madeira de resistir a indentações (Millaniyage *et al.*, 2022) e à penetração (Cai; Senalik; Ross, 2021). Entre os ensaios mais utilizados para avaliação da dureza estática da madeira, destacam-se os métodos Janka e Brinell, embora seus resultados não possam ser comparados diretamente devido às diferenças nos procedimentos

adotados (Millaniyage *et al.*, 2022). O método Janka, conforme especificado na norma ASTM D143 (ASTM, 1994), é amplamente aplicado nos Estados Unidos e Austrália, enquanto o método Brinell, normatizado pela EN 1534, é predominante na Europa (Millaniyage *et al.*, 2022).

### 3.2 DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA

As pesquisas sobre densificação da madeira tiveram início no final dos anos 1940, em meio ao contexto da Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de aprimorar sua resistência e longevidade por meio da aplicação de resinas e posterior compressão mecânica (Williams, 2010; Macedo *et al.*, 2015). No entanto, segundo Cabral *et al.* (2022), registros de madeira comprimida já existiam desde o início do século XX, com patentes registradas nos Estados Unidos. Os autores destacam que naquela época, os estudos estavam mais voltados para a aplicação de técnicas básicas de compressão e especificações de madeira. Já nas últimas décadas, o foco da pesquisa voltou-se para a estabilização dimensional da madeira densificada, com ênfase no controle de parâmetros como taxa de compactação, temperatura, tempo de prensagem e umidade (Cabral *et al.*, 2022).

A densificação da madeira é um processo que promove alterações em sua microestrutura, melhorando significativamente suas propriedades físicas e mecânicas (Stragliotto *et al.*, 2024). Essas modificações envolve a compressão da madeira com o auxílio de calor, podendo ou não ser combinado com impregnação de agentes químicos (Cabral *et al.*, 2022). O objetivo desta técnica é reduzir os espaços vazios internos, resultando em maior densidade e em mudanças importantes na dureza, estabilidade dimensional, resistência à abrasão e à flexão, quando comparada à madeira original (Kadivar *et al.*, 2020).

Segundo Arruda; Del Menezzi (2013), a aplicação de calor durante o processo de densificação da madeira promove alterações substanciais em suas propriedades mecânicas, relacionadas, sobretudo, à redução da massa do material. Essa redução, de acordo com os autores, decorre da expansão volumétrica induzida termicamente, a qual pode ocasionar diminuição da densidade aparente. Embora a massa não seja, em sentido estrito, uma propriedade mecânica, Arruda; Del Menezzi (2013) destacam que sua variação influencia diretamente o desempenho mecânico da madeira, especialmente no que se refere à rigidez e à resistência. Os autores ainda ressaltam

que tais alterações tendem a ser reversíveis enquanto a temperatura se mantiver abaixo de 100 °C; entretanto, ao se exceder esse limite, os efeitos tornam-se irreversíveis, promovendo modificações permanentes na estrutura e no comportamento mecânico do material lignocelulósico.

Esse processo se baseia no comportamento viscoelástico da madeira, o que permite que espécies com baixa densidade natural sejam modificadas para alcançar características similares às de espécies mais densas e nobres (Kutnar; Sernek, 2007). Segundo esses mesmos autores, a combinação de compressão mecânica e calor é eficiente nesse processo, uma vez que o calor atua diretamente sobre os polímeros viscoelásticos da parede celular (principalmente lignina e hemiceluloses) facilitando sua deformação sem provocar fraturas estruturais. Além disso, as modificações termomecânicas promovem aumento da densidade, redução do teor de umidade e do inchamento em espessura, bem como melhoria das propriedades mecânicas da madeira (Kutnar; Sernek, 2007).

A técnica pode ser aplicada utilizando prensas aquecidas, com controle da umidade e das condições de prensagem, sendo que as temperaturas geralmente variam entre 140°C e 240°C (Kadivar *et al.*, 2020). A depender da forma de condução do calor, essas modificações são classificadas como termomecânicas, termohidromecânicas (quando o calor é transmitido por meio aquoso) ou termohigromecânicas (quando conduzido por vapor) (Kutnar; Sernek, 2007). Entre os fatores que mais influenciam os resultados da densificação estão a temperatura de operação, a espécie utilizada, a taxa de compactação, a orientação dos anéis de crescimento e as modificações pós-prensagem (Namari *et al.*, 2021).

Durante o processo, a compressão pode exceder o limite elástico da madeira, provocando colapso celular e reorganização estrutural (Kadivar *et al.*, 2020). Isso permite que madeiras de menor valor comercial sejam adaptadas para aplicações mais exigentes, inclusive substituindo materiais tradicionalmente mais densos (Sadatnezhad *et al.*, 2017). Um dos atrativos da densificação termomecânica é que ela não requer aditivos químicos, o que a torna uma alternativa ambientalmente interessante (Stragliotto *et al.*, 2024).

Quanto a dureza madeira, esta tende a aumentar proporcionalmente ao ganho de densidade superficial obtido durante a densificação (Laine; Rautkari; Hughes, 2013). Em alguns casos, a densificação pode ser restrita apenas à superfície da

madeira, como estratégia para preservar a leveza do material ao mesmo tempo em que se melhora sua resistência ao desgaste superficial (Rautkari *et al.*, 2010b). Essa abordagem seletiva pode, inclusive, resultar em menor consumo energético e reduzir a necessidade de revestimentos adicionais (Laine; Rautkari; Hughes, 2013).

O processo de densificação demanda temperaturas superiores ao ponto de transição vítrea dos principais constituintes da parede celular, possibilitando sua conformação sem ocorrência de fissuras (Laine *et al.*, 2013). Neste contexto, Costa (2015) destaca em conduzir o processo de modo a preservar a integridade da parede celular, evitando fraturas que poderiam comprometer suas propriedades físicas. Por isso, é comum a utilização de calor em ambiente úmido, promovendo o amolecimento dos polímeros viscoelásticos da madeira e reduzindo o risco de falhas estruturais (Costa, 2015).

Diferentes técnicas têm sido empregadas para otimizar esse processo. O método *Staypak*, por exemplo, descrito por Skyba (2008), consiste em submeter amostras úmidas de madeira a uma prensa hidráulica aquecida a até 140 °C, sob pressão constante por cerca de duas horas, sem controle da umidade do sistema. De acordo com o mesmo autor, embora essa modificação proporcione melhorias nas propriedades físicas e mecânicas, observou-se instabilidade dimensional, com tendência de retorno parcial ou total da madeira ao seu formato original sob influência da umidade.

Por outro lado, o processo de compressão térmica viscoelástica (VTC - *Viscoelastic Thermal Compression*), descrito por Kamke (2006), utiliza calor, vapor e pressão mecânica para promover a densificação, sendo eficiente em diversas espécies. A principal vantagem dessa técnica, segundo o mesmo autor, é possibilitar a compressão desejada sem comprometer a estrutura celular, mantendo a integridade das paredes mesmo com redução de volume.

Morsing (2000) sistematizou os passos fundamentais da densificação: i) amolecimento da parede celular; ii) compressão enquanto a madeira está plastificada; iii) estabilização por resfriamento e secagem; e iv) fixação da nova forma. Contudo, uma das limitações persistentes é o fenômeno de *springback*, que consiste na recuperação parcial da espessura original após a liberação das tensões internas, especialmente em ambientes úmidos (Rautkari *et al.*, 2010b; Sadatnezhad *et al.*, 2017). Essa recuperação está relacionada à energia elástica armazenada durante a

compressão, particularmente nas microfibrilas de hemiceluloses semicristalinas (Arruda; Del Menezzi, 2013).

Arruda; Del Menezzi (2013) observaram que a recuperação da espessura pode ocorrer de forma reversível ou irreversível, dependendo se o inchamento é causado pela absorção de umidade ou pelas tensões internas. A parcela irreversível é denominada de "taxa de não retorno", sendo um indicador importante da estabilidade dimensional do produto final.

Nesse sentido, diversos estudos propuseram pós-modificações para minimizar o *springback*. Mohebbi; Gorbani-Kokandeh; Soltani (2009) sugerem abordagens para liberação gradual das tensões internas sem comprometer a estabilidade. Inoue *et al.* (1993) reforçam que a vaporização durante a compressão é determinante para garantir a fixação permanente da nova forma, promovendo a acomodação das microfibrilas dentro da matriz amolecida.

A ação combinada de temperatura e pressão de vapor, portanto, exerce importante papel nesse processo. Kamke; Sizemore (2008) destacam que o vapor contribui para a hidrólise de constituintes da madeira e intensifica a taxa de relaxamento da energia elástica armazenada, favorecendo a obtenção de materiais com maior estabilidade dimensional após o processo de densificação.

Estudos como o de Pelit; Yorulmaz (2019) indicaram que tanto a temperatura quanto o tempo de realização das pré-modificações térmicas exercem influência marcante nas características físicas e mecânicas da madeira após o processo de densificação. Em termos gerais, temperaturas mais amenas favoreceram o aumento do módulo de elasticidade, ao passo que o uso de temperaturas mais altas e durações prolongadas resultou em perda de integridade estrutural e queda na resistência mecânica (Pelit, Hüseyin; Yorulmaz, 2019).

Srivaro *et al.* (2021) observaram que madeiras de menor densidade inicial, como a do coqueiro, apresentaram melhor comportamento à densificação em diferentes níveis de compactação, resultando em melhorias nas propriedades mecânicas. Por outro lado, os autores verificaram que a estabilidade dimensional foi negativamente impactada conforme aumentava o grau de compressão.

Em *Pinus sylvestris* L., ensaios conduzidos por Unsal; Candan (2008) que o aumento da temperatura e da pressão aplicadas durante o processo de prensagem contribuiu para elevar tanto a densidade quanto a resistência à penetração (dureza

Janka) da madeira. Já Pelit, Sönmez e Budakçi (2015) que o aumento na taxa de compactação levou a densidades mais altas, entretanto, temperaturas elevadas durante a etapa de pós-modificação térmica causaram redução nas propriedades mecânicas da madeira.

Pertuzzatti *et al.* (2018), ao tratarem *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, apontaram que exposições mais longas e temperaturas acima de 150 °C não necessariamente trazem melhores resultados, podendo inclusive comprometer a integridade química da madeira. No entanto, os autores observaram também que madeiras densificadas apresentaram aumento da hidrofobicidade, o que favorece seu uso em aplicações como pisos e decks.

Kariz *et al.* (2017) evidenciaram que a aplicação de modificação térmica prévia à densificação reduz o *springback* e o *set recovery*, melhorando a estabilidade dimensional da madeira ao longo do tempo. Além disso, os autores confirmaram que a densificação superficial promove aumento significativo na resistência à flexão e na dureza, especialmente nos primeiros milímetros abaixo da superfície, o que é importante e fundamental em aplicações que exigem resistência ao desgaste superficial.

Dessa forma, a densificação termomecânica configura-se como uma estratégia polivalente e ecologicamente para o aproveitamento de espécies menos valorizadas, ampliando suas aplicações e promovendo o uso eficiente de recursos florestais.

### 3.3 MODIFICAÇÕES TÉRMICAS EM MADEIRA

As modificações térmicas da madeira, também denominados retificação térmica ou modificação térmica (Batista, 2019), consistem na aplicação controlada de calor com o objetivo de alterar sua estrutura anatômica e composição química (Stragliotto *et al.*, 2024). Tais modificações provocam a degradação parcial das hemiceluloses, a quebra de grupos hidroxila livres presentes na celulose amorfa e a formação de ligações cruzadas entre os polímeros da parede celular, o que contribui para tornar o material mais hidrofóbico, diminuir sua umidade de equilíbrio e aumenta sua durabilidade natural (Stragliotto *et al.*, 2024). Conseqüentemente, verifica-se um aprimoramento em características como estabilidade nas dimensões, menor absorção de umidade e maior resistência a agentes biológicos (Stragliotto *et al.*, 2024).

Esses processos vêm sendo amplamente estudados, sobretudo pela sua

eficácia em reduzir a afinidade da madeira por água e minimizar variações volumétricas (Cademartori *et al.*, 2012; Lobato *et al.*, 2020). Com o avanço tecnológico e a crescente demanda por produtos de alto desempenho, a modificação térmica da madeira tem se consolidado como uma alternativa sustentável (Stragliotto *et al.*, 2024). Diversos estudos destacam os benefícios da modificação térmica, como o aumento da estabilidade dimensional, a redução da umidade de equilíbrio, maior resistência a organismos xilófagos e melhorias estéticas, como o escurecimento e a uniformização da coloração entre cerne e alburno (Sandoval-Torres *et al.*, 2010; Fang *et al.*, 2012a; Garcia *et al.*, 2014; Lopes *et al.*, 2014; Juizo *et al.*, 2018; Melo *et al.*, 2019; Schulz *et al.*, 2020). Além desses aspectos, trata-se de um processo ecologicamente sustentável, pois dispensa o uso de aditivos químicos (Korkut *et al.*, 2008).

De modo geral, as modificações térmicas podem ser classificadas em dois grandes grupos: modificações em meio seco e modificações em meio úmido. Os primeiros, mais tradicionais, ocorrem em atmosferas inertes ou com baixo teor de oxigênio, sendo caracterizados pela pirólise controlada da madeira, que leva à degradação parcial de seus componentes estruturais (Bach; Skreiberg, 2016). Já as modificações térmicas em meio úmido, também denominados hidrotérmicos, são realizados em água quente ou vapor saturado sob pressão, promovendo reações de autohidrólise, sobretudo das hemiceluloses, em virtude da acidificação natural do meio aquoso com o aumento da temperatura (Bach; Skreiberg, 2016).

O aquecimento pode ocorrer em diferentes atmosferas – como vapor d’água, nitrogênio, óleo vegetal ou metais derretidos – em faixas de temperatura entre 150 °C e 260 °C (Esteves; Pereira, 2009; Grinins *et al.*, 2016), caracterizando distintos processos industriais, tais como: o Processo Retification® e o Le Bois Perdure Perdure® (França); o tratamento com óleo quente – OHT (Alemanha); o Processo Plato® Wood («Proving Lasting Advanced Timber Option», Países Baixos); os processos Thermowood® (Finlândia) e Thermoholz® (Áustria); e o VAP HolzSysteme® (Brasil). Nessas condições, as temperaturas aplicadas promovem reações controladas de degradação térmica, levando à reestruturação dos principais polímeros da parede celular (Esteves; Pereira, 2009).

As transformações químicas envolvidas no tratamento térmico incluem a oxidação e decomposição de extrativos, degradação seletiva das hemiceluloses e

aumento relativo da lignina, estando essas alterações associadas à transição vítrea dos polímeros da parede celular (Delucis *et al.*, 2014; Figueroa; Moraes, 2021). A sequência de degradação térmica segue uma ordem dependente da temperatura: extrativos (a partir de 100 °C), hemiceluloses (150–220 °C), lignina (acima de 205 °C) e celulose (acima de 220 °C) (Kačíková *et al.*, 2013; Figueroa; Moraes, 2021). Temperaturas de até 220 °C são geralmente suficientes para promover alterações químicas que aumentam a hidrofobicidade e reduzem a higroscopicidade da madeira (Cademartori *et al.*, 2012). No entanto, as maiores perdas de massa e deterioração estrutural ocorrem entre 150 °C e 250 °C (Kačíková *et al.*, 2013).

Essas alterações nas propriedades da madeira têm sido confirmadas por diversos estudos empíricos. Mangini *et al.* (2021) verificaram que temperaturas de 150 e 180 °C promovem significativa degradação anatômica na madeira de *Handroanthus cryshotchus*. Martha *et al.* (2021) observaram perda de massa e melhora da estabilidade dimensional em teca de curta rotação, atribuídas à degradação das hemiceluloses e aumento relativo da lignina. Da mesma forma, Gašparík *et al.* (2019) relataram redução de até 67,7% no teor de hemiceluloses em teca tratada a 210 °C, com impacto direto na coloração e nas coordenadas CIE L\*a\*b\*.

Por outro lado, a aplicação de tratamento térmico pode afetar negativamente o desempenho mecânico da madeira, sobretudo quando exposta a temperaturas elevadas por períodos prolongados (Esteves; Pereira, 2009; Kačíková *et al.*, 2020). Ferreira *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2021) relataram reduções na densidade e resistência mecânica da madeira em função desses parâmetros. Eloy *et al.* (2023) sugerem a adoção de modificações mais brandas (até 180 °C por 2 horas) para evitar perdas estruturais excessivas. Além disso, efeitos colaterais como rachaduras, empenamentos e alterações na colagem com adesivos à base d'água também foram observados, devido à modificação da molhabilidade superficial (Ferreira; Campos; Rangel 2018; Welzbacher *et al.*, 2008).

Esses efeitos demonstram que a modificação térmica apresenta elevado potencial para aplicações que exigem estabilidade dimensional, durabilidade e valor estético. No entanto, considerar cuidadosamente os impactos negativos sobre as propriedades mecânicas, sobretudo em usos estruturais. A combinação com outros processos, como a densificação, tem sido proposta como alternativa para compensar eventuais perdas mecânicas (Lengowski *et al.*, 2021).

### 3.4 TERMODENSIFICAÇÃO EM MADEIRA

O procedimento de densificação termomecânica da madeira pode ser dividido em quatro etapas principais: (1) amolecimento da parede celular; (2) compressão da madeira amolecida; (3) estabilização do novo formato por resfriamento e secagem; e (4) fixação estrutural da nova conformação (Morsing, 2000).

Conforme a literatura, a termodensificação é uma técnica de modificação que utiliza a aplicação simultânea de calor e pressão, sendo particularmente eficiente na melhoria das propriedades mecânicas da madeira (Mesquita do Vale, 2020). Essa combinação promove a compactação das fibras e o consequente aumento da densidade do material (Sandberg; Haller; Navi, 2012). Além das melhorias funcionais, a termodensificação é considerada uma técnica ambientalmente amigável, pois busca aumentar o valor agregado da madeira sem comprometer sua reciclabilidade ou propriedades ecológicas (Sandberg; Haller; Navi, 2012).

Os processos de modificação térmica da madeira podem ser classificados como termo-hidro (TH), quando envolvem apenas calor e umidade, e termo-hidro-mecânicos (THM), quando incorporam também a ação de forças mecânicas (Sandberg; Haller; Navi, 2012; Sato *et al.*, 2020). A termodensificação se insere nessa segunda categoria, sendo uma técnica que visa alterar as propriedades físicas e químicas da madeira por meio da combinação sinérgica desses três fatores (Sandberg; Haller; Navi, 2012).

Além da compactação estrutural, o tratamento termohigromecânico também provoca alterações químicas na madeira, por meio da decomposição parcial das hemiceluloses e o aumento relativo dos teores de celulose e lignina, o que influencia diretamente no desempenho final do material (Fu *et al.*, 2019).

O aquecimento em altas temperaturas resulta na remoção de substâncias voláteis, como água e compostos orgânicos, favorecendo a redução da umidade e a compactação da madeira (Sandberg; Haller; Navi, 2012). Durante esse processo, ocorrem simultaneamente reações endotérmicas e exotérmicas, promovendo um rearranjo estrutural com formação de novas ligações entre as moléculas de celulose, hemicelulose e lignina, o que contribui para o aumento da densidade (Sandberg; Haller; Navi, 2012). A liberação de ácido acético pela degradação térmica das hemiceluloses pode catalisar reações subsequentes, incluindo a despolimerização de

carboidratos e a formação de compostos como furfural e HMF, alterando significativamente a química superficial da madeira (Fu *et al.*, 2019).

A termodensificação também promove uma significativa redução da rugosidade superficial da madeira. Esse efeito decorre do rearranjo estrutural das fibras sob condições controladas de temperatura e pressão, resultando em superfícies mais homogêneas e lisas (Sandberg; Haller; Navi, 2012). Diversos estudos confirmam esse benefício, como os de Santos, Del Menezzi e De Souza (2012), Bekhta, Proszyk e Krystofiak (2014), Dias Junior *et al.* (2015), Pertuzzatti *et al.* (2015), Ferreira (2017) e Mesquita do Vale (2020). Essas modificações podem ser evidenciadas por análises espectroscópicas, que demonstram a formação de grupos oxigenados e a clivagem das cadeias laterais da lignina, resultando em alterações moleculares importantes na superfície do material (Fu *et al.*, 2019).

Segundo Arruda e Del Menezzi (2013) o aquecimento controlado durante a termodensificação também provoca alterações na estrutura física e química da madeira. Conforme os autores, as reações químicas, que ocorrem durante o processo de termodensificação resultam na quebra e reorganização das ligações químicas entre os elementos constituintes da madeira, como a lignina, celulose e hemicelulose. Isso contribui para uma superfície mais uniforme, reduzindo a rugosidade (Arruda; Del Menezzi, 2013).

O tratamento termomecânico também influencia diretamente as propriedades higroscópicas da madeira. A reorganização das fibras e as modificações químicas oriundas do aquecimento reduzem a permeabilidade à água, diminuindo a capacidade de absorção de umidade e o inchamento dimensional quando exposta a variações higrométricas (Sandberg; Haller; Navi, 2012). De acordo com Ímirzi, Ülker e Burdurlu (2013), essas melhorias estão associadas principalmente à degradação das hemiceluloses. Além disso, comportamento dimensional da madeira submetida à densificação, especialmente sob tratamento com vapor, está relacionada ao controle da degradação térmica dos seus constituintes químicos (Fu *et al.*, 2019).

No entanto, a madeira densificada pode apresentar o fenômeno de "springback", caracterizado pela recuperação parcial de suas dimensões originais quando exposta à umidade, em função do estresse residual armazenado nas paredes celulares (Sandberg; Haller; Navi, 2012). Segundo os mesmos autores, para minimizar esse efeito, faz-se necessário o uso de processamento adicional, visando estabilizar

dimensionalmente o material e garantir maior durabilidade das propriedades adquiridas. Embora os benefícios relevantes proporcionados pela termodensificação, sua aplicação em grande escala ainda encontra obstáculos, como a complexidade para ampliar o processo industrialmente, a deterioração da madeira com o passar do tempo e a exigência de ajustes precisos nos parâmetros operacionais, a fim de prevenir problemas indesejados, como cheiro residual ou comprometimento da estrutura (Sandberg; Haller; Navi, 2012).

### 3.5 PRÉ-HIDRÓLISE EM MADEIRA

O pré-tratamento hidrotérmico, também referido como hidrotermólise, auto-hidrólise, solvólise não catalisada ou aquasolv, constitui uma tecnologia de processamento verde por empregar exclusivamente biomassa lignocelulósica e água como meio reacional (Saha *et al.*, 2013). Por não utilizar catalisadores ou reagentes químicos adicionais, evita problemas como a corrosão de equipamentos, a necessidade de reciclagem ácida e a formação de lodos de neutralização, sendo considerado ambientalmente mais seguro do que outras técnicas, como a explosão a vapor (Gullón *et al.*, 2012; Saha *et al.*, 2013). Além disso, apresenta menores teores de compostos inibidores à fermentação, o que favorece sua aplicação em processos biotecnológicos e de biorrefinaria (Saha *et al.*, 2013).

Em alta temperatura e pressão, o processo hidrotérmico é capaz de provocar a quebra das hemiceluloses e facilitar a eliminação de determinados extrativos presentes na madeira (Carvalho *et al.*, 2015). Contudo, se o processo não for adequadamente controlado, podem ocorrer perdas de massa e comprometimento das propriedades mecânicas, principalmente devido à degradação das hemiceluloses e à possível exposição da celulose a condições severas (Saha *et al.*, 2013; Lacerda; Zambon; Frollini, 2015).

Esse tipo de pré-tratamento vem sendo estudado no contexto da conversão bioquímica de biomassas lignocelulósicas, com aplicação em biorrefinarias para produção de biocombustíveis e outros produtos de base biológica (Lima, Izabela da Silva; Monteiro; Soares, 2024). Nesse cenário, o pré-tratamento hidrotérmico é considerado uma tecnologia que faz a sacarificação enzimática da celulose, anteriormente limitada pela recalcitrância estrutural da biomassa (Martín *et al.*, 2022).

A adição de reagentes químicos durante o processo de hidrólise tem como objetivo intensificar a degradação das hemiceluloses, permitindo a diminuição da duração ou da temperatura do processo (Lynam *et al.*, 2011; Lacerda; Zambon; Frollini, 2015). A aplicação de ácidos minerais é eficiente, porém agressiva; por isso, o uso de ácidos orgânicos, como o acético e o oxálico, tem sido considerado uma alternativa vantajosa (Lynam *et al.*, 2011; Lacerda; Zambon; Frollini, 2015). Esses compostos apresentam menor corrosividade e toxicidade, além de reduzida reatividade com a celulose, o que favorece sua aplicação em pré-hidrólises seletivas de biomassa lignocelulósica (Lynam *et al.*, 2011; Lacerda; Zambon; Frollini, 2015).

Uma estratégia adicional é a remoção parcial da lignina, com o objetivo de reduzir a rigidez da parede celular, favorecendo taxas superiores de compactação (Song *et al.*, 2018). Reagentes alcalinos como hidróxido de sódio e sulfito de sódio têm mostrado eficácia nesse processo, especialmente quando associados à densificação termomecânica, promovendo ganhos significativos nas propriedades mecânicas da madeira (Song *et al.*, 2018).

O estudo de Song *et al.* (2018) abriu precedentes para novas abordagens focadas na melhoria das características físico-mecânicas da madeira. O método de modificação e/ou remoção parcial da lignina busca maximizar os benefícios da densificação subsequente (Song *et al.*, 2018). Quando substituídos os reagentes alcalinos por solventes orgânicos (como álcoois e cetonas), associados à pré-hidrólise, obtém-se as modificações da *organosolve*, que visam solubilizar as frações lignínicas clivadas (Chio; Sain; Qin, 2019).

Entretanto, a modificação da lignina visando a melhoria das propriedades físico-mecânicas da madeira densificada ainda demanda maior compreensão técnica, especialmente no que se refere aos mecanismos de remoção e rearranjo estrutural (Khademi Bami; Mohebbi, 2011). A lignina, além de atuar como agente aglutinante natural, contribui para a impermeabilidade da madeira, influencia sua higroscopicidade e oferece proteção às cadeias celulósicas (Khademi Bami; Mohebbi, 2011).

Devido às suas características termoplásticas, a lignina desempenha um papel estrutural da madeira submetida ao processo de densificação (Song *et al.*, 2018; Chio; Sain; Qin, 2019). No entanto, estabilidade dimensional ainda representa um obstáculo à aplicação industrial desse material (Song *et al.*, 2018; Chio; Sain; Qin, 2019). É esperado que madeiras de maior densidade apresentem maiores variações

dimensionais, como apontam diversos estudos (Welzbacher *et al.*, 2008; Gong; Lamason; Li, 2010; Khademi Bami; Mohebbi, 2011; Pelit; Sönmez; Budakçi, 2015; Laine *et al.*, 2016; Bekhta *et al.*, 2017).

Segundo Silva (2019) outro aspecto relevante relacionado à aplicação da densificação termomecânica diz respeito às dificuldades operacionais durante processos de usinagem e fixação. As modificações estruturais induzidas tanto pela pré-hidrólise quanto pela compressão da madeira podem comprometer a trabalhabilidade do material, exigindo adaptações em ferramentas e métodos de processamento (Silva, 2019).

Além disso, de acordo com Albino; Mori; Mendes (2012) em aplicações como painéis multilaminados, a redução da porosidade provocada pela densificação pode prejudicar o desempenho das colagens. Isso ocorre porque a eficiência da união adesiva depende diretamente da penetração e ancoragem do adesivo nas superfícies internas da madeira. Com menor porosidade, a interface de adesão torna-se mais restrita, o que pode comprometer a integridade mecânica do painel (Albino; Mori; Mendes, 2012).

### 3.6 ALTERAÇÕES SUPERFICIAIS DA MADEIRA

De acordo com os estudos de Arruda; Del Menezzi (2013), Mahnert *et al.* (2013) e Medeiros *et al.* (2021), modificações térmicas na madeira provocam alterações na estrutura das paredes celulares. De acordo com esses autores, esse processo degrada as hemiceluloses, modifica a lignina e reorganiza os extrativos, aumentando a proporção de celulose cristalina e reduzindo a quantidade de grupos hidrofílicos de hidroxila. Essas mudanças estruturais resultam em modificações nas propriedades da madeira, como a higroscopicidade e a cor (Arruda; Del Menezzi, 2013).

A modificação térmica da madeira normalmente resulta em maior hidrofobicidade, o que pode ser tanto uma vantagem quanto uma desvantagem, dependendo da aplicação específica (Hakkou *et al.*, 2005). Em algumas situações, a resistência aumentada à umidade pode melhorar a durabilidade da madeira, tornando-a mais adequada para aplicações externas ou ambientes úmidos (Godinho *et al.*, 2022). No entanto, essa característica também pode dificultar processos que dependem da absorção de água, como a colagem em sistemas de manufatura

(Hakkou *et al.*, 2005).

Além de reduzir a higroscopicidade, o tratamento térmico da madeira também proporciona uma transformação estética significativa, alterando sua cor e permitindo a obtenção de diversos tons colorimétricos conforme o processo utilizado (Schnabel *et al.*, 2007).

A mudança de cor da madeira amplia suas possibilidades de utilização, oferecendo características estéticas com uma gama de aplicações (Zhang, Peng *et al.*, 2023). Com uma madeira mais atraente visualmente e mais estável, o tratamento térmico pode tornar-se uma escolha preferencial para mercados exigentes que buscam qualidade e versatilidade, desde revestimentos decorativos até móveis de design sofisticado (Zhang, Peng *et al.*, 2023).

Comercialmente, a coloração da madeira exerce uma influência significativa sobre o consumidor, impactando diretamente suas decisões devido à aparência visual (Esteves; Pereira, 2009). Em muitos mercados, madeiras com tons mais escuros são frequentemente preferidas e valorizadas em comparação com madeiras mais claras, o que eleva seu valor percebido e atratividade (Herrera *et al.*, 2018). Essa preferência por tonalidades mais escuras reflete não apenas uma questão estética, mas também uma percepção de maior durabilidade e qualidade. Assim, a cor da madeira interfere diretamente na aceitação e valorização pelos consumidores (Herrera *et al.*, 2018).

Os tons mais escuros da madeira submetida à modificação térmica decorrem de processos como a oxidação de compostos fenólicos, geração de substâncias secundárias, deslocamento de extrativos para a superfície e degradação das hemiceluloses, sendo que essas transformações tornam-se mais acentuadas com o aumento da temperatura de processamento (Bekhta; Proszky; Krystofiak, 2014; Wahyu *et al.*, 2015). Além dessas modificações estéticas, o tratamento térmico também impacta outras propriedades da madeira, como sua rugosidade. Nos processos termomecânicos, a rugosidade, característica superficial importante, pode ser significativamente minimizada, resultando em uma superfície mais lisa e agradável (Williams, 2010; Bekhta *et al.*, 2018; Carvalho *et al.*, 2021).

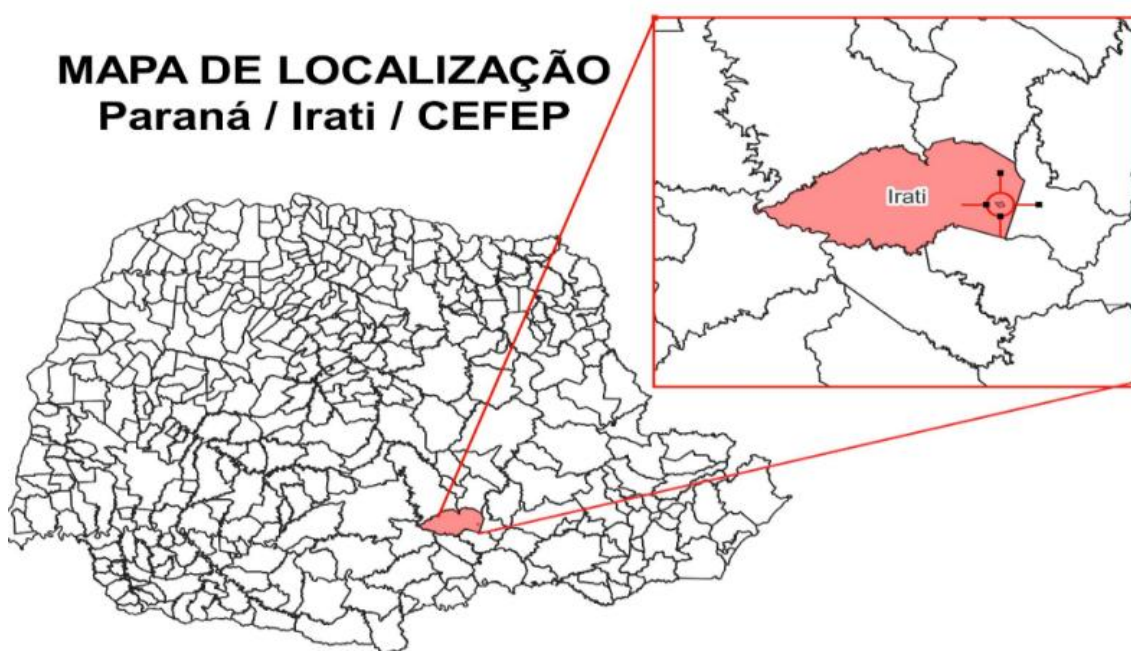
Assim, o tratamento térmico se configura como uma solução viável e vantajosa para melhorar tanto as propriedades técnicas quanto as características estéticas da madeira, atendendo às demandas de durabilidade, qualidade e versatilidade (Zhang, Peng *et al.*, 2023).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 OBTENÇÃO DA MADEIRA

Utilizou-se madeira da espécie *Pinus taeda*, oriunda de um plantio pertencente ao Centro Estadual Florestal de Educação Profissional (CEFEP) Presidente Costa e Silva, localizado no município de Irati, estado do Paraná, Brasil (Figura 4).

Figura 4. Localização da área de coleta da madeira



Fonte: CEFEP, 2022.

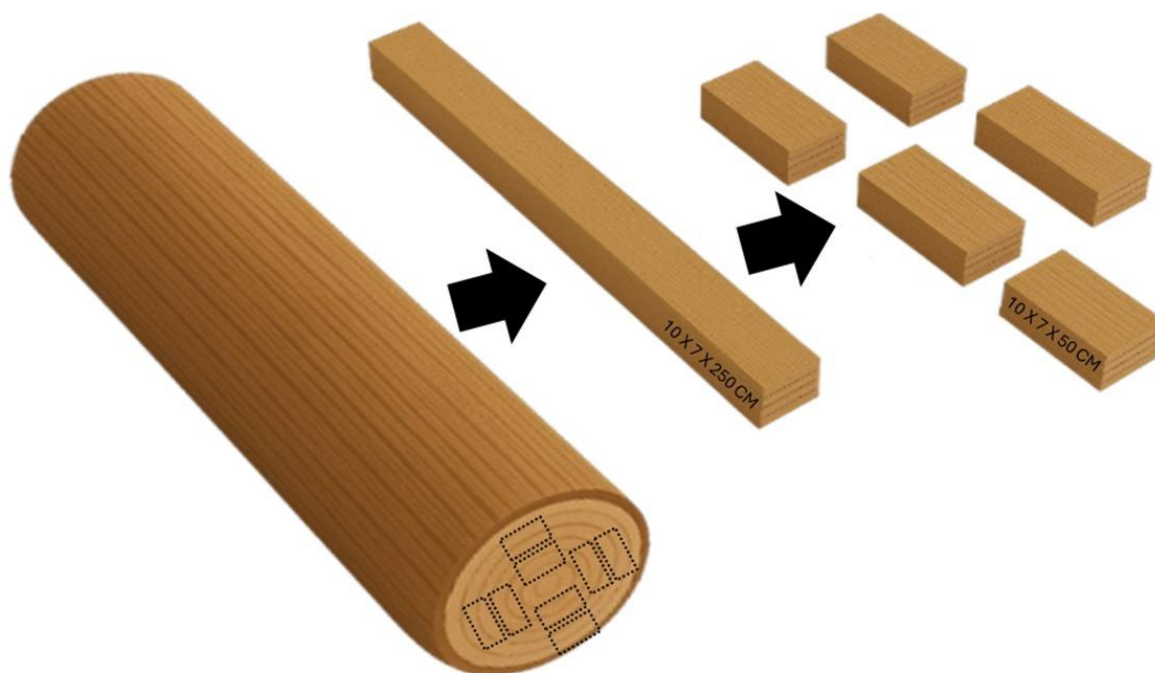
As árvores de *Pinus taeda* foram obtidas de um talhão com 23 anos, área de 2,52 hectares, diâmetro médio à altura do peito de 30 cm e altura média de 26 metros. A área está localizada nas coordenadas UTM: zona 22J, 537423,97 m E e 7178894,56 m S. Foram selecionadas, de forma aleatória, cinco árvores pertencentes à classe diamétrica média do talhão.

As árvores foram colhidas e seccionadas em toras de 2,50 metros de comprimento. A partir dessas toras, foram extraídas pranchas da região intermediária do lenho, compreendida entre a medula e a casca. A escolha dessa porção visa garantir maior homogeneidade do material, considerando-se propriedades como densidade, resistência e durabilidade, atributos relevantes para aplicações estruturais

e tecnológicas.

As pranchas de sentido tangencial, foram posteriormente seccionadas, resultando em cinco amostras com dimensões de 7 × 10 × 50 cm (espessura × largura × comprimento), conforme o esquema ilustrado na Figura 5.

Figura 5. Diagrama ilustrando o método de seccionamento da tora de *Pinus taeda* para a preparação das amostras experimentais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras obtidas foram acondicionadas em câmara climatizada ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  UR) até atingirem equilíbrio higroscópico. Após esse período, foi determinada a massa de cada peça. A umidade média foi estimada com base em seis amostras controle, empregadas na determinação da massa seca das outras amostras, utilizando o método gravimétrico como referência.

#### 4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em três etapas. Na primeira, determinou-se a concentração de hidróxido de sódio utilizada na pré-hidrólise. Na segunda, estabeleceu-se o tempo correspondente à concentração selecionada. Na terceira, comparou-se a eficiência da rota escolhida com alternativas disponíveis. O

delineamento inteiramente casualizado estruturou a análise dos efeitos da madeira de *Pinus taeda* ao longo das etapas.

A abordagem adotada envolveu a caracterização da concentração e do tempo de pré-hidrólise alcalina, além da verificação da eficiência da rota em relação a outras opções. Para isso, examinou-se o comportamento da madeira de *Pinus taeda* em cada fase do experimento, considerando suas respostas às condições estabelecidas e sua relação com o processamento termomecânico do material. A estrutura metodológica aplicada possibilitou uma avaliação comparativa dos métodos de pré-hidrólise, focando no efeito individual de cada tratamento, sem considerar a análise da interação entre eles.

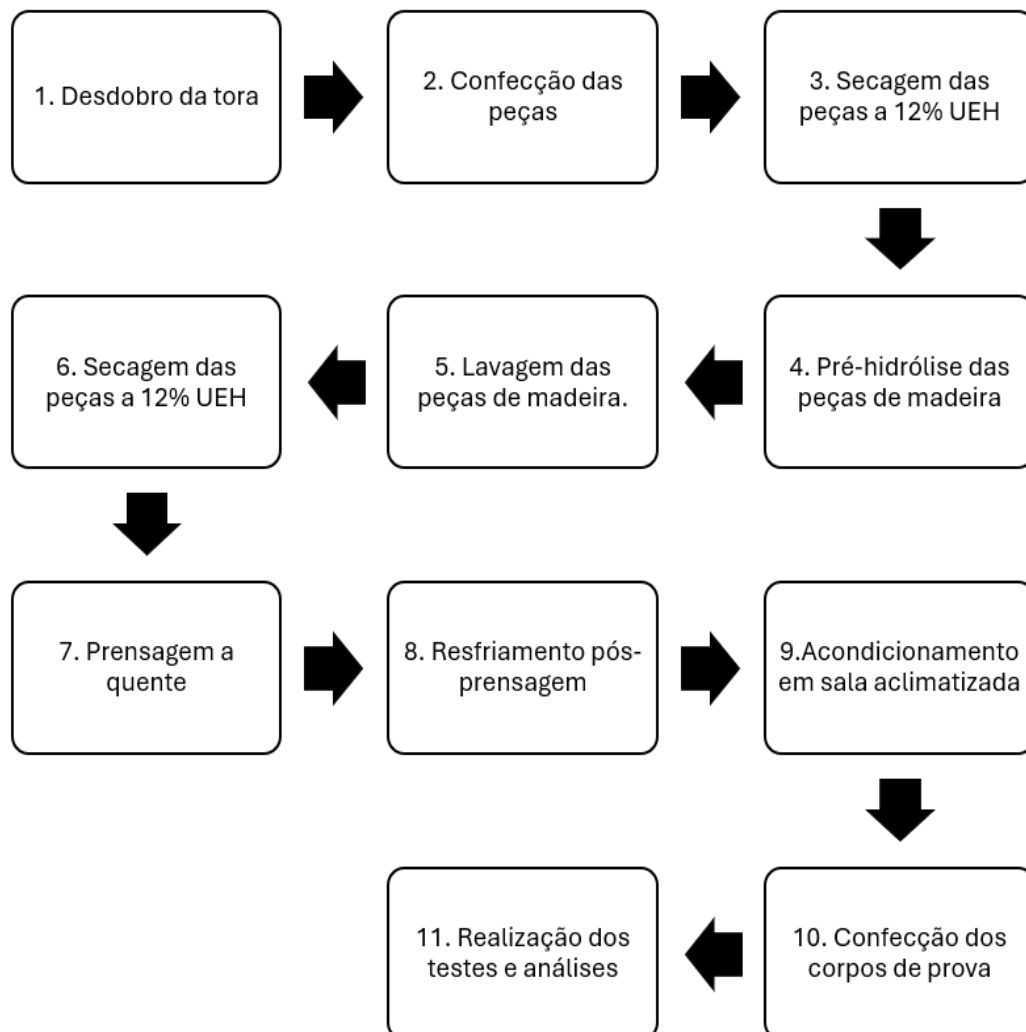
Estrutura dos três experimentos independentes, conduzidos segundo o delineamento inteiramente casualizado (DIC), conforme descrito a seguir:

- Experimento I: Foram avaliadas cinco condições experimentais: a primeira condição foi a testemunha (sem qualquer modificação), a segunda somente densificada e as demais foram submetidas à pré-hidrólise alcalina com hidróxido de sódio (NaOH) nas concentrações de 5%, 10% e 15% (m/m), todas associadas ao processo de densificação. Cada modificação contou com 15 corpos de prova, totalizando 75 corpos de prova.
- Experimento II: Foram avaliadas seis condições experimentais: a primeira testemunha (sem qualquer modificação), a segunda somente densificada e as demais foram submetidas à pré-hidrólise alcalina com NaOH 5% (m/m) em diferentes durações de exposição: 30, 60, 120 e 240 minutos. Cada modificação contou com 15 corpos de prova, totalizando 90 corpos de prova.
- Experimento III: Foram avaliadas cinco condições experimentais: a primeira testemunha (sem qualquer modificação), a segunda somente densificada e as demais foram submetidas à pré-hidrólise, sendo: (i)

auto-hidrólise com água corrente ( $H_2O$ ), (ii) hidrólise por solvente orgânico (etanol  $C_2H_5OH$ ), e (iii) tratamento alcalino com NaOH. Todas as modificações foram combinadas com um ciclo de prensagem. Cada condição foi repetida com 15 corpos de prova, totalizando 75 corpos de prova.

Os três experimentos descritos foram conduzidos conforme as etapas ilustradas na Figura 6. Inicialmente, as toras de *Pinus taeda* foram desdobradas para a produção das peças de madeira, que posteriormente passaram por um processo de secagem até alcançarem 12% de umidade em equilíbrio higroscópico (UEH).

Figura 6. Sequência de procedimentos aplicados no tratamento e pré-hidrólise da madeira de *Pinus taeda*



Na sequência, as peças foram submetidas às diferentes modificações de pré-hidrólise previstas no estudo. Após as modificações, realizou-se a lavagem das amostras, seguida de nova secagem até os 12% de UEH. Posteriormente, as amostras passaram pelo processo de densificação termomecânica, o qual consistiu em etapas de prensagem sob alta temperatura e posterior resfriamento.

As madeiras densificadas, juntamente com a amostra testemunha, foram mantidas em sala climatizada (20 °C e 65% de umidade relativa do ar), com o objetivo de promover a estabilização do material antes da confecção dos corpos de prova e da preparação das amostras para os ensaios de caracterização.

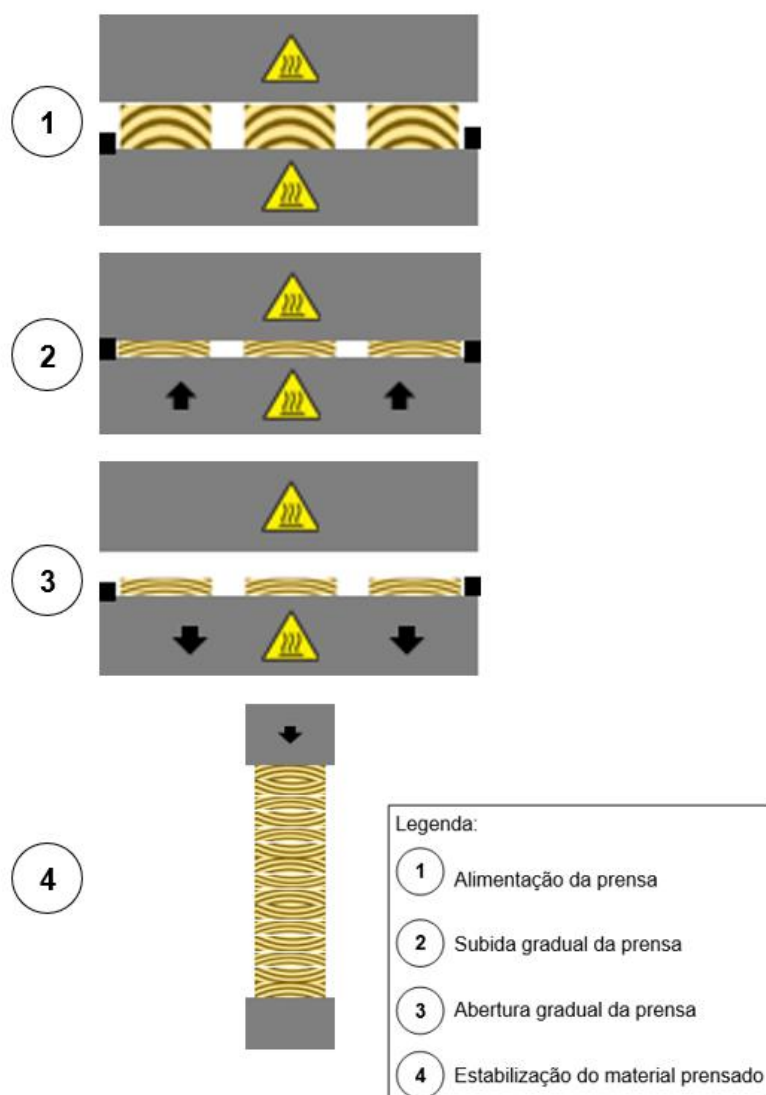
O ciclo de prensagem foi realizado sob pressão de 180 bar (61,2 kgf/cm<sup>2</sup>) e temperatura de 180 °C nos pratos da prensa, seguido de resfriamento após a abertura. Os parâmetros foram definidos com base em testes preliminares, fundamentados nos trabalhos de Pertuzzatti *et al.* (2018) e Silva (2019), que tratam da densificação de madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*.

A etapa de prensagem foi conduzida em uma prensa hidráulica equipada com aquecimento em ambos os lados e área útil de 60 cm × 60 cm. A espessura final das peças foi controlada por meio de barras de aço dispostas entre os pratos, limitando o fechamento a 25 mm, correspondente a aproximadamente 35% da espessura original.

As etapas de processamento (Figura 7) foram organizadas conforme segue:

1. As peças secas (12% UEH) foram posicionadas entre os pratos da prensa, previamente aquecidos a 180 °C;
2. A prensagem iniciou-se com a elevação gradual do prato inferior até estabilização da pressão em 180 bar;
3. Após 120 minutos de prensagem, os pratos foram abertos, encerrando a compressão;
4. As peças foram transferidas para uma segunda prensa, onde permaneceram sob pressão de 1 bar por 24 horas, para resfriamento controlado. Em seguida, foram acondicionadas em sala climatizada.

Figura 7. Etapas do processamento termomecânico



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.1 Delineamento do Experimento I

Nesta etapa, utilizou-se solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) em diferentes concentrações, com o objetivo de avaliar o efeito do tratamento alcalino na densificação da madeira. Os corpos de prova foram imersos nas soluções por 2 horas, sob ebulição, em sistema aberto.

Após o tratamento de pré-hidrólise, as amostras foram secas e submetidas à prensagem a quente, conduzida sob temperatura de 180 °C e pressão de 180 bar, com duração de 120 minutos. Esse processo associou calor e pressão de forma simultânea, conforme os parâmetros definidos.

A Tabela 1 apresenta as modificações realizados e a quantidade de corpos de

prova por condição experimental.

Tabela 1. Parâmetros utilizados no Experimento I conforme as diferentes concentrações de NaOH aplicadas durante o pré-tratamento.

TRATAMENTO	CONDIÇÃO	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA
1	TESTEMUNHA	15
2	DENSIFICADA	15
3	NaOH 5%-120m DENSIFICADA	15
4	NaOH 10%-120m DENSIFICADA	15
5	NaOH 15%-120m DENSIFICADA	15

\*Concentrações expressas em % m/m de NaOH, com base na massa seca total da madeira submetida ao tratamento.

#### 4.2.2 Delineamento do Experimento II

Neste experimento, utilizou-se uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 5%<sub>m/m</sub>, com base na massa seca total da madeira a ser tratada. Após a dissolução completa do reagente, os corpos de prova foram imersos na solução e mantidos por 2 horas à temperatura de ebulição, em sistema aberto.

Após o tratamento de pré-hidrólise, as amostras foram secas e submetidas à prensagem a quente, conduzida sob temperatura de 180 °C e pressão de 180 bar, com duração de 120 minutos. Esse processo associou calor e pressão de forma simultânea, conforme os parâmetros definidos.

A Tabela 2 apresenta as variáveis utilizadas para as modificações de pré-hidrólise e densificação das madeiras, especificando o tempo de exposição à solução alcalina e a quantidade de corpos de prova por condição experimental.

Tabela 2. Parâmetros utilizados no Experimento II conforme as diferentes durações do pré-tratamento alcalino.

TRATAMENTO	CONDIÇÃO	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA
1	TESTEMUNHA	15
2	DENSIFICADA	15
3	NaOH 5%-30m DENSIFICADA	15
4	NaOH 5%-60m DENSIFICADA	15
5	NaOH 5%-120m DENSIFICADA	15
6	NaOH 5%-240m DENSIFICADA	15

\* Concentração de NaOH expressa em % m/m, com base na massa seca total da madeira modificada.

### 4.2.3 Delineamento do Experimento III

Para as modificações de pré-hidrólise, utilizou-se uma solução aquosa contendo o reagente apropriado para cada condição. Após a dissolução completa do reagente, os corpos de prova foram imersos na solução e mantidos por 2 horas à temperatura de ebulição, em sistema aberto.

Após o tratamento de pré-hidrólise, as amostras foram secas e submetidas à prensagem a quente, conduzida sob temperatura de 180 °C e pressão de 180 bar, com duração de 120 minutos. Esse processo associou calor e pressão de forma simultânea, conforme os parâmetros definidos.

A Tabela 3 apresenta as variáveis utilizadas para as modificações de pré-hidrólise e densificação termomecânica, especificando os diferentes reagentes e condições de tratamento, bem como a quantidade de corpos de prova por condição experimental.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no Experimento III conforme os diferentes tipos de pré-tratamento aplicados.

TRATAMENTO	CONDIÇÃO	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA
1	TESTEMUNHA	15
2	DENSIFICADA	15
3	AUTO-HIDRÓLISE	15
4	ORGANOSSOLVE	15
5	ALCALINA	15

Descrição das modificações de pré-hidrólise:

- **Auto-hidrólise:** Imersão em água corrente por 2 horas a temperatura de ebulição.
- **Organossolve:** Solução contendo 50% v/v de água potável e 50% v/v de etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) por 2 horas, seguida de imersão em água deionizada fervente por diversas vezes para remoção dos produtos químicos.
- **Alcalina:** Solução contendo 5%<sub>m/m</sub> de hidróxido de sódio (NaOH) em relação à massa seca total da madeira, mantida por 2 horas, seguida de imersão em água deionizada fervente por diversas vezes para remoção dos produtos químicos.

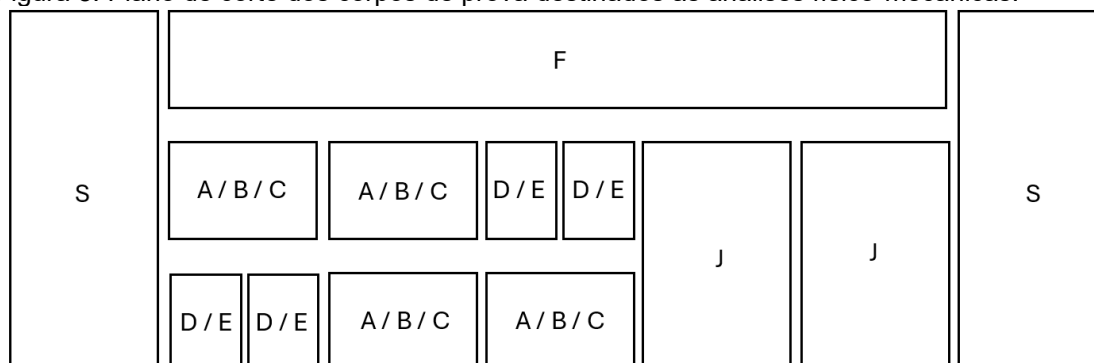
### 4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DESTINADOS AOS TESTES EXPERIMENTAIS

Após os fragmentos de pranchas de *P. taeda* serem secados até atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente, as pranchas foram reduzidas em espessura utilizando uma plaina desengrossadeira. Em seguida, as peças de madeira foram confeccionadas com o auxílio de uma serra circular e destopadeira. Os corpos de prova foram dimensionados com 7 × 10 × 50 cm (espessura × largura × comprimento), com a espessura final desejada de 2,5 cm, a fim de facilitar a padronização durante a realização dos ensaios das propriedades tecnológicas da madeira.

As peças de madeira foram então levadas para uma sala de climatização, mantida a 20°C e 65% de umidade relativa, onde permaneceram até atingirem o equilíbrio higroscópico. Após esse processo, as amostras foram pesadas em uma balança analítica com precisão de 0,01 g, e as dimensões das faces (radial, tangencial e longitudinal) foram mensuradas com o uso de paquímetro digital, com erro de 0,01 mm.

Os ensaios físicos e mecânicos foram realizados de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2022) – NBR 7190, e da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2021). O dimensionamento dos corpos de prova foi reduzido proporcionalmente ao sugerido pelas normas em questão. O esquema de corte dos corpos de prova utilizado para as análises físico-mecânicas está ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Plano de corte dos corpos de prova destinados às análises físico-mecânicas.



Em que: A – Umidade de Equilíbrio Higroscópico (25 x 100 mm), B - Densidade Aparente (25 x 100 mm); C - Densidade Básica (25 x 100 mm), D - Inchamento em Espessura (25 x 50 mm); E – Inflamabilidade (25 x 50 mm); F – Flexão estática (25 x 420 mm); J – Dureza Janka (50 x 50 mm); S – Sobra de segurança 80 x 40 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.4 TESTES E ANÁLISES

### 4.4.1 Composição química da madeira

As amostras utilizadas foram obtidas da fração “S” indicada na Figura 8. O preparo seguiu a norma TAPPI T 257 cm-85 (TAPPI, 1985), processando o material em moinho Willey até que se transformasse em serragem. A fração utilizada nas análises corresponde ao material que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh.

Após a aclimatização das amostras a 20°C e 65% de umidade relativa (U.R.), foi realizada a determinação gravimétrica do teor de umidade (teor a.s.). O valor final do teor a.s. de cada amostra foi obtido a partir da média das repetições realizadas com o mesmo material.

Cada amostra foi pesada (1 g a.s.) e colocada em cadinhos com placa porosa do tipo Gooch. A extração seguiu a norma TAPPI T 264 cm-97 (TAPPI, 1997a) e ocorreu em etapas, conforme descrito abaixo:

1. A extração inicial foi realizada com uma solução de álcool etílico: tolueno (1:2, v/v) sob refluxo em extrator Soxhlet por 8 horas.
2. A segunda extração foi feita em álcool etílico, também sob refluxo em Soxhlet, por mais 8 horas.
3. A última etapa consistiu na extração final com água quente, sob refluxo em Soxhlet, por 8 horas.

O teor de extrativos removidos foi determinado gravimetricamente, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Extrativos totais (\%)} = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \quad (1)$$

Em que:  $P_i$ = Peso inicial da amostra;  $P_f$ = Peso final após remoção dos extrativos.

As amostras, após a remoção dos extrativos, passaram pelo processo de hidrólise ácida, conforme a norma TAPPI T 222 om-97 (TAPPI, 1997b). Após esse processo, os teores de lignina insolúvel (Klason) foram determinados seguindo o procedimento descrito por Gomide e Demuner (1986).

O teor de lignina solúvel em ácido sulfúrico foi quantificado por

espectrofotometria, utilizando a equação descrita por Goldschimid (1971). Por fim, o cálculo da lignina total foi realizado somando os valores da lignina solúvel e insolúvel.

#### 4.4.2 Propriedades físicas

##### 4.4.2.1 Colorimetria

A avaliação da cor da madeira foi realizada por meio de um espectrofotômetro Konica Minolta CM-5, utilizando fonte de luz padronizada e ângulo de observação de 10°. Para a análise quantitativa, foi adotado o sistema de cores CIELAB, e os parâmetros colorimétricos foram calculados conforme a norma ASTM D2244-21 (ASTM, 2021).

As medições foram realizadas na face radial das amostras densificadas, com o objetivo de avaliar a influência da prensagem e do tratamento de pré-hidrólise sobre as alterações na cor da madeira. Foram utilizados quinze corpos de prova por tratamento. Para cada corpo de prova, foi realizada uma medição. As análises colorimétricas ocorreram antes do ensaio de inflamabilidade, utilizando os mesmos corpos de prova (5 x 2,5 x 2,5 cm: comprimento, espessura e largura).

As coordenadas cromáticas luminosidade ( $L^*$ ), verde-vermelho ( $a^*$ ) e azul-amarelo ( $b^*$ ) foram obtidas diretamente do equipamento. A partir dessas, calcularam-se a saturação da cor ( $C^*$ ), o ângulo de matiz ( $h^*$ ) e a variação total da cor ( $\Delta E$ ), com base nas equações 2, 3 e 4, respectivamente:

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

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

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (4)$$

Em que:  $C^*$ -saturação de cor,  $a^*$ -coordenada verde-vermelha,  $b^*$ -coordenada azul-amarela,  $h^*$ -ângulo de matriz,  $\Delta E$ -variação total de cor,  $\Delta L^*$ -variação de luminosidade,  $\Delta a^*$ -variação de coordenada verde-vermelha e  $\Delta b^*$ -variação de coordenada azul-amarela.

A classificação da variação de cor adotada foi proposta por Hikita, Toyoda e Azuma (2001), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação da variação total da cor ( $\Delta E^*$ ) de madeiras.

Varição da cor ( $\Delta E^*$ )	Classificação
> - 0,5	Desprezível
0,5 - 1,5	Ligeiramente perceptível
1,5 - 3,0	Notável
3,0 - 6,0	Apreciável
6,0 - <	Muito apreciável

Fonte: Hikita, Toyoda e Azuma (2001).

#### 4.4.2.2 Taxa de compactação

A taxa de compactação foi calculada a partir da razão entre a densidade final e a densidade inicial das amostras, conforme a Equação 5. As medições foram realizadas com paquímetro digital (precisão de 0,01 mm) logo após o processo de densificação.

$$TC = \frac{Df - Di}{Di} * 100 \quad (5)$$

Em que: TC = taxa de compactação; Di = densidade inicial (mm); Df = densidade final (mm);

#### 4.4.2.3 Densidade

Para a determinação da densidade básica - Db (Equação 6) e da densidade aparente - Da (Equação 7) as amostras foram pesadas e medidas em ambiente climatizado (20 °C e 65% de UR).

$$Db = \frac{M_{seca}}{V_{saturado}} \quad (6)$$

$$Da = \frac{M_{clim}}{V_{clim}} \quad (7)$$

Em que: Db = densidade básica dos corpos de prova ( $g/cm^3$ );  $M_{seca}$  = massa seca a 103°C dos corpos de prova (g);  $V_{saturado}$  = volume saturado dos corpos de prova ( $cm^3$ ); Da = densidade aparente dos corpos de prova ( $g/cm^3$ );  $M_{clim}$  = massa climatizada dos corpos de prova (g);  $V_{clim}$  = volume climatizado dos corpos de prova ( $cm^3$ ).

#### 4.4.2.4 Umidade de Equilíbrio Higroscópico

A Umidade de Equilíbrio Higroscópico (UEH) foi determinada conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM D143-94 (ASTM, 1994). As amostras foram inicialmente pesadas em balança digital com precisão de 0,01 g e, em seguida, submetidas à secagem em estufa a  $103 \pm 2$  °C até atingirem massa constante. A UEH foi calculada pela Equação 8:

$$UEH = \frac{M_{clim} - M_{seca}}{M_{seca}} \quad (8)$$

Sendo que: UEH = Umidade de Equilíbrio Higroscópico (%);  $M_{clim}$  = massa dos corpos de prova climatizados (g);  $M_{seca}$  = massa dos corpos de prova após secagem em estufa laboratorial a  $103 \pm 2$  °C (g).

#### 4.4.2.5 Inchamento em espessura

O ensaio de inchamento em espessura teve como finalidade mensurar as alterações dimensionais dos corpos de prova ao serem submetidos às condições seca e úmida, após o processo de imersão em água. As medições foram realizadas com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm e em diferentes intervalos de tempo (2, 24, 48 e 72 horas), a partir da espessura inicial registrada a seco. O cálculo do inchamento percentual foi realizado com base na Equação 9:

$$IE_{xH} = \frac{E_{xH} - E_i}{E_i} * 100 \quad (9)$$

Sendo que:  $IE_{xH}$  = inchamento em espessura após x horas de imersão em água (%);  $E_{xH}$  = espessura após x horas de imersão em água (cm);  $E_i$  = espessura inicial do corpo de prova (cm).

#### 4.4.2.6 Teste de queima com curta exposição à chama

A inflamabilidade das amostras foi avaliada por meio do ensaio de queima com curta exposição à chama, conforme o procedimento descrito por Tondi *et al.* (2012). Corpos de prova com dimensões de  $5 \times 2,5 \times 2,5$  cm (nos sentidos longitudinal, tangencial e radial) foram posicionados com a face radial voltada para a fonte de calor e expostos a uma chama oxidante gerada por um bico de Bunsen por 120 segundos.

Durante o ensaio, registraram-se os seguintes parâmetros, em segundos, com

auxílio de cronômetro digital:

- **Tempo de ignição:** intervalo até o aparecimento de uma chama visível na amostra;
- **Tempo de chama:** duração da queima após o desligamento do bico de Bunsen;
- **Tempo de brasa:** intervalo até a extinção completa da incandescência e da emissão de fumaça pela amostra.

A Figura 9 ilustra as etapas descritas no ensaio.

Figura 9. Teste de queima com curta exposição à chama



Em que: (a) Momento em que a ignição da chama começa (tempo de ignição). (b) A amostra continua queimando após a chama do bico de Bunsen parar (tempo de chama). (c) Presença de incandescência indicando que a amostra ainda está queimando (tempo de brasa).

Fonte: Bonfatti Júnior *et al.* (2024).

Após o ensaio, as amostras foram pesadas para a determinação da massa residual, calculada conforme a Equação 10:

$$\text{Massa residual (\%)} = \frac{b_m}{o_m} \times 100 \quad (10)$$

Em que: Massa residual após o teste de queima em porcentagem;  $b_m$ —massa da amostra após a queima em gramas; e  $o_m$ —massa da madeira antes do teste de queima em gramas.

#### 4.4.3 Propriedades mecânicas

Os ensaios de flexão estática foram conduzidos conforme a norma ASTM D143-94 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 1994). Utilizaram-se corpos de prova com seção transversal de 2,5 × 2,5 cm e comprimento de 42 cm. As análises foram realizadas em máquina universal de ensaios EMIC DL 30000, com capacidade de 30 kN e célula de carga de 15.000 N. A partir dos dados obtidos, determinaram-se o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), que

indicam, respectivamente, a rigidez e a resistência à flexão dos materiais avaliados.

O ensaio de dureza Janka foi executado na mesma máquina (EMIC DL 30000), também conforme a norma ASTM D143-94 (ASTM, 1994), utilizando célula de carga de 15.000 N. As penetrações foram realizadas na face radial dos corpos de prova, com dimensões de 5 × 5 × 2,5 cm (nos sentidos longitudinal, tangencial e radial). Empregou-se esfera metálica com diâmetro de 10,6 mm, registrando-se a carga máxima necessária para a penetração equivalente à metade do diâmetro da esfera.

A comparação das propriedades mecânicas ocorreu de duas formas, a primeira entre espécies tropicais disponíveis no comércio local e a segunda com a norma NBR 7190, por meio das classes de resistência estabelecidas em ensaios de peças estruturais. A norma categoriza coníferas e folhosas, além de suas respectivas subclasses, com base em parâmetros como resistência, rigidez e densidade. A análise desses critérios permite uma avaliação mais precisa e adequada desses materiais.

#### **4.4.4 Procedimentos estatísticos**

Foram avaliadas três categorias de amostras: madeira de *Pinus in natura* (testemunha), madeira densificada sem pré-hidrólise (densificada) e madeira submetida às diferentes modificações de pré-hidrólise. Essa abordagem comparativa possibilitou avaliar os impactos da densificação e das modificações por pré-hidrólise sobre as propriedades físicas e mecânicas do material.

As análises estatísticas foram conduzidas com base em um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), adotando-se nível de significância de 5% ( $p \leq 0,05$ ), com o objetivo de verificar a existência de diferenças entre as médias. Quando identificadas diferenças significativas, aplicou-se o teste de comparação múltipla de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). A homogeneidade das variâncias foi previamente verificada por meio do teste de Bartlett, assegurando os pressupostos do modelo paramétrico adotado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 EXPERIMENTO I

#### 5.1.1 Análise da composição química

Na Tabela 5 são apresentados os valores de composição química das madeiras analisadas. De modo geral, observou-se uma redução nos teores de extrativos nas amostras submetidas a tratamento em relação àquelas utilizadas como testemunha, ao passo que os níveis de lignina aumentaram. Os teores de holocelulose, por sua vez, apresentaram redução nas amostras submetidas à pré-hidrólise.

Tabela 5. Composição química das amostras de madeira de *Pinus taeda* conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I).

TRATAMENTO	Extrativos totais (%)	Ligninas totais (%)	Holocelulose (%)
TESTEMUNHA	2,67 <sub>(±0,06)</sub> a	24,27 <sub>(±0,42)</sub> c	73,06 <sub>(±0,41)</sub> a
DENSIFICADA	2,52 <sub>(±0,05)</sub> b	24,95 <sub>(±0,46)</sub> bc	72,54 <sub>(±0,42)</sub> ab
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	2,34 <sub>(±0,06)</sub> c	25,40 <sub>(±0,42)</sub> b	72,26 <sub>(±0,47)</sub> b
NaOH 10%-120m DENSIFICADA	2,37 <sub>(±0,06)</sub> c	27,08 <sub>(±0,49)</sub> a	70,55 <sub>(±0,48)</sub> c
NaOH 15%-120m DENSIFICADA	2,42 <sub>(±0,09)</sub> bc	27,09 <sub>(±0,47)</sub> a	70,49 <sub>(±0,41)</sub> c
Coefficiente de variação (%)	2,77	1,77	0,61

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

O tratamento com 5%<sub>m/m</sub> NaOH promoveu a maior redução no teor de extrativos totais em relação à testemunha (-14,22%). A concentração de 15% de NaOH resultou nos maiores teores de lignina (10,39%) e nas menores porcentagens de holocelulose (-3,65%). Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as amostras tratadas com 10% e 15% de NaOH, indicando que o aumento da concentração não promoveu variações adicionais relevantes.

A pré-hidrólise alcalina com 5%<sub>m/m</sub> NaOH foi suficiente para provocar alterações expressivas na composição química da madeira, sugerindo que concentrações superiores não são necessárias para alcançar o efeito desejado. O aumento no teor

de lignina está relacionado à solubilização de hemiceluloses, cuja remoção resulta em uma proporção relativa maior de lignina na amostra (Navi; Pizzi, 2015; Cruz *et al.*, 2018).

A facilidade de degradação das hemiceluloses decorre de sua estrutura amorfa e baixo peso molecular (González-Peña; Hale, 2009). A despolimerização desses polímeros, tanto na etapa de pré-hidrólise quanto durante a etapa de termodensificação, tende a gerar uma matriz lignocelulósica mais homogênea e porosa (Tjeerdsma; Militz, 2005; Boonstra, 2008; Navi; Pizzi, 2015; Cruz *et al.*, 2018).

### 5.1.2 Propriedades físicas






Na Tabela 6 são apresentados os índices colorimétricos das amostras de madeira de pinus, avaliados no sistema CIELab, considerando as categorias: testemunha (*in natura*) e densificadas após as diferentes modificações de pré-hidrólise. Houve diferença estatística nas coordenadas  $L^*$  (luminosidade) e  $a^*$  (vermelho/verde) entre as amostras tratadas e a testemunha.

O tratamento com 5%<sub>m/m</sub> NaOH promoveu as maiores variações em comparação à madeira *in natura*, com redução de 43,10% no índice de luminosidade ( $L$ ) e aumento de 20,10% na coordenada  $a^*$ . Esses resultados indicam que as modificações aplicadas alteraram significativamente a coloração da madeira.

A diminuição nos valores de  $L^*$  (em que 100 representa um tom claro e 0 um tom escuro) indica escurecimento das amostras submetidas à densificação com pré-tratamento, enquanto a madeira *in natura* manteve uma tonalidade mais clara. O aumento nos valores de  $a^*$  (valores positivos indicam coloração avermelhada, e negativos, esverdeada) sugere uma tendência à tonalidade mais vermelha nas amostras tratadas. Já os valores positivos de  $b^*$  (que indicam tonalidade amarela, em oposição ao azul), mostram que a madeira adquiriu coloração mais amarelada, possivelmente associada a processos fotoquímicos naturais.

A elevação nos valores de  $a^*$  indica uma coloração mais acastanhada, o que pode estar relacionado ao teor de extrativos presentes nas amostras (Gierlinger *et al.*, 2004). A predominância da tonalidade amarela, por sua vez, pode ser explicada pelas características químicas dos componentes da madeira, bem como pelas condições edáficas dos locais de crescimento (Pelit, 2016; Moya *et al.*, 2012).

Tabela 6. Colorimetria da madeira de *Pinus taeda* conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I).

TRATAMENTO	L*	a*	b*	C*	h*	ΔE	COR OBSERVADA
TESTEMUNHA	73,91 <sub>(±2,42)</sub> a	7,71 <sub>(±2,09)</sub> b	25,37 <sub>(±3,11)</sub> a	26,54 <sub>(±3,54)</sub> a	73,40 <sub>(±2,69)</sub> a	-	
DENSIFICADA	75,44 <sub>(±3,09)</sub> a	7,54 <sub>(±2,05)</sub> b	25,79 <sub>(±2,41)</sub> a	26,91 <sub>(±2,82)</sub> a	73,98 <sub>(±3,27)</sub> a	1,59	
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	51,65 <sub>(±8,82)</sub> b	9,65 <sub>(±0,97)</sub> a	24,76 <sub>(±4,00)</sub> a	26,65 <sub>(±3,52)</sub> a	68,16 <sub>(±4,66)</sub> b	22,36	
NaOH 10%-120m DENSIFICADA	51,67 <sub>(±7,60)</sub> b	9,37 <sub>(±1,39)</sub> a	24,33 <sub>(±2,86)</sub> a	26,11 <sub>(±2,85)</sub> a	68,83 <sub>(±3,14)</sub> b	22,33	
NaOH 15%-120m DENSIFICADA	52,07 <sub>(±7,88)</sub> b	9,41 <sub>(±1,05)</sub> a	24,87 <sub>(±3,99)</sub> a	26,66 <sub>(±3,62)</sub> a	68,76 <sub>(±4,56)</sub> b	21,92	
Coefficiente de variação (%)	10,71	18,12	13,32	12,38	5,31		

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

Em que: L\* = luminosidade; a\* = verde-vermelho; b\* = azul-amarelo; C\* = saturação de cor; h\* = ângulo de matiz e ΔE = variação total de cor.

A hidrólise alcalina da madeira de pinus com NaOH é um processo que visa a modificação da matriz constituinte da madeira, no entanto, esse tratamento pode impactar a cor da madeira, levando ao escurecimento, especialmente em condições de alta temperatura e concentração de álcali.

O tratamento com NaOH quebra as ligações de hidrogênio intra e intermoleculares da celulose, expondo as hidroxilas livres e aumentando a acessibilidade. Isso resulta em remoção de hemicelulose, conseqüentemente, aumento da área superficial e redução da cristalinidade da celulose (Karimi e Noori, 2016; Barman et al., 2020; Bay et al., 2020).

O escurecimento da madeira ocorre devido à degradação térmica e química de componentes como lignina e hemicelulose durante o tratamento alcalino e/ou térmico (Akkuş e Budakçı, 2020).

Na Tabela 7 é possível observar os valores médios da taxa de compactação (TC), densidade aparente (DA), densidade básica (DB) e umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) das amostras analisadas. Observa-se que a compactação foi mais expressiva nas amostras submetidas a pré-tratamento antes da densificação. O tratamento com 15%<sub>m/m</sub> NaOH resultou em taxa de compactação 16,25% superior à da amostra densificada sem pré-tratamento.

Tabela 7. Taxa de compactação e propriedades físicas da madeira de *Pinus taeda* conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I).

TRATAMENTO	TC	DA	DB	UEH
TESTEMUNHA	-	0,45(±0,02) c	0,38(±0,01) c	12,80(±0,32) a
DENSIFICADA	1,34(±0,16) b	0,86(±0,09) b	0,47(±0,10) bc	6,54(±0,79) c
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	1,42(±0,19) ab	0,98(±0,11) a	0,55(±0,14) ab	8,12(±0,48) b
NaOH 10%-120m DENSIFICADA	1,58(±0,25) a	0,88(±0,11) b	0,48(±0,11) abc	6,81(±0,44) c
NaOH 15%-120m DENSIFICADA	1,60(±0,35) a	0,99(±0,13) a	0,59(±0,14) a	7,53(±0,96) b
Coefficiente de variação (%)	16,78	11,84	22,42	7,70

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%. Em que: TC (Taxa de Compactação); DB (Densidade Básica - g.cm<sup>-3</sup>); DA (Densidade Aparente - g.cm<sup>-3</sup>); UEH (Umidade de Equilíbrio Higroscópico - %)

A maior densidade aparente foi registrada nas amostras submetidas ao tratamento com solução de NaOH a 15% m/m, representando um aumento de 120%

em comparação à madeira não modificada (testemunha) e de 15,12% frente à madeira densificada não tratada. Esse comportamento está relacionado à estrutura anatômica da madeira, uma vez que madeiras com menor densidade apresentam maior proporção de espaços vazios e paredes celulares mais finas, o que favorece a compressão (Unsal; Candan; Korkut, 2011).

Embora as modificações tenham promovido incremento nas propriedades físicas, algumas amostras densificadas apresentaram deformações e fissuras. A redução nos valores de umidade de equilíbrio foi evidente nas madeiras processadas, independentemente da aplicação do pré-tratamento, sugerindo que o processamento termomecânico interfere diretamente na higroscopicidade da madeira.

Os resultados obtidos corroboram a correlação entre taxa de compactação e densificação apontada por Bekhta, Niemz e Sedliacik (2012), evidenciando que a temperatura exerce papel decisivo nesse processo. Observou-se que, com o aumento da temperatura, há maior plasticidade da lignina, que devido ao seu comportamento viscoelástico, amolece ao atingir a temperatura de transição vítrea (Wolcott; Kamke; Dillard, 1990), favorecendo a compressão das paredes celulares e o colapso estrutural (Welzbacher et al., 2008). Esses achados indicam que o controle térmico é essencial para otimizar a eficiência da termodensificação e a uniformidade estrutural do material tratado.

Keckes *et al.* (2003) explicam que a deformação permanente ocorre por fluxo viscoso dos componentes da matriz ou pela reorganização das pontes de hidrogênio entre os constituintes da parede celular (Navi; Pittet; Plummer, 2002; Adler; Buehler, 2013). As pré-modificações com NaOH reduziram a rigidez da madeira, aumentando sua flexibilidade e facilitando a compressão.

No tratamento com 10% de NaOH, os valores médios de densidade aparente foram semelhantes aos observados nas amostras sem pré-tratamento. No entanto, em termos de dureza, não houve diferença significativa em relação à testemunha.

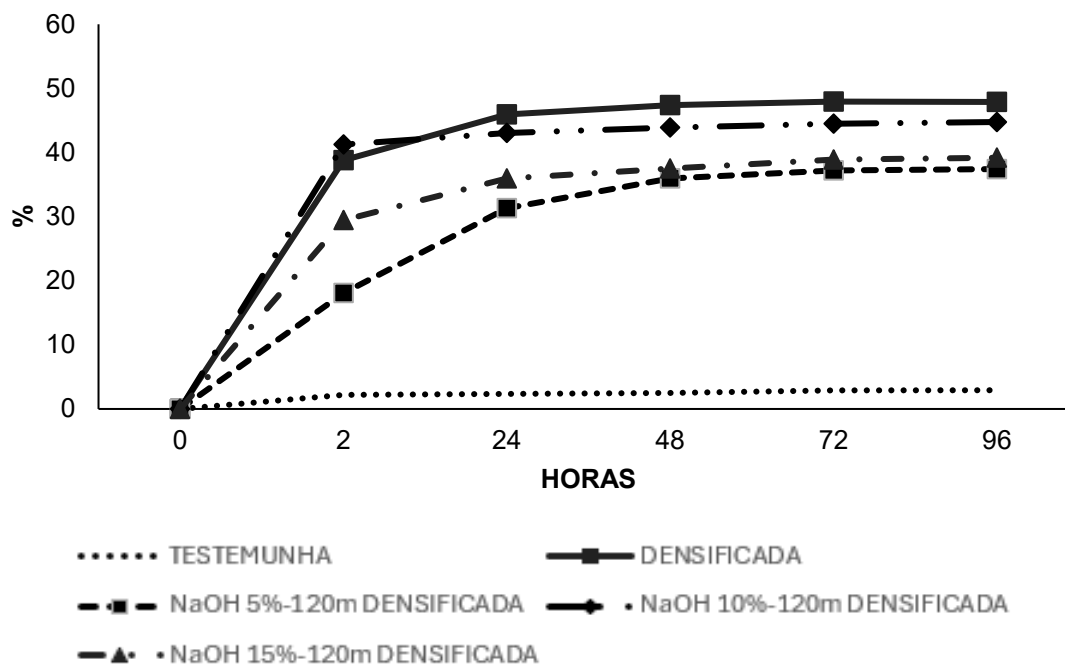
De modo geral, o aumento da densidade aparente depende da densidade original da madeira e das condições térmicas do processo (Pertuzzatti *et al.*, 2018). A compressão eficiente está associada à presença de espaços vazios na estrutura e à termoplasticidade da lignina, que, ao amolecer com o calor, permite o achatamento celular (Ulker; Imirzi; Burdurlu, 2012; İmirzi; Ülker; Burdurlu, 2013). A remoção parcial da hemicelulose durante a pré-hidrólise potencializa esse efeito ao tornar a matriz

mais homogênea e porosa (Tjeerdsma; Militz, 2005; Boonstra, 2008; Navi; Pizzi, 2015; Cruz *et al.*, 2018).

A diminuição da umidade de equilíbrio higroscópico nas amostras densificadas indica alterações estruturais relevantes na matriz da madeira (Welzbacher *et al.*, 2008; Dubey, 2010; Pelit; Sönmez; Budakçı, 2014; Bal, 2015; Bekhta *et al.*, 2016). Ainda assim, observa-se que as amostras submetidas à pré-hidrólise com NaOH apresentaram valores ligeiramente mais elevados de umidade de equilíbrio do que aquelas densificadas sem pré-tratamento. Esse aumento pode ser atribuído à degradação química das hemiceluloses (Akgül; Gümüşkaya; Korkut, 2007; Akyildiz; Ateş, 2008), que pode ter deixado a matriz mais suscetível à absorção de água.

A redução da higroscopicidade em madeiras densificadas é uma característica desejável, pois confere maior estabilidade frente às variações de umidade (Santos; Del Menezzi; De Souza, 2012). No entanto, conforme demonstrado na Figura 10, o inchamento das amostras densificadas após imersão prolongada em água foi elevado, indicando instabilidade dimensional causada por tensões residuais, fenômeno conhecido como *springback*, que é amplamente discutido na literatura.

Figura 10. Inchamento em espessura após a imersão prolongada em água da madeira de *Pinus taeda* conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados obtidos indicam que o inchamento da madeira está diretamente

relacionado à penetração de moléculas de água nos espaços microscópicos das paredes celulares, especialmente entre micelas e regiões amorfas. Esse mecanismo promove o afastamento das estruturas internas, refletindo em variações dimensionais significativas. Observou-se que amostras com maior densidade apresentaram inchamento mais acentuado, o que corrobora a tendência descrita por Moreschi (2012). Tais resultados reforçam a importância de considerar a densidade como variável na avaliação da estabilidade dimensional da madeira.

Os resultados indicam que a pré-hidrólise e a termodensificação promove a remoção parcial das hemiceluloses, o que contribui para o aumento da porosidade e para uma maior homogeneidade estrutural da madeira, conforme descrito por Tjeerdsma e Militz (2005), Boonstra (2008), Navi e Pizzi (2015) e Cruz et al. (2018). Essa modificação estrutural parece estar diretamente associada aos elevados valores de inchamento registrados neste estudo, uma vez que os espaços gerados pela degradação das hemiceluloses favorecem a penetração de água. Os elevados valores de inchamento observados neste estudo estão relacionados à inserção de água nos espaços gerados por esse processo, caracterizando o fenômeno conhecido como *springback*.

Ainda que a pré-hidrólise alcalina tenha promovido redução no inchamento em espessura, independentemente da concentração de NaOH empregada, os valores obtidos não diferiram significativamente em relação à madeira densificada sem pré-tratamento.






Na Tabela 8 estão apresentados os dados referentes à inflamabilidade das amostras, evidenciando a sensibilidade do material à combustão. Durante a exposição ao fogo, celulose, hemicelulose e lignina são degradadas, liberando gases, vapor d'água e resíduos sólidos.

Quanto ao tempo de ignição, o intervalo necessário para o início da combustão após exposição à fonte de calor, verificou-se que as amostras submetidas a termodensificação associada a pré-hidrólise com NaOH apresentaram retardamento de aproximadamente 75% em relação à madeira *in natura*. A madeira densificada sem pré-tratamento também apresentou aumento expressivo, com ignição cerca de 64% mais lenta que a testemunha. Considerando todas as madeiras densificadas, observou-se um acréscimo médio de 30%.

O tempo de chama, que indica a duração da combustão visível, também foi

superior nas modificações em comparação à testemunha (cerca de 31% de aumento). Este parâmetro é influenciado pela resistência térmica do material, além da densidade e estrutura interna, que condicionam a disponibilidade de oxigênio para sustentar a queima. Conforme descrito na literatura, madeiras com maior densidade tendem a apresentar combustão mais lenta.

Tabela 8. Inflamabilidade da madeira de *Pinus taeda* conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I).

TRATAMENTO	MASSA RESIDUAL (%)	TEMPO DE IGNIÇÃO (s)	TEMPO DE CHAMA (s)	TEMPO DE BRASA (s)	VERIFICAÇÃO
TESTEMUNHA	69,23 <sub>(±2,61)</sub> a	10,62 <sub>(±1,49)</sub> c	334,31 <sub>(±18,57)</sub> b	338,89 <sub>(±94,30)</sub> b	
DENSIFICADA	46,95 <sub>(±6,30)</sub> b	29,78 <sub>(±2,97)</sub> b	505,94 <sub>(±41,65)</sub> a	222,68 <sub>(±57,03)</sub> b	
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	47,84 <sub>(±8,38)</sub> b	42,34 <sub>(±4,44)</sub> a	552,04 <sub>(±60,65)</sub> a	621,2 <sub>(±69,70)</sub> a	
NaOH 10%-120m DENSIFICADA	42,46 <sub>(±12,37)</sub> b	46,75 <sub>(±7,32)</sub> a	493,39 <sub>(±55,57)</sub> a	547,1 <sub>(±161,99)</sub> a	
NaOH 15%-120m DENSIFICADA	52,94 <sub>(±7,53)</sub> b	41,31 <sub>(±4,57)</sub> a	483,45 <sub>(±38,80)</sub> a	630,73 <sub>(±129,40)</sub> a	
Coefficiente de variação (%)	15,57	13,43	9,60	23,20	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

A compreensão do comportamento térmico do material é essencial, sobretudo quando há intenção de utilizá-lo em componentes estruturais. O tempo de brasa sendo

período em que a madeira continua a queimar lentamente, sem presença de chama visível, tendo implicações diretas na segurança, uma vez que pode favorecer a reignição. Nesse contexto, observa-se que os corpos de prova submetidos à pré-hidrólise com NaOH apresentaram tempos de brasa superiores, com aumento superior a 160% em comparação à madeira densificada sem pré-hidrólise (controle). Esse resultado reforça a relevância da modificação térmica e química da madeira no aprimoramento de suas propriedades para fins estruturais.

A principal vantagem associada à madeira densificada é a menor perda de massa quando submetida ao fogo, o que indica maior preservação da integridade estrutural durante a exposição térmica. A densificação, ao dificultar a ignição, contribui para o aumento do tempo de resistência ao fogo, ampliando a margem de segurança em situações de incêndio (Figueroa; Moraes, 2021).

Conforme demonstrado na Tabela 8, a aparência dos corpos de prova após o ensaio de inflamabilidade evidenciou os efeitos do fogo, principalmente por meio da perda de massa. Os materiais menos densos apresentaram maior degradação, como observado na amostra testemunha, que exibiu carbonização intensa em praticamente toda a sua estrutura. Em contrapartida, as amostras mais densas apresentaram carbonização restrita às extremidades, indicando menor propagação interna da combustão.

Entretanto, é importante considerar que o aumento da densidade também impõe algumas limitações. Apesar da maior resistência à ignição, uma vez iniciado o processo de combustão, a madeira densificada tende a sustentar a chama por mais tempo e apresenta tempos prolongados de brasa. Esse comportamento pode representar um risco adicional, pois o material permanece em combustão lenta mesmo após o desaparecimento das chamas visíveis, elevando a possibilidade de reignição. Dessa forma, essas características devem ser consideradas na seleção de materiais para aplicações em que a resistência ao fogo seja um requisito crítico.

### **5.1.3 Propriedades mecânicas**

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios obtidos nos ensaios das propriedades mecânicas das amostras de madeira, tanto testemunhas quanto densificadas, considerando as diferentes pré-modificações aplicadas.

De modo geral, as modificações de densificação resultaram em melhorias

expressivas das propriedades mecânicas, em concordância com estudos anteriores que relacionam o aumento da densidade ao aprimoramento dessas características (Tabarsa; Chui, 1997; Morsing, 2000; Fang *et al.*, 2012b; Sandberg; Haller; Navi, 2012; Miftieva *et al.*, 2015). Esse comportamento pode ser atribuído ao fechamento dos lumens e ao achatamento das fibras, o que resulta em maior proporção de elementos da parede celular por unidade de volume, estruturas responsáveis pela resistência mecânica da madeira (Pertuzzatti *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2018).

Tabela 9. Propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* conforme a concentrações da solução de pré-tratamento alcalino com NaOH (Experimento I).

TRATAMENTO	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DUREZA JANKA (MPa)
TESTEMUNHA	53,30(±5,02) d	5,92(±1,47) b	44,18(±6,85) d
DENSIFICADA	115,90(±11,40) c	11,69(±1,93) a	60,14(±5,53) c
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	141,90(±10,61) b	13,46(±5,50) a	75,38(±12,07) b
NaOH 10%-120m DENSIFICADA	164,34(±32,31) a	15,34(±5,95) a	38,61(±5,97) d
NaOH 15%-120m DENSIFICADA	137,06(±28,17) b	14,43(±3,84) a	93,78(±7,09) a
Coefficiente de variação (%)	16,75	34,12	12,60

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

Os módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE) apresentaram incrementos significativos nas amostras densificadas, com destaque para o tratamento com NaOH a 10%, que registrou os maiores valores entre todos os grupos analisados. Houve aumento de 142% no MOR em relação à madeira densificada sem pré-tratamento e de 308% em relação à amostra de controle. Para o MOE, o aumento foi de 131% e 259%, respectivamente. No caso do MOR, as modificações com NaOH diferiram estatisticamente da amostra controle e da condição sem pré-tratamento. Para o MOE, todas as modificações densificadas apresentaram diferença significativa em relação à testemunha, embora não tenham diferido entre si.

O aumento da rigidez mecânica da madeira densificada decorre do rearranjo estrutural provocado pela compressão, que reduz espaços vazios e intensifica as interações entre fibras, resultando em maior resistência ao esforço mecânico (Pertuzzatti *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2018). Pelit, Budakçı e Sönmez (2018) apontam

que os valores de MOE aumentam proporcionalmente à taxa de compressão aplicada à madeira.

Durante o pré-tratamento com NaOH, ocorre a remoção gradual da hemicelulose, por meio de lixiviação em água aquecida. Por se tratar de um polímero solúvel, sua remoção gera formação de microporos, o que favorece a deformação do material durante a compressão e, por consequência, aumenta sua taxa de compactação (Navi, Parviz; Pizzi, 2015).

No que diz respeito à dureza Janka, os valores foram significativamente mais altos nas amostras densificadas, com destaque para o tratamento com 15% de NaOH, que apresentou aumento de 212% em relação à amostra controle e de 156% em relação à amostra densificada sem pré-tratamento. Por outro lado, a condição com 10% de NaOH apresentou o menor desempenho entre as modificações, com valores semelhantes aos da madeira não tratada. Ainda assim, as demais modificações com NaOH resultaram em aumentos significativos, evidenciando a influência positiva da pré-hidrólise sobre a resistência superficial da madeira.

Esse comportamento está alinhado ao descrito por Laine *et al.* (2016), segundo os quais a densificação contribui para o aumento da dureza ao reduzir a porosidade do material. Fang *et al.* (2012b) acrescentam que o fechamento dos vasos e lumens, além do achatamento das fibras durante o processo de compactação, intensifica esse efeito. Estudos de Rautkari *et al.* (2010a), Laskowska (2017) e Pertuzzatti *et al.* (2018) também relatam incrementos superiores a 100% na dureza Janka em madeiras densificadas, corroborando os resultados obtidos neste trabalho.

## 5.2 EXPERIMENTO II

### 5.2.1 Análise da composição química

Neste experimento foram analisadas amostras de madeira de pinus nas seguintes condições: testemunha (sem tratamento), densificada (controle) e submetida à pré-hidrólise alcalina com solução aquosa contendo 5% (m/m) de hidróxido de sódio (NaOH), em relação à massa seca da madeira. O tempo de ebulição variou entre 30, 60, 120 e 240 minutos. Após o tratamento, as amostras foram imersas em água potável para a remoção do excesso superficial do reagente.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da composição química das

amostras. Os valores de extrativos totais foram inferiores nas amostras submetidas ao pré-tratamento em comparação à testemunha e à madeira densificada sem pré-hidrólise. Os teores de lignina foram mais elevados nas amostras pré-tratadas quando comparados à madeira testemunha, embora não tenham diferido estatisticamente da condição densificada sem pré-tratamento. Os valores de holocelulose, por sua vez, foram inferiores aos da amostra testemunha, mas estatisticamente semelhantes aos observados na madeira densificada.

Tabela 10. Composição química estrutural da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II).

TRATAMENTO	Extrativos totais (%)	Ligninas totais (%)	Holocelulose (%)
TESTEMUNHA	2,67 <sub>(±0,06)</sub> a	24,27 <sub>(±0,42)</sub> b	73,06 <sub>(±0,41)</sub> a
DENSIFICADA	2,52 <sub>(±0,05)</sub> b	24,95 <sub>(±0,46)</sub> ab	72,54 <sub>(±0,42)</sub> ab
NaOH 5%-30m DENSIFICADA	2,37 <sub>(±0,09)</sub> c	25,74 <sub>(±0,62)</sub> a	71,88 <sub>(±0,57)</sub> b
NaOH 5%-60m DENSIFICADA	2,33 <sub>(±0,04)</sub> c	25,43 <sub>(±0,42)</sub> a	72,23 <sub>(±0,43)</sub> b
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	2,34 <sub>(±0,06)</sub> c	25,40 <sub>(±0,42)</sub> a	72,26 <sub>(±0,47)</sub> b
NaOH 5%-240m DENSIFICADA	2,39 <sub>(±0,06)</sub> c	25,53 <sub>(±0,33)</sub> a	72,07 <sub>(±0,33)</sub> b
Coefficiente de variação (%)	2,57	1,80	0,61

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

Os dados evidenciam que o pré-tratamento com NaOH a 5% provocou alterações mensuráveis na composição química da madeira, particularmente em relação à extração de extrativos e hemiceluloses. Contudo, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tempos de tratamento avaliados (30 a 240 minutos), indicando que a remoção dessas frações ocorre de maneira semelhante mesmo nos tempos mais curtos. A ausência de variação significativa sugere que o tempo mínimo de 30 minutos é suficiente para a remoção dos compostos solúveis neste tipo de tratamento.

Por outro lado, o teor de lignina não apresentou redução com o uso de NaOH a 5%, o que indica que essa concentração não promove deslignificação em nível detectável nas condições aplicadas. Este resultado difere do observado por Silva (2019), que, ao estudar *Pinus elliottii*, relatou valores de 32,8% para lignina e 61,4%

para holocelulose, utilizando a mesma concentração de NaOH, o que aponta para diferenças entre espécies ou condições experimentais.

Segundo Santos (2008) a composição química da madeira interfere diretamente em suas propriedades físicas. Enquanto a lignina contribui para a rigidez e resistência, a holocelulose está mais relacionada à flexibilidade e à capacidade de absorção de umidade. Tais relações tornam-se ainda mais evidentes quando a madeira é submetida a modificações como a densificação e a pré-hidrólise, pois há uma reorganização estrutural dos constituintes químicos que influencia diretamente o comportamento do material.

### 5.2.2 Propriedades físicas







Na Tabela 11 são apresentados os resultados da análise colorimétrica no sistema CIELab, realizada para diferentes condições da madeira de *Pinus*: testemunha (sem tratamento), densificada (controle) e densificada com pré-hidrólise alcalina. Os parâmetros colorimétricos foram analisados em função do tempo de tratamento (30, 60, 120 e 240 minutos). As alterações observadas indicam que o pré-tratamento provocou mudanças relevantes nas características visuais da madeira.

Observou-se diferença estatisticamente significativa nos valores de L\* (luminosidade) e a\* (verde-vermelho) entre as amostras densificadas com pré-tratamento e a madeira testemunha. Durante o tratamento térmico, ocorre a degradação das hemiceluloses, o que provoca diminuição nos índices de luminosidade, esse processo também contribui para o aumento relativo da lignina e promove modificações na composição química da madeira (Huang *et al.* 2012).

Durante a pré-hidrólise, ocorrem transformações nos compostos lignocelulósicos que afetam diretamente a cor do material. A lignina sofre reações de condensação e degradação, promovendo a formação de grupos cromóforos, como cetonas de Hibbert, quinonas e derivados metoxilados, que contribuem para o escurecimento do material, conforme discutido por Wang *et al.* (2020). Esse comportamento é evidenciado pelos valores de  $\Delta E$  apresentados na Tabela 11.

Embora o tempo de tratamento não tenha demonstrado relação linear com a variação de cor ( $\Delta E$ ), todas as modificações com pré-hidrólise alcalina resultaram em alterações estatisticamente significativas na coloração da madeira, o que reforça a influência desse processo sobre as propriedades visuais.

Tabela 11. Colorimetria da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II).

TRATAMENTO	L*	a*	b*	C*	h*	ΔE	COR OBSERVADA
TESTEMUNHA	73,91(±2,42) a	7,71(±2,09) bc	25,37(±3,11) a	26,54(±3,54) a	73,40(±2,69) ab	-	
DENSIFICADA	75,44(±3,09) a	7,54(±2,05) c	25,79(±2,41) a	26,91(±2,82) a	73,98(±3,27) ab	1,59	
NaOH 5%-30m DENSIFICADA	60,11(±11,48) bc	8,46(±2,08) abc	25,88(±3,46) a	27,34(±3,17) a	71,65(±5,54) abc	13,84	
NaOH 5%-60m DENSIFICADA	66,35(±3,87) b	6,88(±1,49) c	26,12(±3,17) a	27,04(±3,30) a	75,30(±2,57) a	7,64	
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	51,65(±8,82) d	9,65(±0,97) a	24,75(±4,00) a	26,65(±3,52) a	68,16(±4,66) c	22,36	
NaOH 5%-240m DENSIFICADA	53,69(±7,67) cd	9,52(±1,27) ab	26,65(±3,79) a	28,37(±3,43) a	69,97(±4,36) bc	20,35	
Coefficiente de variação (%)	11,11	20,66	13,05	12,18	5,55		

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

Em que: L\* = luminosidade; a\* = verde-vermelho; b\* = azul-amarelo; C\* = saturação de cor; h\* = ângulo de matiz e ΔE = variação total de cor.

De acordo com Hidayat *et al.* (2017), madeiras com tonalidades mais escuras têm sido preferidas pelo mercado em razão do seu valor estético e da associação com atributos de qualidade. Essa percepção está relacionada à valorização comercial do material, conforme indicado por Ramanantoandro *et al.* (2013) e Wan *et al.* (2021), os quais ressaltam a influência da aparência na aceitação e no preço final do produto.

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios das propriedades físicas da madeira analisadas. Observa-se que a compactação da madeira foi maior nas amostras submetidas à pré-hidrólise, especialmente no tratamento de 240 minutos, sugerindo que o tempo de exposição ao reagente influencia diretamente na compressibilidade da madeira.

Tabela 12. Taxa de compactação e propriedades físicas da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II).

TRATAMENTO	TC	DA	DB	UEH
TESTEMUNHA	-	0,45 <sub>(±0,02)</sub> c	0,38 <sub>(±0,01)</sub> b	12,80 <sub>(±0,32)</sub> a
DENSIFICADA	1,34 <sub>(±0,16)</sub> b	0,86 <sub>(±0,09)</sub> bc	0,47 <sub>(±0,10)</sub> ab	6,54 <sub>(±0,79)</sub> d
NaOH 5%-30m DENSIFICADA	1,31 <sub>(±0,20)</sub> b	0,90 <sub>(±0,09)</sub> abc	0,43 <sub>(±0,05)</sub> b	8,67 <sub>(±0,85)</sub> bc
NaOH 5%-60m DENSIFICADA	1,32 <sub>(±0,19)</sub> b	0,80 <sub>(±0,09)</sub> c	0,39 <sub>(±0,04)</sub> b	9,40 <sub>(±1,15)</sub> b
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	1,42 <sub>(±0,19)</sub> b	0,98 <sub>(±0,11)</sub> a	0,56 <sub>(±0,14)</sub> a	8,11 <sub>(±0,48)</sub> c
NaOH 5%-240m DENSIFICADA	1,67 <sub>(±0,32)</sub> a	0,95 <sub>(±0,14)</sub> ab	0,58 <sub>(±0,16)</sub> a	6,84 <sub>(±0,48)</sub> d
Coeficiente de variação (%)	15,52	11,77	21,67	8,42

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%. Em que: TC (Taxa de Compactação); DB (Densidade Básica - g.cm<sup>-3</sup>); DA (Densidade Aparente - g.cm<sup>-3</sup>); UEH (Umidade de Equilíbrio Higroscópico - %).

Segundo Lima (1981), a realização do processo de pré-hidrólise favorece a lixiviação de constituintes da madeira, o que gera espaços internos na estrutura do material. Esse efeito, ao promover maior porosidade, contribui para a eficiência do processo de densificação, como observado por Silva (2019), que relaciona essa etapa preparatória à melhora das propriedades mecânicas da madeira densificada.

Observou-se um aumento na taxa de compactação, embora esse crescimento não tenha apresentado comportamento linear em relação à densidade aparente. A densificação, mesmo quando realizada sem o pré-tratamento alcalino, resultou em elevação significativa da densidade das amostras. Isso reforça o impacto do

processamento termomecânico na modificação da estrutura do material, especialmente na redução da umidade de equilíbrio higroscópico em comparação com a amostra de referência.

As madeiras submetidas à pré-hidrólise alcalina (5%<sub>o/m/m</sub>) por 120 minutos apresentaram o maior valor de densidade aparente (0,98 g/cm<sup>3</sup>), seguidas pelas amostras tratadas por 240 minutos (0,95 g/cm<sup>3</sup>). Esses resultados demonstram que o pré-tratamento, aliado ao processamento termomecânico, favorece a compactação do material. Em contraste, as amostras densificadas sem o pré-tratamento apresentaram densidade de 0,86 g/cm<sup>3</sup>, um valor ligeiramente inferior, embora estatisticamente próximo aos demais.

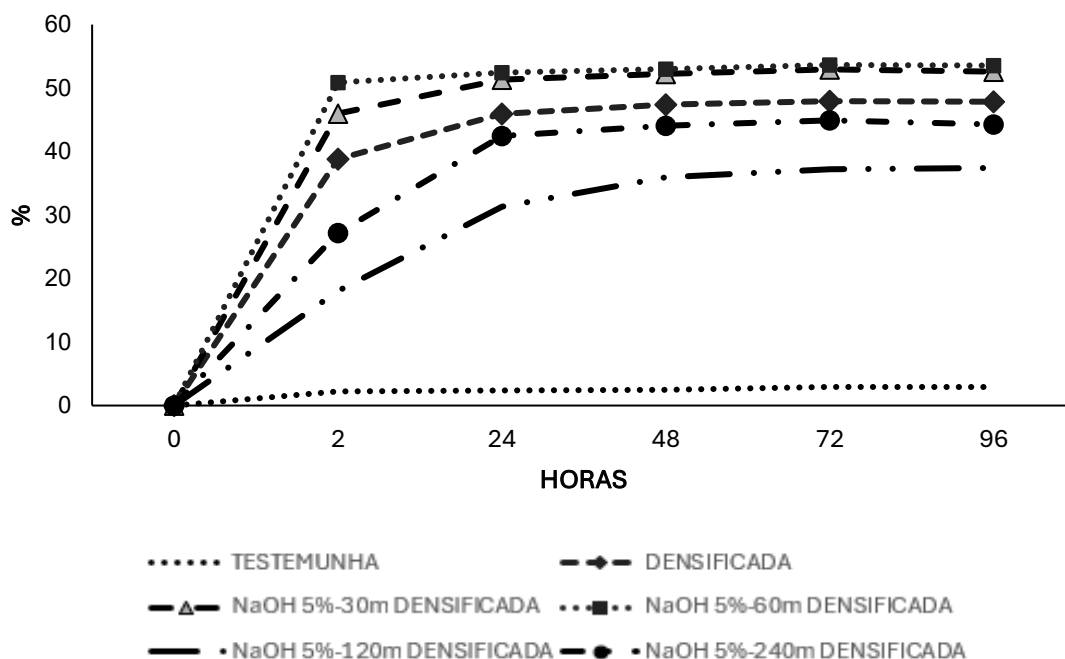
A literatura destaca que madeiras com densidade mais elevada tendem a apresentar maior resistência mecânica, sendo mais adequadas para usos que demandam durabilidade, como em estruturas, móveis e revestimentos (Welzbacher *et al.*, 2008; Dubey, 2010; Pelit; Sönmez; Budakçı, 2014; Bal, 2015; Bekhta *et al.*, 2016). Além disso, a menor umidade de equilíbrio contribui para a estabilidade dimensional, uma vez que reduz a suscetibilidade a variações de volume causadas por mudanças na umidade relativa do ambiente.

Durante o tratamento termomecânico, a alta temperatura aplicada pelos pratos da prensa provoca o selamento parcial da superfície da madeira, o que diminui sua porosidade e capacidade de absorção de água (Hill, 2007). Esse selamento limita a troca de umidade com o meio, conferindo maior estabilidade ao material.

Contudo, nas amostras submetidas à combinação entre pré-hidrólise alcalina e densificação, observou-se aumento na umidade de equilíbrio higroscópico em relação às amostras densificadas sem tratamento químico. Esse resultado é atribuído à degradação das hemiceluloses durante a pré-hidrólise, o que altera a composição da matriz da madeira (Akgül; Gümüşkaya; Korkut, 2007; Akyildiz; Ateş, 2008).

A Figura 11 ilustra o comportamento do inchamento em espessura das amostras após imersão prolongada em água, contemplando as diferentes condições de tratamento. Os dados evidenciam a influência do tempo de pré-hidrólise sobre a estabilidade dimensional, permitindo observar o fenômeno de recuperação parcial da espessura original, conhecido como *springback*.

Figura 11. Inchamento em espessura após a imersão prolongada em água da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II).



Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras densificadas apresentaram maior percentual de inchamento em espessura ao longo do tempo de imersão, com valores superiores aos da amostra testemunha nas primeiras duas horas. Entre as modificações avaliadas, o que envolveu a pré-hidrólise com solução de NaOH a 5% (m/m) por 120 minutos apresentou o menor índice de inchamento entre os densificados, embora esse valor ainda tenha sido aproximadamente oito vezes maior que o da amostra não tratada sob a mesma condição.

Ao se considerar apenas os materiais submetidos à densificação, verificou-se que os tempos de pré-hidrólise iguais ou superiores a 120 minutos contribuíram para a redução do inchamento, quando comparados às amostras que não passaram por esse pré-tratamento. Esses dados indicam que o tempo de exposição à solução alcalina exerce influência sobre as propriedades dimensionais do material, possivelmente por promover alívio das tensões internas acumuladas durante o processamento termomecânico.

A atuação do pré-tratamento alcalino na estrutura da madeira está relacionada a alterações químicas e físicas que afetam diretamente a matriz lignocelulósica. Segundo Kim, Lee e Kim (2016), com o prolongamento do tempo dedicado à pré-hidrólise, intensifica-se a solubilização das hemiceluloses e a remoção parcial dos

extrativos da madeira, o que leva à maior exposição da lignina e desencadeia alterações na estrutura interna do material, com reflexos diretos na estabilidade dimensional.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados da análise de inflamabilidade, com o objetivo de examinar o comportamento do material frente à exposição ao fogo. A combustão da madeira envolve a degradação de seus principais constituintes – celulose, hemicelulose e lignina – processo que resulta na liberação de vapores e gases, além da formação de resíduos sólidos, como cinzas. A compreensão dessas reações é importante para avaliar o desempenho da madeira em aplicações que envolvam exposição a fontes de calor.







A partir da análise da perda de massa, observou-se que as amostras densificadas, em geral, se diferenciaram estatisticamente da testemunha. No entanto, o tratamento com pré-hidrólise alcalina a 5% (m/m) por 240 minutos não apresentou diferença estatística em relação à amostra não tratada, embora sua perda de massa tenha sido cerca de 18% inferior.

O tempo de ignição das amostras seguiu a tendência de que madeiras densificadas demandam um intervalo maior para iniciar a combustão. Observou-se que o pré-tratamento alcalino com solução de NaOH resultou em diferença estatística significativa em relação tanto à madeira densificada sem pré-tratamento quanto à amostra testemunha. A comparação entre a testemunha e as modificações com pré-hidrólise alcalina indicou aumentos superiores a 72% no tempo de ignição, enquanto a diferença entre a testemunha e a madeira densificada foi de 64,34%. Esses dados reforçam que materiais com menor densidade são mais suscetíveis à ignição.

Como consequência, madeiras com maior densidade apresentaram tempos de chama mais prolongados, comportamento esperado de materiais que queimam mais lentamente. Os tratamentos termodensificados apresentaram aumentos que variaram entre 135% (NaOH 5% m/m por 60 minutos) e 165% (NaOH 5% m/m por 240 minutos) no tempo de chama, em comparação à amostra não tratada.

No que se refere ao tempo de brasa, os valores registrados nas amostras submetidas à pré-hidrólise alcalina também superaram expressivamente os da testemunha. Os acréscimos observados foram de 148% (NaOH 5% m/m por 30 minutos), 158% (60 minutos), 183% (120 minutos) e 130% (240 minutos), evidenciando o comportamento típico de materiais com maior densidade.

Tabela 13. Inflamabilidade da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II).

TRATAMENTO	MASSA RESIDUAL (%)	TEMPO DE IGNIÇÃO (s)	TEMPO DE CHAMA (s)	TEMPO DE BRASA (s)	VERIFICAÇÃO
TESTEMUNHA	69,23 ( $\pm 2,61$ ) a	10,62 ( $\pm 1,49$ ) c	334,31 ( $\pm 18,57$ ) c	338,89 ( $\pm 94,30$ ) cd	
DENSIFICADA	46,95 ( $\pm 6,30$ ) bc	29,78 ( $\pm 2,97$ ) b	505,94 ( $\pm 41,65$ ) ab	222,68 ( $\pm 57,03$ ) d	
NaOH 5%-30m DENSIFICADA	36,76 ( $\pm 9,25$ ) c	42,82 ( $\pm 2,05$ ) a	486,92 ( $\pm 53,27$ ) ab	502,08 ( $\pm 96,78$ ) abc	
NaOH 5%-60m DENSIFICADA	43,35 ( $\pm 12,89$ ) c	39,07 ( $\pm 5,04$ ) a	452,11 ( $\pm 43,56$ ) b	536,58 ( $\pm 161,25$ ) ab	
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	47,84 ( $\pm 8,38$ ) bc	42,34 ( $\pm 4,44$ ) a	552,04 ( $\pm 60,65$ ) a	621,20 ( $\pm 69,70$ ) a	
NaOH 5%-240m DENSIFICADA	58,64 ( $\pm 5,36$ ) ab	45,10 ( $\pm 4,90$ ) a	543,30 ( $\pm 38,39$ ) a	440,15 ( $\pm 105,63$ ) bc	
Coefficiente de variação (%)	16,12	10,73	9,32	23,20	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

Com base nas imagens apresentadas na Tabela 13, verificou-se que o tratamento com NaOH 5%<sub>m/m</sub> por 30 minutos resultou na menor perda de massa, indicando melhor preservação da integridade do material sob as condições avaliadas. Em contraste, o tratamento com NaOH 5%<sub>m/m</sub> por 240 minutos apresentou desempenho semelhante ao da amostra testemunha, sem diferença estatística entre

ambos, sendo esses os piores resultados obtidos nesse parâmetro do ensaio.

### 5.2.3 Propriedades mecânicas

A resistência mecânica da madeira reflete diretamente suas características de usabilidade e durabilidade. Na Tabela 14, estão apresentados os valores médios obtidos nos ensaios mecânicos do material, com base nos diferentes tempos de pré-tratamento alcalino.

Os módulos de ruptura e de elasticidade das madeiras densificadas demonstraram melhorias significativas em comparação à amostra testemunha, indicando a eficácia do processo de densificação na modificação das propriedades mecânicas do material. Entre as modificações avaliadas, o pré-tratamento com NaOH na concentração de 5% m/m por 240 minutos se destacou como o mais eficiente.

Tabela 14. Resistência mecânica da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento alcalino a 5% NaOH por diferentes tempos. (Experimento II).

TRATAMENTO	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DUREZA JANKA (MPa)
TESTEMUNHA	53,30 ( $\pm 5,02$ ) c	5,92 ( $\pm 1,47$ ) b	44,18 ( $\pm 6,85$ ) e
DENSIFICADA	115,90 ( $\pm 11,40$ ) b	11,69 ( $\pm 1,93$ ) a	60,14 ( $\pm 5,53$ ) bc
NaOH 5%-30m DENSIFICADA	115,88 ( $\pm 26,55$ ) b	12,65 ( $\pm 3,06$ ) a	49,70 ( $\pm 2,60$ ) de
NaOH 5%-60m DENSIFICADA	138,66 ( $\pm 23,02$ ) a	11,34 ( $\pm 2,60$ ) a	58,16 ( $\pm 4,77$ ) cd
NaOH 5%-120m DENSIFICADA	141,90 ( $\pm 10,61$ ) a	13,46 ( $\pm 5,50$ ) a	75,38 ( $\pm 12,07$ ) a
NaOH 5%-240m DENSIFICADA	143,07 ( $\pm 30,84$ ) a	13,72 ( $\pm 4,31$ ) a	67,71 ( $\pm 14,52$ ) ab
Coefficiente de variação (%)	17,12	29,97	14,85

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

Em relação ao módulo de ruptura, o tratamento com NaOH 5% m/m por 240 minutos proporcionou um aumento de 268% em comparação à amostra testemunha e de 123% em relação à amostra densificada sem pré-hidrólise, indicando maior resistência à flexão. Quanto ao módulo de elasticidade (MOE), o mesmo tratamento resultou em um acréscimo de 232% em comparação à testemunha e de 117% frente

à amostra controle, evidenciando incremento na rigidez e na capacidade de resistência à deformação elástica.

Esses ganhos podem ser associados à densificação, que promove maior compactação das fibras, redução da porosidade e maior homogeneidade na estrutura interna da madeira. Tais alterações contribuem para o aumento da estabilidade dimensional e para o aprimoramento do desempenho mecânico do material em aplicações estruturais (Pelit; Budakçı; Sönmez, 2018; Pertuzzatti *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2018).

O tratamento alcalino com NaOH por 120 minutos mostra-se, portanto, uma alternativa viável para o aprimoramento das propriedades mecânicas da madeira de pinus, favorecendo seu uso em contextos que requerem maior exigência estrutural. Segundo Pelit, Budakçı e Sönmez (2018), a elevação dos valores de MOE está relacionada ao aumento da taxa de compressão. A hemicelulose, por sua vez, é um dos primeiros componentes removidos da matriz lignocelulósica quando em contato com água aquecida, processo que resulta na formação de microporos (Navi, Parviz; Pizzi, 2015).

A presença desses microporos favorece a redistribuição interna das forças durante a compressão, elevando a eficiência do processo e reduzindo a resistência inicial da madeira (Yin *et al.*, 2017; Wang *et al.* 2023). Song *et al.* (2018) também apontam que as alterações estruturais causadas pela remoção da hemicelulose e posterior compactação contribuem diretamente para o aumento da densidade da madeira, refletindo em melhorias nas propriedades de MOR e MOE.

Dentro desse cenário, a etapa de remoção parcial das hemiceluloses no processamento da madeira é fundamental para melhorar o desempenho estrutural do material (Pertuzzatti *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2018).

No que se refere à dureza Janka, as modificações com densificação também resultaram em aumentos expressivos em relação à amostra testemunha. O destaque foi o tratamento com NaOH 5% *m/m* por 120 minutos, que apresentou incremento de 171%. Em contrapartida, o tratamento de 30 minutos apresentou os menores valores entre as amostras densificadas, sendo estatisticamente semelhante à testemunha.

Essas variações reforçam a influência do tempo de pré-hidrólise alcalina no desempenho final da madeira densificada, indicando que tempos insuficientes podem limitar os benefícios do tratamento químico e reduzir a eficiência do processo

termomecânico.

Nesse sentido, torna-se necessário ajustar parâmetros, visando minimizar o tempo de processamento, e o consumo de reagentes, sem comprometer as propriedades pretendidas para a aplicação final do material.

Laine *et al.* (2016) associam o aumento da dureza à diminuição da porosidade resultante da densificação. Fang *et al.* (2012b) acrescentam que o fechamento dos vasos condutores, lumens e o achatamento das fibras durante a compressão contribuem diretamente para esse comportamento. A dureza da madeira densificada está, portanto, relacionada à taxa de compressão aplicada, sendo que os materiais tratados apresentaram valores superiores a 100% quando comparados às amostras não densificadas, demonstrando o êxito da técnica no aprimoramento das propriedades mecânicas (Fang *et al.*, 2012b; Rautkari *et al.* 2010a; Laskowska, 2017; Pertuzzatti *et al.*, 2018).

### 5.3 EXPERIMENTO III

#### 5.3.1 Análise da composição química

Foram avaliadas a madeira de pinus sem modificação (testemunha), a madeira densificada (controle), e amostras submetidas à pré-hidrólise por diferentes métodos: auto-hidrólise (água potável em ebulição por 120 minutos), organossolve (solução 50% v/v de etanol e 50% v/v de água em ebulição por 120 minutos) e tratamento alcalino (solução aquosa de NaOH a 5% m/m, também em ebulição por 120 minutos, seguida de imersão em água potável para remoção do excesso superficial do reagente). Os valores médios de extrativos totais, lignina e holocelulose dessas amostras estão apresentados na Tabela 15.

Os resultados demonstraram diferenças estatísticas entre as modificações no que se refere ao teor de extrativos. O tratamento organossolve apresentou a maior redução em relação à amostra testemunha, com aproximadamente 20% a menos. As modificações auto-hidrólise e alcalino também promoveram reduções expressivas, com valores próximos a 15% inferiores ao da testemunha.

Tabela 15. Composição química estrutural da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento (Experimento III).

TRATAMENTO	Extrativos totais (%)	Ligninas totais (%)	Holocelulose (%)
TESTEMUNHA	2,67 ( $\pm 0,06$ ) a	24,27 ( $\pm 0,42$ ) b	73,06 ( $\pm 0,41$ ) a
DENSIFICADA	2,52 ( $\pm 0,05$ ) b	24,95 ( $\pm 0,46$ ) ab	72,54 ( $\pm 0,42$ ) ab
AUTO-HIDRÓLISE - DENSIFICADA	2,33 ( $\pm 0,05$ ) c	25,21 ( $\pm 0,48$ ) a	72,46 ( $\pm 0,52$ ) ab
ORGANOSSOLVE - DENSIFICADA	2,23 ( $\pm 0,05$ ) d	25,46 ( $\pm 0,51$ ) a	72,31 ( $\pm 0,49$ ) ab
ALCALINA - DENSIFICADA	2,33 ( $\pm 0,06$ ) c	25,40 ( $\pm 0,42$ ) a	72,26 ( $\pm 0,47$ ) b
Coefficiente de variação (%)	2,34	1,84	0,64

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

Quanto ao teor de lignina, observou-se aumento nas amostras submetidas à pré-hidrólise. Em média, os acréscimos foram da ordem de 4% quando comparados à madeira sem tratamento, sugerindo modificação estrutural da matriz lignocelulósica. Tais alterações na madeira indicam que os diferentes métodos de pré-hidrólise, incluindo exposição à água, soluções alcoólicas e alcalinas, a tornam mais receptiva a modificações subsequentes (Siqueira *et al.* (2017); Tian *et al.* (2017).

A holocelulose apresentou redução nas três modificações, com valores médios de -0,83% (auto-hidrólise), -1,04% (organossolve) e -1,11% (alcalino), evidenciando que houve degradação dessa fração da madeira. Essa perda está associada, sobretudo, à remoção das hemiceluloses, componentes estruturais mais suscetíveis à degradação por possuírem cadeias mais curtas, menor grau de organização cristalina e estrutura amorfa. As hemiceluloses encontram-se ligadas tanto à celulose quanto à lignina, compondo a rede estrutural da madeira.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que as modificações promovidas pela pré-hidrólise, independentemente da metodologia empregada, favorecem a lixiviação de compostos específicos da matriz lignocelulósica, como extrativos e hemiceluloses, conforme apontado por Silva (2019). Essa remoção contribui para o aumento da porosidade da madeira, o que, por sua vez, potencializa

a eficiência do processo de densificação termomecânica.

Santos (2008) também aponta que a lixiviação desses constituintes influencia diretamente a densidade do material, repercutindo de forma favorável sobre as propriedades estruturais da madeira.

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os dados apresentados por Silva (2019) para *Pinus elliottii*, notam-se diferenças consideráveis. Os valores relatados pelo autor foram superiores: extrativos (testemunha: 3,8%; auto-hidrólise: 9,1%; organossolve: 9,4%; alcalino: 8,3%), ligninas (testemunha: 28,1%; auto-hidrólise: 34,5%; organossolve: 32,1%; alcalino: 34,5%) e holoceluloses (testemunha: 68,1%; auto-hidrólise: 56,4%; organossolve: 58,5%; alcalino: 57,2%). Essa comparação ressalta que os resultados variam conforme a espécie de conífera utilizada, não sendo apropriado generalizar os dados para diferentes tipos de *Pinus*. Esses achados estão em consonância com os dados de Lima (1981), que já indicava a eficiência da pré-hidrólise na remoção de polissacarídeos da matriz da madeira.

Neste estudo, a principal modificação foi observada na fração de holocelulose, associada à remoção de hemiceluloses. Essa alteração provocou a formação de espaços na estrutura da madeira, o que facilitou a redistribuição das tensões internas durante o processo de compressão. Como consequência, houve maior eficiência na densificação e redução da resistência inicial do material. Essas mudanças influenciam diretamente as propriedades físico-mecânicas da madeira, conforme discutido por Carvalho *et al.* (2015), Silva Moraes; Sansígolo; Oliveira Neto (2016), Yin *et al.* (2017), Santos *et al.* (2018) e (Wang *et al.* (2023).

### **5.3.2 Propriedades físicas**

Na Tabela 16 são apresentados os resultados da análise colorimétrica no sistema CIELab para amostras de madeira de *P. taeda*, considerando tanto os corpos de prova testemunhas quanto aqueles submetidos ao processo de densificação, de acordo com as diferentes pré-modificações aplicadas. Observou-se diferença estatisticamente significativa nas coordenadas L\* (luminosidade) e a\* (verde-vermelho) nas amostras avaliadas.

As médias obtidas para cada tratamento possibilitam analisar as alterações na coloração da madeira conforme a solução empregada durante a pré-tratamento. A tabela inclui a coloração observada em cada tratamento representativo e a média dos






índices para cada grupo experimental, permitindo a análise comparativa entre as modificações.

O tratamento alcalino destacou-se por provocar maior alteração na coloração da madeira. Houve uma redução de 43,10% na luminosidade ( $L^*$ ) em relação à testemunha, além de um aumento de 20,10% na coordenada  $a^*$ , indicando maior tendência à tonalidade vermelha. Por outro lado, a auto-hidrólise resultou em leve aumento da luminosidade e deslocamento da cor em direção ao verde, evidenciado pela redução no valor de  $a^*$ .

Essas variações demonstram que o pré-tratamento químico influencia diretamente na aparência superficial da madeira densificada. O tratamento alcalino promove escurecimento e realce de tons avermelhados, enquanto a auto-hidrólise mantém maior luminosidade e favorece coloração levemente esverdeada.

Associando-se os valores de  $\Delta E$  obtidos na análise colorimétrica aos resultados da caracterização química da madeira e aos dados da literatura, observa-se que a pré-hidrólise alcalina expõe a lignina com maior intensidade em comparação ao material *in natura*. A coloração mais escura observada nas amostras tratadas, expressa pela redução da luminosidade ( $L^*$ ), está relacionada à degradação das hemiceluloses durante o aquecimento, o que deixa a lignina mais exposta (Werner; Pommer; Broström, 2014; Shen *et al.*, 2015; Wang, Jiawei *et al.*, 2021). Essa mudança resulta em maior teor relativo de lignina, cuja estrutura apresenta maior estabilidade térmica (Huang *et al.* 2012; Bekhta; Proszkyk; Krystofiak, 2014; Cruz *et al.*, 2018). Além disso, estudos mostram que modificações térmicas associados a soluções químicas, como  $H_2SO_4$  e NaOH, promovem mudanças estruturais na lignina, o que também altera significativamente a coloração da madeira (Shi *et al.*, 2018).

Tabela 16. Colorimetria da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento (Experimento III).

TRATAMENTO	L*	a*	b*	C*	h*	ΔE	COR OBSERVADA
TESTEMUNHA	73,91 (±2,42) ab	7,71 (±2,09) b	25,37 (±3,11) a	26,54 (±3,54) a	73,40 (±2,69) a	-	
DENSIFICADA	75,44 (±3,09) a	7,54 (±2,05) bc	25,79 (±2,41) a	26,91 (±2,82) a	73,98 (±3,27) a	1,59	
AUTO-HIDRÓLISE - DENSIFICADA	76,29 (±3,08) a	5,95 (±1,52) c	24,12 (±1,59) a	24,87 (±1,88) a	76,31 (±2,73) a	3,21	
ORGANOSSOLVE - DENSIFICADA	68,98 (±5,00) b	7,91 (±1,54) b	26,10 (±1,39) a	27,29 (±1,72) a	73,27 (±2,48) a	4,99	
ALCALINA - DENSIFICADA	51,65 (±8,82) c	9,65 (±0,97) a	24,76 (±4,00) a	26,65 (±3,52) a	68,16 (±4,66) b	22,36	
Coefficiente de variação (%)	7,29	21,72	10,63	10,61	4,47		

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

Em que: L\* = luminosidade; a\* = verde-vermelho; b\* = azul-amarelo; C\* = saturação de cor; h\* = ângulo de matiz e ΔE = variação total de cor.

No caso das amostras submetidas à auto-hidrólise e ao tratamento organossolve, a análise dos valores de  $a^*$  sugere uma tonalidade mais acastanhada, indicativa de maior remoção de extrativos, especialmente compostos fenólicos (Gierlinger *et al.*, 2004; Moya *et al.*, 2012). Os valores positivos de  $b^*$  indicam tendência ao amarelecimento da madeira, reflexo das características fotoquímicas dos componentes básicos da parede celular (Pelit, 2016; Moya *et al.*, 2012).

Considerando os parâmetros colorimétricos e a classificação proposta por critérios de variação de  $\Delta E$ , as alterações observadas podem ser descritas da seguinte forma: a madeira densificada apresenta variação notável em relação à testemunha; as modificações com auto-hidrólise e organossolve resultaram em alterações apreciáveis; e o tratamento alcalino ocasionou mudança muito apreciável.

Na Tabela 17 são apresentados as médias das propriedades físicas tanto das amostras submetidas a tratamento quanto a da testemunha. As modificações decorrentes pela organossolve foram responsáveis pela maior compactação observada. As modificações com auto-hidrólise e solução alcalina proporcionaram aumentos de 6%.

Tabela 17. Taxa de compactação e propriedades físicas da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento (Experimento III).

TRATAMENTO	TC	DA	DB	UEH
TESTEMUNHA	-	0,45 ( $\pm 0,02$ ) c	0,38 ( $\pm 0,01$ ) c	12,80 ( $\pm 0,32$ ) a
DENSIFICADA	1,34 ( $\pm 0,16$ ) b	0,86 ( $\pm 0,09$ ) b	0,47 ( $\pm 0,10$ ) bc	6,54 ( $\pm 0,79$ ) c
AUTO-HIDRÓLISE - DENSIFICADA	1,42 ( $\pm 0,14$ ) b	0,94 ( $\pm 0,09$ ) ab	0,50 ( $\pm 0,09$ ) ab	4,70 ( $\pm 1,05$ ) d
ORGANOSSOLVE - DENSIFICADA	1,59 ( $\pm 0,15$ ) a	1,03 ( $\pm 0,14$ ) a	0,58 ( $\pm 0,14$ ) a	5,32 ( $\pm 1,20$ ) d
ALCALINA - DENSIFICADA	1,42 ( $\pm 0,19$ ) b	0,98 ( $\pm 0,11$ ) a	0,56 ( $\pm 0,14$ ) a	8,11 ( $\pm 0,48$ ) b
Coefficiente de variação (%)	11,08	11,55	21,75	11,17

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%. Em que: TC (Taxa de Compactação); DB (Densidade Básica -  $\text{g.cm}^{-3}$ ); DA (Densidade Aparente -  $\text{g.cm}^{-3}$ ); UEH (Umidade de Equilíbrio Higroscópico - %);

Essa tendência também se reflete na densidade aparente, a compactação do material promoveu maior rearranjo das estruturas internas, elevando a densidade aparente. A densidade básica e a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) também variaram conforme o tipo de tratamento, sendo que os menores valores de UEH foram registrados nas modificações auto-hidrólise e organossolve, o que sugere redução da higroscopicidade desses materiais.

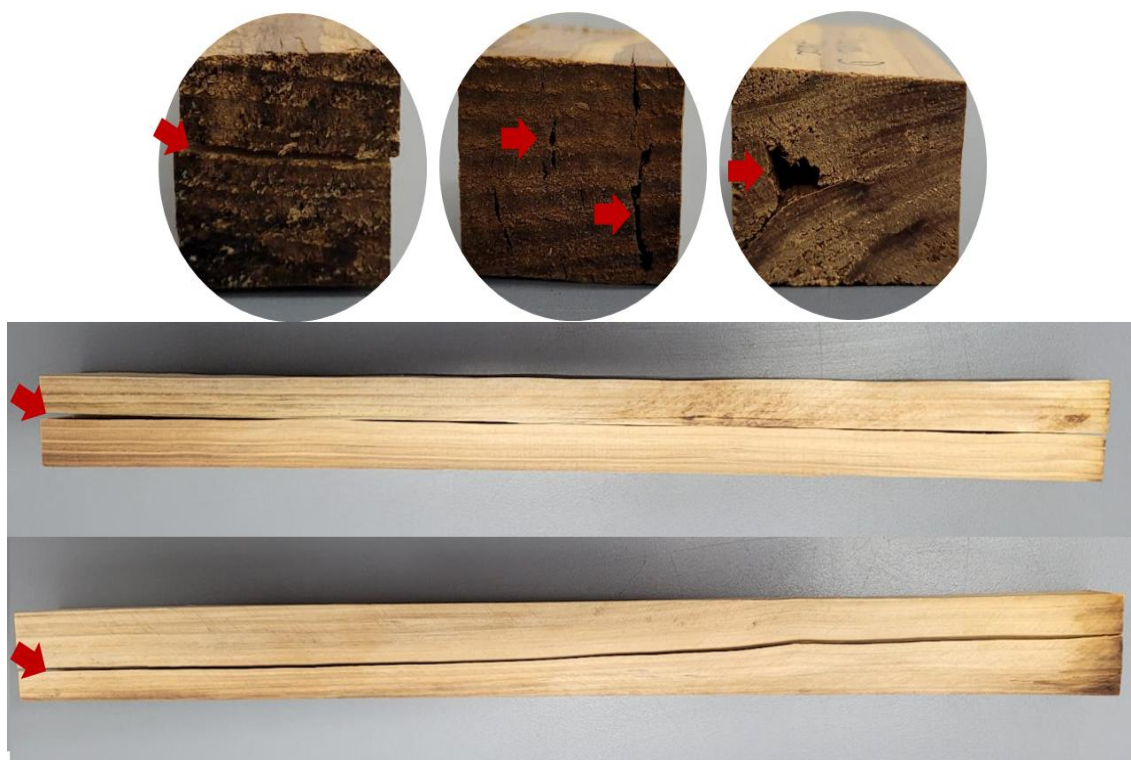
O processamento termomecânico aplicado às amostras de madeira de *P. taeda* ocasionou um acréscimo significativo na densidade aparente, com médias próximas ao dobro daquelas observadas na amostra controle. Nas modificações submetidas à pré-tratamento, esse incremento foi ainda mais acentuado, ultrapassando 220%, o que equivale a mais que o dobro da densidade original.

Os resultados mostram que a temperatura aplicada influencia, amolecendo a lignina ao atingir sua temperatura de transição vítrea, facilitando o adensamento da madeira (Bekhta; Niemz; Sedliacik, 2012). Esse amolecimento permite o rearranjo das estruturas internas, aumentando a densidade final (Wolcott; Kamke; Dillard, 1990; Welzbacher *et al.*, 2008).

Estudos indicam que o padrão de deformação também é influenciado pela temperatura de início da compressão. Quando iniciada a 100 °C, a deformação ocorre de maneira mais uniforme ao longo da espessura do material. Em contrapartida, a 200 °C, o aquecimento localizado provoca deformações concentradas nas superfícies, uma vez que a madeira possui baixa condutividade térmica, dificultando a difusão eficiente de calor para o interior do material (Laine *et al.*, 2013).

Apesar dos ganhos na densificação, foram identificados alguns efeitos decorrentes do tratamento, como deformações estruturais e a ocorrência de fissuras em determinadas amostras, inviabilizando o uso da mesma, conforme exemplificado na Figura 12.

Figura 12. Principais defeitos identificados nos materiais densificados após o processo de tratamento, incluindo deformações, fissuras e outras irregularidades estruturais



Fonte: Elaborado pelo autor.

A deformação permanente observada em madeiras submetidas à densificação pode ser atribuída tanto ao fluxo viscoso dos constituintes da matriz da parede celular quanto à reorganização das pontes de hidrogênio entre seus componentes (Navi; Pittet; Plummer, 2002; Keckes *et al.* 2003; Adler; Buehler, 2013). O aumento da densidade aparente, por sua vez, depende diretamente da densidade inicial do material e da temperatura empregada durante o processamento (Pertuzzatti *et al.*, 2018). Em temperaturas elevadas, ocorre o amolecimento da lignina, o que favorece a compactação da estrutura celular e a consequente redução dos espaços vazios resultantes do colapso das células (Ulker; Imirzi; Burdurlu, 2012; İmirzi; Ülker; Burdurlu, 2013).

Além do aumento da densidade, o tratamento termomecânico promoveu a redução da umidade de equilíbrio higroscópico das madeiras processadas, indicando alterações relevantes na constituição da matriz da parede celular. Esse comportamento é amplamente descrito na literatura e está relacionado à degradação térmica das hemiceluloses, polímeros mais suscetíveis ao calor (Akgül; Gümüşkaya; Korkut, 2007; Akyildiz; Ateş, 2008; Welzbacher *et al.*, 2008; Dubey, 2010; Pelit;

Sönmez; Budakçı, 2014; Bal, 2015; Bekhta *et al.*, 2016).

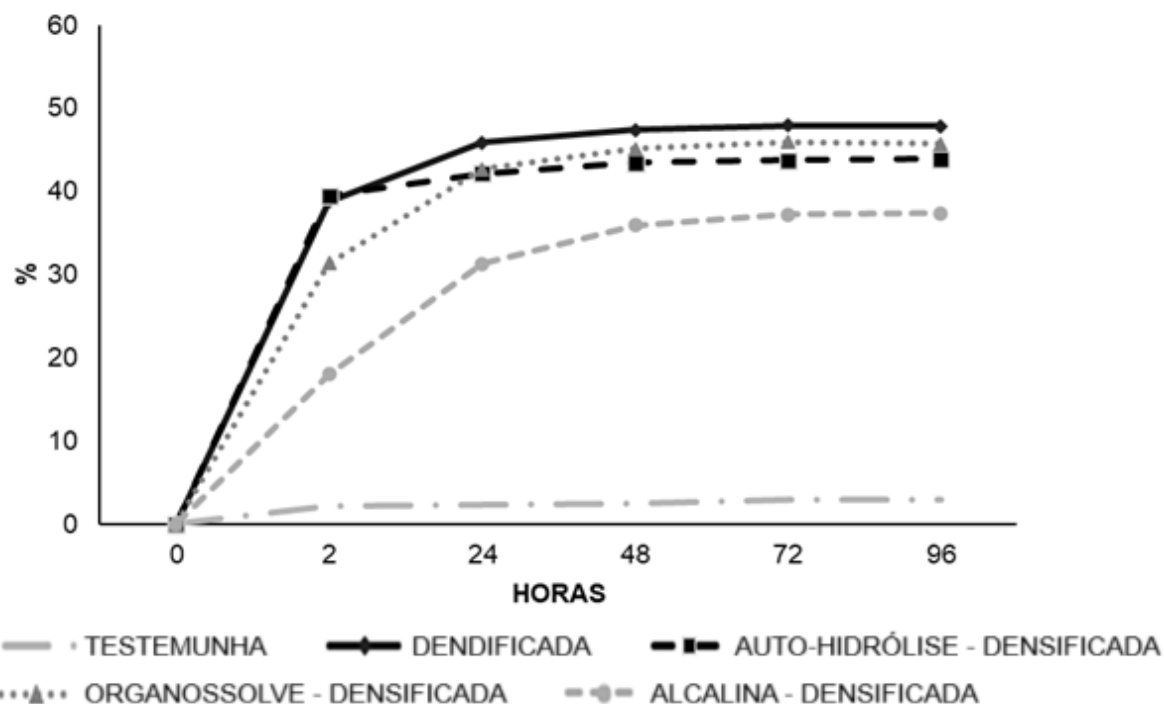
Durante o tratamento, também ocorre o selamento superficial das peças, resultado da ação direta da temperatura aplicada pelos pratos da prensa, o que reduz a porosidade da madeira e, por consequência, sua capacidade de absorver água (Hill, 2007). Diante desse comportamento, torna-se fundamental avaliar o inchamento em espessura das amostras após o processo. A madeira apresenta tendência à recuperação dimensional, especialmente em espessura, fenômeno conhecido como *springback*, que compromete a estabilidade do material e pode limitar seu uso em aplicações que demandam precisão dimensional.

Os principais defeitos observados nas amostras após o tratamento incluem deformações estruturais, fissuras e irregularidades superficiais. Deformações como curvaturas ou alterações dimensionais indesejadas geralmente resultam de tensões internas acumuladas durante o processo de compressão, sobretudo quando são utilizadas condições inadequadas de temperatura ou pressão (Ulker; Imirzi; Burdurlu, 2012). Fissuras, por sua vez, ocorrem em função do colapso das fibras, provocado por esforços mecânicos intensos ou perda acentuada de umidade. Já as irregularidades superficiais, como rachaduras ou regiões com compressão desigual, podem ser atribuídas à distribuição heterogênea da pressão ou às variações anatômicas da madeira (Esteves; Pereira, 2009).

Tais limitações reforçam a necessidade de um controle rigoroso dos parâmetros envolvidos no processamento, incluindo a seleção da matéria-prima (considerando espécies com propriedades anatômicas compatíveis com os objetivos do tratamento), a orientação do corte (tangencial, radial ou transversal) e a padronização das condições operacionais (Marenče; Šega; Gornik Bučar, 2020; Klement; Vilkovská; Vilkovský, 2024). A observância desses fatores contribui para a mitigação de defeitos e para a obtenção de um material de alta qualidade.

Conforme apresentado na Figura 13, as amostras densificadas apresentaram os maiores percentuais de inchamento em espessura em comparação à madeira não tratada. Ainda que o tratamento alcalino tenha resultado nos menores índices entre as amostras densificadas, os valores permaneceram significativamente superior aos registrados na condição testemunha.

Figura 13. Inchamento em espessura após a imersão prolongada em água da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento (Experimento III).






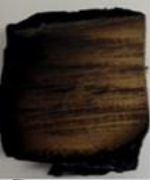

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a exposição da madeira ao fogo, seus principais constituintes (celulose, hemicelulose e lignina) sofrem degradação térmica, liberando gases e vapor d'água, além da formação de cinzas. Com base nos resultados apresentados na Tabela 18, é possível analisar o comportamento de amostras tratadas com diferentes soluções aquosas quanto à inflamabilidade.

As madeiras submetidas ao processo de densificação apresentaram comportamento significativamente distinto da amostra testemunha. Entre as modificações avaliadas, a pôr autohidrólise resultou na menor perda de massa, com redução de 75% em comparação à madeira não tratada e de 19% em relação à madeira densificada sem pré-hidrólise.

Os resultados referentes ao tempo de ignição indicam que as amostras densificadas, em geral, apresentaram maior resistência ao início da combustão, retardando o processo de ignição. As modificações com aplicação de pré-hidrólise, especialmente autohidrólise e alcalino, apresentaram diferenças estatísticas relevantes em comparação às demais condições. A diferença entre o tempo de ignição da madeira testemunha e da amostra submetida à autohidrólise correspondeu a um aumento de 75,3%, sugerindo que materiais com menor densidade são mais suscetíveis ao início da queima.

Tabela 18. Inflamabilidade da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento (Experimento III).

TRATAMENTO	MASSA RESIDUAL (%)	TEMPO DE IGNIÇÃO (s)	TEMPO DE CHAMA (s)	TEMPO DE BRASA (s)	VERIFICAÇÃO
TESTEMUNHA	69,23 ( $\pm 2,61$ ) a	10,62 ( $\pm 1,49$ ) c	334,31 ( $\pm 18,57$ ) b	338,89 ( $\pm 94,30$ ) cd	
DENSIFICADA	46,95 ( $\pm 6,30$ ) bc	29,78 ( $\pm 2,97$ ) b	505,94 ( $\pm 41,65$ ) a	222,68 ( $\pm 57,03$ ) d	
AUTO-HIDRÓLISE - DENSIFICADA	39,64 ( $\pm 3,00$ ) c	42,97 ( $\pm 3,65$ ) a	492,84 ( $\pm 34,45$ ) a	514,98 ( $\pm 103,44$ ) ab	
ORGANOSSOLVE - DENSIFICADA	50,76 ( $\pm 5,97$ ) b	41,64 ( $\pm 2,65$ ) a	492,36 ( $\pm 25,02$ ) a	464,80 ( $\pm 82,57$ ) bc	
ALCALINA - DENSIFICADA	47,84 ( $\pm 8,38$ ) bc	42,34 ( $\pm 4,44$ ) a	552,04 ( $\pm 60,65$ ) a	621,20 ( $\pm 69,70$ ) a	
Coefficiente de variação (%)	11,17	9,56	8,18	19,21	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

Com relação ao tempo de chama, observou-se que madeiras com maior densidade tendem a queimar mais lentamente, mantendo a combustão por um período prolongado. O tratamento alcalino resultou no maior tempo de chama médio, sendo 165% superior ao da testemunha. Esse comportamento pode estar associado à maior concentração de massa sólida no interior das peças, o que reduz a velocidade de combustão.

O tempo de brasa também foi consideravelmente ampliado nos materiais tratados. Amostras submetidas aos diferentes tipos de pré-hidrólise apresentaram valores substancialmente superiores ao da madeira não tratada, o que está de acordo com a maior densidade obtida após o processamento termomecânico. A permanência

da brasa por tempo prolongado reforça a necessidade de avaliação criteriosa quanto à segurança em aplicações que envolvam exposição térmica.

Por fim, destaca-se que a resistência mecânica está diretamente relacionada à durabilidade e ao desempenho da madeira em diferentes usos. A densificação tem como objetivo o aumento da rigidez e da resistência estrutural do material, tornando-o melhor frente a exigências mecânicas.

### 5.3.3 Propriedades Mecânicas

Na Tabela 19 são apresentados os valores médios obtidos nos ensaios de resistência mecânica, o Módulo de Ruptura, Módulo de Elasticidade e dureza Janka para as amostras de madeira de *P. taeda*, considerando a condição natural (testemunha) e as diferentes modificações de densificação com pré-hidrólise.

Tabela 19. Resistência mecânica da madeira de *Pinus taeda* conforme o pré-tratamento (Experimento III).

TRATAMENTO	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DUREZA JANKA (MPa)
TESTEMUNHA	53,30 ( $\pm 5,02$ ) c	5,92 ( $\pm 1,47$ ) b	44,18 ( $\pm 6,85$ ) d
DENSIFICADA	115,90 ( $\pm 11,40$ ) b	11,69 ( $\pm 1,93$ ) a	60,14 ( $\pm 5,53$ ) c
AUTO-HIDRÓLISE - DENSIFICADA	116,35 ( $\pm 19,65$ ) b	11,43 ( $\pm 2,57$ ) a	82,53 ( $\pm 10,26$ ) a
ORGANOSSOLVE - DENSIFICADA	106,33 ( $\pm 31,79$ ) b	11,53 ( $\pm 4,04$ ) a	68,76 ( $\pm 9,55$ ) bc
ALCALINA - DENSIFICADA	141,90 ( $\pm 10,61$ ) a	13,46 ( $\pm 5,50$ ) a	75,38 ( $\pm 12,07$ ) ab
Coeficiente de variação (%)	17,09	31,79	13,84

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si dentro de cada coluna pelo Teste Tukey a 5%.

O tratamento com pré-hidrólise alcalina resultou nos maiores valores para o MOR e MOE, com aumentos de 266% e 227%, respectivamente, quando comparados à madeira não tratada. Esses dados indicam que a densificação, associada à modificação química da estrutura celular, contribui para o fortalecimento da madeira.

Os dados indicam que a remoção parcial de hemiceluloses por hidrólise alcalina

aumenta a suscetibilidade da madeira à compressão. Esse efeito favorece o colapso das paredes celulares durante o tratamento termomecânico, resultando em maior adensamento da matriz anatômica. Como consequência, observou-se melhora nas propriedades mecânicas, como resistência e dureza, conforme apontado por Silva, (2019).

O aumento da resistência está diretamente associado à elevação da densidade aparente, decorrente do fechamento dos lúmens e da compactação dos traqueídeos, esse adensamento estrutural contribui para a melhoria das propriedades mecânicas da madeira tratada (Tabarsa; Chui, 1997; Morsing, 2000; Fang *et al.*, 2012b; Sandberg; Haller; Navi, 2012; Miftieva *et al.*, 2015). Além disso, estudos como o de Pertuzzatti *et al.* (2018) e Song *et al.*, 2018) confirmam que a redistribuição dos elementos da parede celular, induzida pela compressão, contribui diretamente para esse comportamento.

O trabalho de Lamason e Gong (2007), com a densificação do álamo, reforça a importância de estabelecer parâmetros adequados de prensagem, uma vez que variações em temperatura, umidade ou pressão impactam o desempenho final do material. Nesse sentido, a escolha cuidadosa da espécie, do nível de umidade da madeira e dos parâmetros do tratamento é fundamental para assegurar a obtenção de resultados consistentes.

Outros autores, como Morsing (2000) e Sandberg, Haller e Navi (2012), destacam que o uso combinado de temperatura e pressão durante as modificações higrotérmicas favorece a estabilidade e a resistência. Miftieva *et al.* (2015), ao estudarem a densificação da madeira de faia, também observaram ganhos substanciais quando o processo foi realizado em altas temperaturas.

A dureza Janka, por sua vez, apresentou aumentos consideráveis em todas as condições de densificação. O tratamento com autohidrólise se destacou com um acréscimo de 187% em comparação à testemunha. Esse resultado está associado à redução da porosidade e ao achatamento das células, conforme descrito por Laine *et al.* (2016) e Fang *et al.*, (2012b).

Esses dados indicam que o fortalecimento mecânico das madeiras densificadas é resultado das modificações físico-químicas na parede celular e do efeito da compressão promovido pelo tratamento. A aplicação de pré-hidrólise, seja por autohidrólise, organossolve ou alcalina, representa uma estratégia viável para a

valorização da madeira de pinus, ampliando suas possibilidades de uso, especialmente em contextos que exigem maior resistência mecânica.

Entretanto, recomenda-se associar o processo de termodensificação a uma técnica complementar de impermeabilização, com o objetivo de mitigar o efeito de recuperação dimensional (*springback*) e melhorar a estabilidade da madeira ao longo do tempo. Essa etapa pode ser realizada com soluções hidrossolúveis ou oleossolúveis, aplicadas durante ou após o tratamento térmico.

Na Tabela 20 são apresentadas as principais propriedades da madeira de *Pinus taeda* na condição de testemunha, em comparação com o material submetido à pré-hidrólise (auto-hidrólise, organossolve e alcalina) em seguida termodensificado. Todos os valores foram corrigidos para 12% de teor de umidade, permitindo uma comparação padronizada entre os tratamentos. Essa análise possibilita avaliar as modificações nas características do material.

Tabela 20. Propriedades da madeira de *Pinus taeda* e termodensificada a 12% de teor de umidade, conforme o pré-tratamento (Experimento III).

TRATAMENTO	DENSIDADE APARENTE (g.cm <sup>-3</sup> )	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DUREZA JANKA (MPa)
TESTEMUNHA	0,45	55,06	5,97	45,08
DENSIFICADA	0,81	95,12	11,08	52,92
AUTO-HIDRÓLISE - DENSIFICADA	0,87	90,05	10,65	69,79
ORGANOSSOLVE - DENSIFICADA	0,96	83,91	10,81	58,92
ALCALINA - DENSIFICADA	0,94	122,79	12,96	68,70

Ao comparar os resultados obtidos com os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 7190 (ABNT, 2022), representados na Figura 14, verifica-se que a madeira de pinus não tratada (testemunha) se comporta como uma madeira de classe C50 quanto à resistência mecânica. No que se refere à rigidez, a classificação corresponde à classe C14, enquanto a densidade aparente posiciona o material na classe C27.

Por outro lado, a madeira submetida à densificação apresentou desempenho superior em todas as propriedades avaliadas. Com base nos valores médios obtidos, sua classificação se eleva para a classe D70 no critério de resistência, C30 para

rigidez e D60 em relação à densidade.

As amostras tratadas com pré-hidrólise, independentemente da metodologia empregada (autohidrólise, organossolve ou alcalina), também alcançaram patamares superiores aos observados na madeira *in natura*. Nessas condições, a classificação corresponde à D70 quanto à resistência, C30 para rigidez e D70 no quesito densidade.

Figura 14. Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais

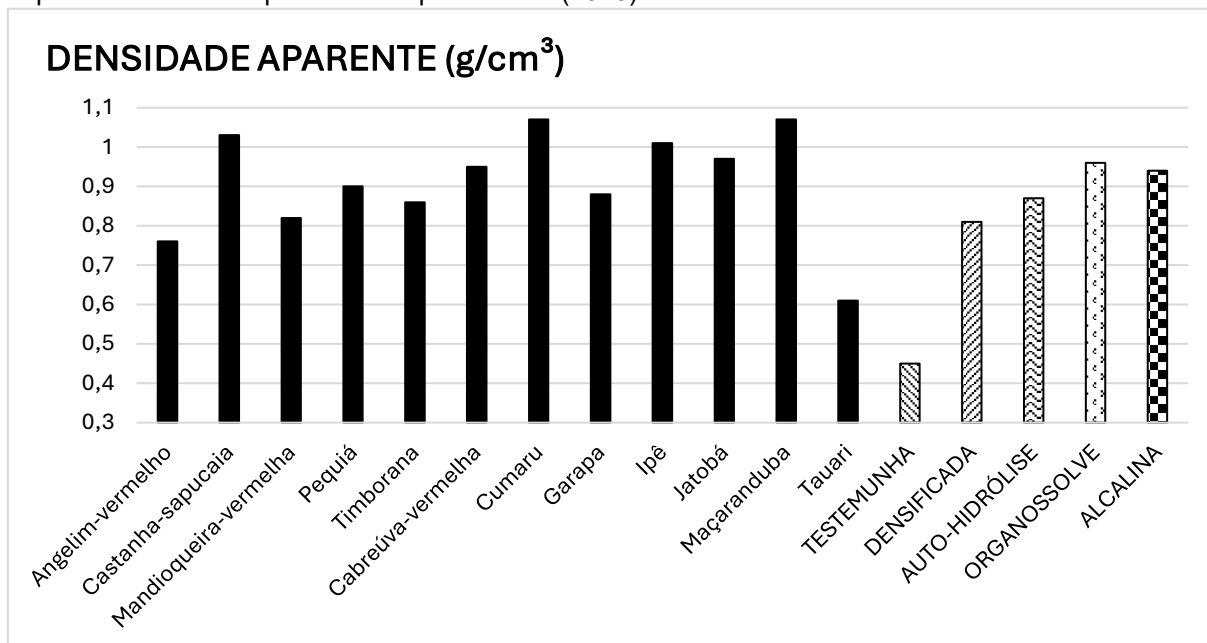
		Coníferas										Folhosas									
	Símbolo	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência MPa																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Propriedades de rigidez GPa																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Densidade kg/m <sup>3</sup>																					
Densidade característica	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900
Densidade média	$\rho_m$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
Nota 1	Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.																				
Nota 2	Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %																				

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 2022).

A Figura 15 ilustra a comparação entre os valores de densidade aparente obtidos para as amostras de *Pinus taeda* utilizadas neste estudo e as médias de densidade das espécies brasileiras apresentadas pela Associação Nacional dos Produtores de Pisos de Madeira (ANPM, 2015).

O material modificado por auto-hidrólise atingiu densidade de 0,87 g/cm<sup>3</sup>, valor próximo ao registrado para espécies como Garapa (0,88 g/cm<sup>3</sup>), Pequiá (0,90 g/cm<sup>3</sup>), Cabreúva-vermelha (0,95 g/cm<sup>3</sup>) e Jatobá (0,97 g/cm<sup>3</sup>). A madeira densificada com pré-tratamento alcalino apresentou densidade semelhante à da Cabreúva-vermelha, Jatobá e Ipê (1,01 g/cm<sup>3</sup>).

Figura 15. Comparação das densidades aparentes da madeira *Pinus taeda* avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015).



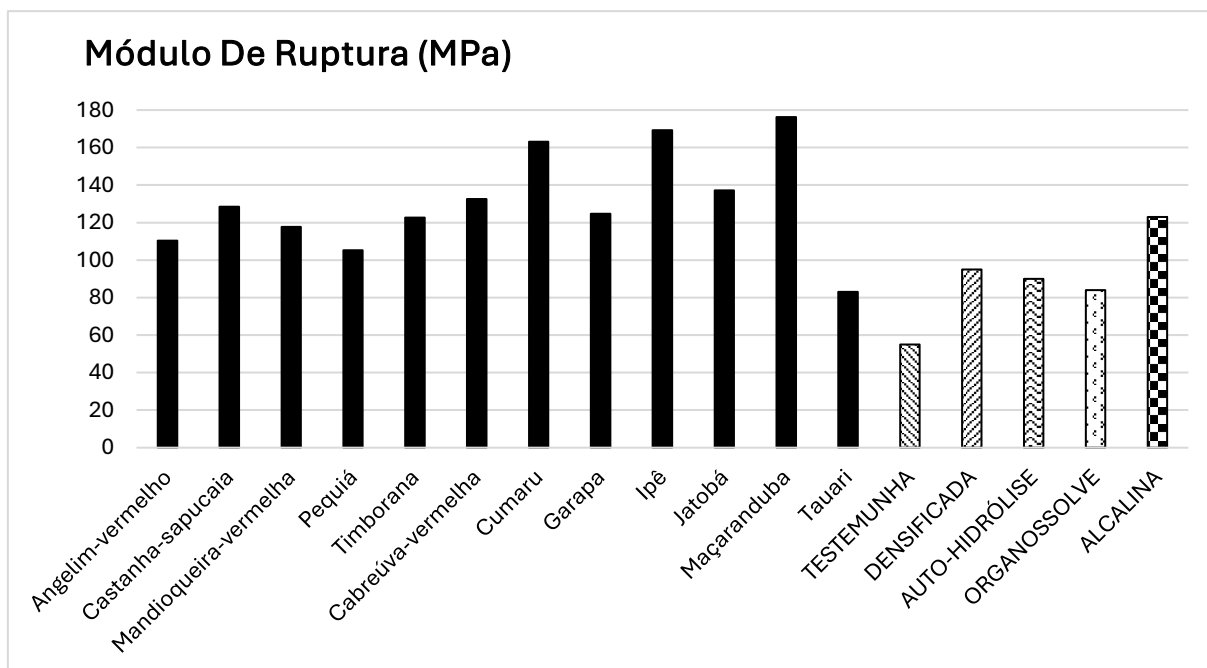
Fonte: Adaptado de ANPM (2015).

O material submetido ao processo organossolve e alcalino alcançou os maiores valores de densidade entre as modificações testadas, situando-se em patamar comparável ao Garapa (0,88 g/cm<sup>3</sup>), Pequiá (0,9 g/cm<sup>3</sup>), Cabreúva-vermelha (0,95 g/cm<sup>3</sup>), Jatobá (0,97 g/cm<sup>3</sup>), Ipê (1,01 g/cm<sup>3</sup>), e Castanha-sapucaia (1,03 g/cm<sup>3</sup>), espécies tradicionalmente reconhecidas pelo elevado desempenho físico-mecânico e empregadas em aplicações estruturais e pisos de alto tráfego.

A Figura 16 apresenta a comparação dos valores do módulo de ruptura (MOR), que indica a resistência à fratura das madeiras de *P. taeda* avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015).

Em relação à resistência, o material tratado com o pré-tratamento organossolve alcançou um módulo de ruptura de 139 MPa, enquanto o tratamento alcalino resultou em 142 MPa. Estes valores são comparáveis aos de madeiras brasileiras como Castanha-sapucaia (128 MPa), Cabreúva-vermelha (133 MPa), Jatobá (137 MPa), Cumaru (163 MPa), Ipê (169 MPa) e Maçaranduba (176 MPa). Esses resultados indicam que as modificações aplicadas proporcionaram à madeira de pinus características de resistência que se aproximam das madeiras tradicionais de alto desempenho, com potencial para aplicações que exigem alta resistência mecânica.

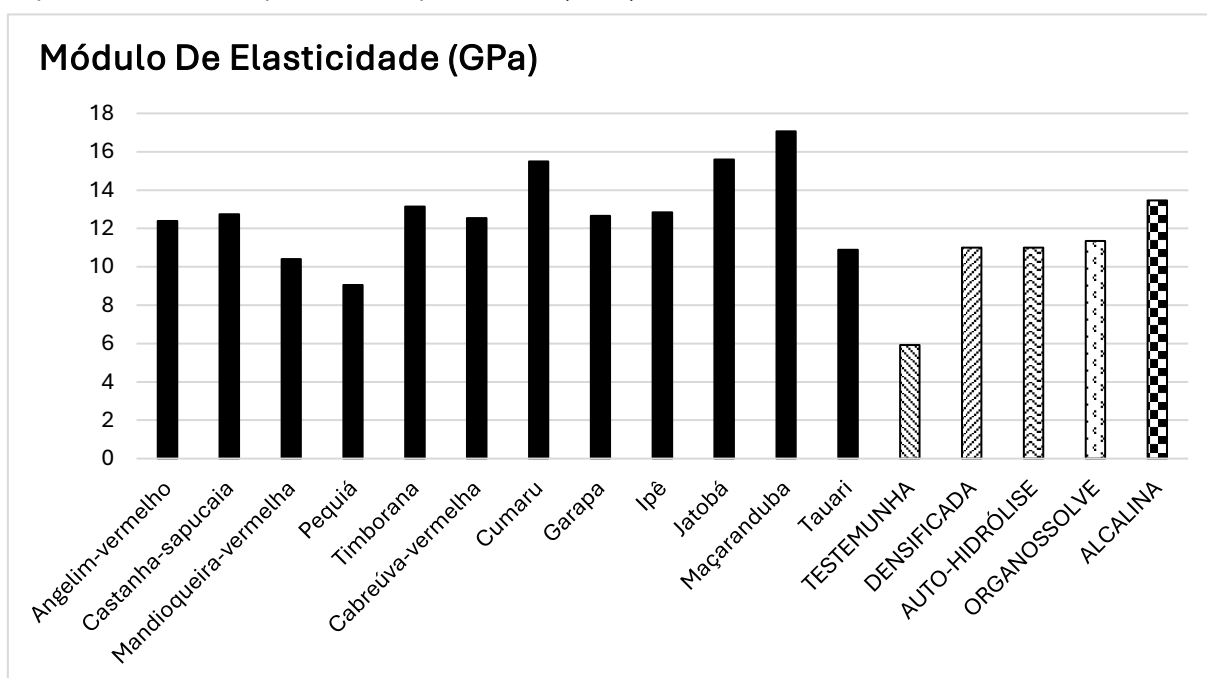
Figura 16. Comparação do módulo de ruptura da madeira *Pinus taeda* avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015)



Fonte: Adaptado de ANPM (2015).

A Figura 17 apresenta a comparação dos valores do módulo de elasticidade (MOE), que indica a rigidez da madeira, entre as madeiras de *P. taeda* avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015).

Figura 17. Comparação do módulo de elasticidade da madeira *Pinus taeda* avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015)

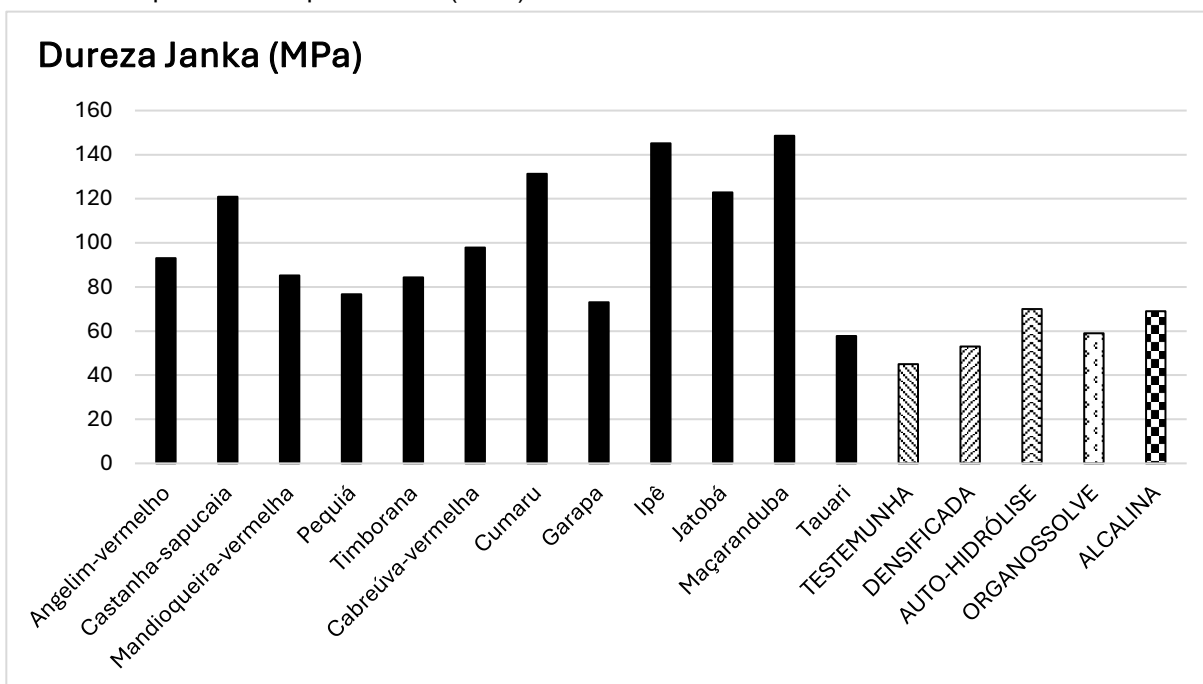


Fonte: Adaptado de ANPM (2015).

O material resultante do pré-tratamento alcalino apresentou um módulo de elasticidade de aproximadamente 13 GPa, valor que se assemelha ao de várias madeiras de alta rigidez, como Castanha-sapucaia (13 GPa), Ipê (13 GPa), Timborana (13 GPa), Cumaru (15 GPa) e Jatobá (16 GPa). Esse resultado demonstra que a madeira de pinus densificada com o pré-tratamento alcalino alcançou uma rigidez comparável à de madeiras de valor comercial elevado, ampliando suas possibilidades de aplicação em construções e outros produtos estruturais.

A Figura 18 apresenta a comparação dos valores da dureza Janka, que indica a resistência de uma madeira à penetração, entre as madeiras de *P. taeda* avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015).

Figura 18. Comparação da Dureza Janka da madeira *Pinus taeda* avaliadas em relação às espécies brasileiras apresentadas pela ANPM (2015).



Fonte: Adaptado de ANPM (2015).

O material proveniente do pré-tratamento alcalino apresentou uma dureza Janka de aproximadamente 75 MPa, valor superior ao de Tauari (58 MPa) e semelhante ao da Garapa (74 MPa) e Pequiá (78 MPa). Em contraste, a madeira modificada por auto-hidrólise obteve um valor médio superior, cerca de 84 MPa, aproximando-se das durezas de madeiras como Timborana (84 MPa) e Mandioqueira-vermelha (85 MPa). As modificações utilizadas neste estudo aumentam significativamente a resistência à penetração, quando comparado com a madeira de

pinus, expandindo as possibilidades de aplicação da madeira densificada em contextos que demandam elevado nível de durabilidade e resistência.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

A análise dos dados obtidos nos três experimentos conduzidos permite delinear um panorama detalhado sobre os efeitos dos diferentes métodos de pré-hidrólise e da densificação termomecânica na madeira de *Pinus taeda*. As modificações químicas e físicas aplicadas influenciaram na composição da matriz constituinte da madeira, na densidade, na higroscopicidade, na coloração, nas propriedades de resistência e rigidez da madeira.

A pré-hidrólise associada a um tratamento térmico, promove modificações mensuráveis na matriz constituinte da madeira. A redução dos teores de extrativos e holocelulose é resultante desta combinação, uma vez que as hemiceluloses, por sua maior suscetibilidade à degradação, são parcialmente removidas nesse processo. Essa remoção altera a proporção entre os constituintes estruturais da madeira, refletindo em um aumento relativo no teor de lignina, o que indica a permanência desse polímero na matriz da madeira (Arévalo *et al.*, 2017).

Observando as propriedades físicas, verificou-se alteração na densidade, umidade, nos índices de colorimétricos, independentemente do tratamento. Em particular, os tratamentos alcalinos apresentaram mudanças visíveis na tonalidade das amostras. Tais alterações apontam para modificações da madeira, com impacto direto na percepção visual.

O tratamento alcalino da madeira de Pinus com hidróxido de sódio ocasionou alterações estruturais na matriz celular por meio da quebra de ligações de hidrogênio na celulose, expondo as hidroxilas (Karimi e Noori, 2016; Barman *et al.*, 2020; Bay *et al.*, 2020).

O escurecimento da madeira está relacionado à degradação térmica e química da matriz constituintes da madeira, componentes como lignina e hemicelulose, esse fenômeno ocorre durante os processos alcalinos e térmicos (Akkuş e Budakçı, 2020). Em concentrações mais elevadas de hidróxido de sódio (acima de 10%), observa-se uma degradação acentuada das fibras de celulose, o que contribui para a intensificação desse escurecimento (Barman *et al.*, 2020).

Quanto às propriedades mecânicas, as características de resistência e rigidez

da madeira (módulos de ruptura (MOR), elasticidade (MOE) e dureza Janka) variaram em função da combinação entre o tratamento químico e o processo de densificação. A madeira densificada apresentou elevações nesses parâmetros em relação à condição testemunha, com destaque para as condições experimentais que envolveram maiores tempos de exposição ao agente alcalino (Shi *et al.*, 2020; Alqrinawi *et al.*, 2024).

O processo de termodensificação reduz a porosidade e aproxima as microfibrilas de celulose, promovendo maior ligação por pontes de hidrogênio e, conseqüentemente, maior resistência mecânica, conseqüentemente, características melhores de resistência e rigidez da madeira (Shi *et al.*, 2020; Alqrinawi *et al.*, 2024).

Em termos de inflamabilidade, os tratamentos resultaram em mudanças no tempo de ignição, tempo de chama e brasa, além da massa residual. Essas alterações indicam que a densificação e os diferentes métodos de pré-hidrólise alteram a forma como a madeira reage à exposição ao calor. A densificação aumenta a resistência ao fogo, resultando em combustão lenta (Li *et al.*, 2025).

A comparação dos valores obtidos com parâmetros normativos e com espécies comerciais amplia a contextualização técnica dos dados. Entretanto, permanecem aspectos como o inchamento pós-imersão e a presença de fissuras estruturais, que exigem cautela quanto à estabilidade dimensional e integridade do material.

Esses resultados apontam para um conjunto de interações entre estrutura anatômica, composição química e processo de modificação que impactam diretamente o comportamento físico-mecânico da madeira. As conseqüências dessas interações devem ser consideradas na seleção e no planejamento de aplicações que envolvam esse material modificado.

O tratamento com solução hidróxido de sódio (NaOH) com a concentração de 5% m/m, com base na massa seca total da madeira submetida ao tratamento, demonstrou desempenho satisfatório ao longo dos ensaios realizados. Embora essa condição não tenha gerado, em todos os casos, os valores mais altos nas propriedades avaliadas, os resultados obtidos foram consistentes, evidenciando ganhos mecânicos e físicos significativos.

A adição de hidróxido de sódio (NaOH) ao tratamento não proporcionou vantagens adicionais significativas que compensassem os ganhos obtidos no processo, tampouco melhorias expressivas nas propriedades finais da madeira

tratada.

O tempo de cozimento de 120 minutos adotado no pré-tratamento demonstrou-se eficiente, promovendo resultados consistentes ao processo. Esse cozimento mostrou-se ideal para favorecer as modificações desejadas na estrutura da madeira. Por outro lado, tempos de cozimento superiores a 120 minutos não apresentaram melhorias adicionais e relevantes nas propriedades físico-mecânicas. Em contraponto, tempos de cozimentos inferiores resultaram em desempenho insatisfatório.

Assim, os resultados obtidos neste estudo indicam que o pré-tratamento alcalino mais eficiente foi aquele realizado com solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 5% m/m, cuja concentração foi calculada com base na massa seca da madeira. A aplicação dessa solução, aliada ao tempo de cozimento de 120 minutos, favoreceu modificações estruturais significativas, promovendo melhorias nas propriedades físico-mecânicas e estéticas da madeira.

Contudo, ao considerar os diferentes métodos de pré-tratamento avaliados no estudo, é possível observar que a auto-hidrólise também se destacou por apresentar resultados satisfatórios. Embora não tenha superado todas as propriedades obtidas por meio de tratamentos alcalinos, a auto-hidrólise demonstrou eficiência e contribuiu positivamente para a melhoria estrutural do material. Destaca-se principalmente pelo aspecto ambiental pois, nesse processo que dispensa o uso de reagentes químicos agressivos, o passivo ambiental gerado é substancialmente menor em comparação às demais técnicas analisadas, especialmente a alcalina. Por esse motivo, a auto-hidrólise se torna uma alternativa sustentável e viável.

## 6. CONCLUSÕES

A concentração de NaOH na solução de pré-hidrólise, associada ao processo de termodensificação, impacta diretamente na coloração das peças processadas e nas propriedades da madeira de pinus. A combinação dessas modificações torna a madeira mais susceptível à densificação, promovendo maior resistência e reduzindo a higroscopicidade do material.

A densificação transforma a madeira em um material menos inflamável, aumentando sua resistência térmica e retardando o tempo de ignição. Esses efeitos contribuem para a segurança estrutural em caso de incêndio, embora a maior densidade prolongue o tempo de chama e brasa, o que pode resultar em combustão lenta. Esse aspecto pode ser vantajoso em algumas situações, pois oferece maior controle do incêndio e permite mais tempo para a preservação da estrutura.

O tempo de exposição à solução de NaOH não alterou significativamente as características químicas da madeira, mas o pré-tratamento alcalino teve impacto considerável na coloração, influenciando sua estética. A pré-hidrólise, especialmente quando realizada por um período maior, aumentou a eficiência da densificação, facilitando a modificação estrutural e tornando a lignina mais acessível para as modificações subsequentes.

A pré-hidrólise alcalina se destacou ao promover modificações significativas na matriz estrutural da madeira, resultando em um material mais suscetível ao processo de densificação. Embora o pré-tratamento organossolve também tenha mostrado eficácia, a alcalinização foi mais eficiente. A madeira densificada, em especial quando tratada com pré-hidrólise, apresentou aumento significativo em suas propriedades mecânicas, independentemente da solução utilizada no pré-tratamento.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que estudos futuros sejam realizados em sistemas fechados para analisar as alterações decorrentes da pré-hidrólise e verificar a eficácia desses sistemas em comparação aos abertos.

Sugere-se a investigação de diferentes taxas de compactação, considerando o efeito de springback, e a avaliação de aditivos capazes de reduzir a higroscopicidade e a inflamabilidade da madeira.

A linha de produção industrial de madeira densificada deve ser estudada, visando a redução do intervalo entre as etapas de pré-hidrólise e densificação, aproveitando o aquecimento prévio da madeira durante a pré-hidrolise. O ciclo de produção da madeira densificada deve se constituir num processo integrado, sistemático e receptivo a inovações.

O inchamento irreversível da madeira densificada decorrente da exposição à água (springback) exige investigação sobre tratamentos pós-densificação, incluindo substâncias impermeabilizantes e ignífugas. Além disso, a avaliação da durabilidade do material frente a agentes deterioradores é essencial para determinar sua viabilidade em diferentes aplicações.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Estruturas de Madeira**. Norma técnica, n. NBR 7190/22. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ADLER, D. C.; BUEHLER, M. J. Mesoscale mechanics of wood cell walls under axial strain. **Soft Matter**, [s. l.], v. 9, n. 29, p. 7138–7144, 3 jul. 2013. <https://doi.org/10.1039/C3SM50183C>.

AKGÜL, M.; GÜMÜŞKAYA, E.; KORKUT, S. Crystalline structure of heat-treated Scots pine [*Pinus sylvestris* L.] and Uludağ fir [*Abies nordmanniana* (Stev.) subsp. *bornmuelleriana* (Mattf.)] wood. **Wood Science and Technology**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. 281–289, 1 mar. 2007. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0110-9>.

AKKUŞ, M., & BUDAKÇI, M. Determination of color-changing effects of bleaching chemicals on some heat-treated woods. **Journal of Wood Science**. 2020; 66. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01916-w>.

AKYILDIZ, M. H.; ATEŞ, S. Effect of Heat Treatment on Equilibrium Moisture Content (EMC) of Some Wood Species in Turkey. [s. l.], 2008. .

ALBINO, V. C. D. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden na qualidade da colagem. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 803–811, 26 dez. 2012. <https://doi.org/10.5902/198050987561>.

ALMEIDA, D. H. de. **Estimativa de propriedades de resistência e de rigidez de madeiras tropicais brasileiras pela técnica de colorimetria**. 2017. 98 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2017.

ALQRINAWI H., AHMED B., WU Q., LIN H. SABARETHINAM KAMESHWAR, MOHAMMAD SHAYAN,. Effect of partial delignification and densification on chemical, morphological, and mechanical properties of wood: Structural property Evolution. **Industrial Crops and Products**. Volume 213. 2024. 118430. ISSN 0926-6690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118430>.

ANPM – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE PISOS DE MADEIRA. **Pisos de madeira: características de espécies brasileiras**. Piracicaba - SP: ANPM, 2015.

ARÉVALO, C., FREER, J., NAULIN, P. BARRERA, N., TRONCOSO, E., ARAYA, J., PEÑA-FARFAL, C., CASTILLO, R. Study of the Ultrastructure of Eucalyptus globulus Wood Substrates Subjected to Auto-Hydrolysis and Diluted Acid Hydrolysis Pre-treatments and Its Influence on Enzymatic Hydrolysis. **Bioenerg. Res.** 10, 714–727 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12155-017-9833-8>.

ARRIAGA, F.; WANG, X.; ÍÑIGUEZ-GONZÁLEZ, G.; LLANA, D. F.; ESTEBAN, M.; NIEMZ, P. Mechanical Properties of Wood: A Review. **Forests**, [s. l.], v. 14, n. 6, p.

1202, jun. 2023. <https://doi.org/10.3390/f14061202>.

ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S. Effect of thermomechanical treatment on physical properties of wood veneers. **International Wood Products Journal**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 217–224, nov. 2013. <https://doi.org/10.1179/2042645312Y.0000000022>.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2244: Standard practice for calculating color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates, n. ASTM D2244-21. West Conshohocken: ASTM International, 2021. Disponível em: <https://www.astm.org/d2244-21.html>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard method of testing small clear specimen of timber**, n. ASTM D143-94. Philadelphia: ASTM, 1994.

BACH, Q.-V.; SKREIBERG, Ø. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 54, p. 665–677, 1 fev. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.014>.

BAL, B. C. Physical properties of beech wood thermally modified in hot oil and in hot air at various temperatures. **Maderas. Ciencia y tecnología**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 789–798, out. 2015. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000068>.

BARMAN, D., HAQUE, M., HOSSAIN, M., PAUL, S., YUN, H. Deconstruction of Pine Wood (*Pinus sylvestris*) Recalcitrant Structure Using Alkali Treatment for Enhancing Enzymatic Saccharification Evaluated by Congo Red. **Waste and Biomass Valorization**. 2018; 11. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00547-z>.

BATISTA, D. C. Retificação térmica, termorretificação, tratamento térmico, tratamento com calor ou modificação térmica. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 29, p. 463–480, mar. 2019. <https://doi.org/10.5902/1980509822577>.

BAY, M., KUMAR, R., ESFAHANY, M., & KARIMI, K. Structural modification of pine and poplar wood by alkali pretreatment to improve ethanol production. **Industrial Crops and Products**. 2020; 152. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112506>.

BEKHTA, P.; KRYSZTOFIK, T.; PROSZYK, S.; LIS, B. Surface gloss of lacquered medium density fibreboard panels veneered with thermally compressed birch wood. **Progress in Organic Coatings**, [s. l.], v. 117, p. 10–19, abr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.12.020>.

BEKHTA, P.; MAMOŇOVÁ, M.; SEDLIČIK, J.; NOVÁK, I. Anatomical study of short-term thermo-mechanically densified alder wood veneer with low moisture content. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 74, n. 5, p. 643–652, 1 set. 2016. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1033-2>.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P.; SEDLIČIK, J. Effect of pre-pressing of veneer on the glueability and properties of veneer-based products. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 70, n. 1–3, p. 99–106, jan. 2012.

<https://doi.org/10.1007/s00107-010-0486-y>.

BEKHTA, P.; PROSZYK, S.; KRYSZTOFIK, T. Colour in short-term thermo-mechanically densified veneer of various wood species. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 72, n. 6, p. 785–797, nov. 2014. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0837-1>.

BEKHTA, P.; PROSZYK, S.; KRYSZTOFIK, T.; SEDLIACIK, J.; NOVAK, I.; MAMONOVA, M. Effects of short-term thermomechanical densification on the structure and properties of wood veneers. **Wood Material Science & Engineering**, [s. l.], 1 jan. 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17480272.2015.1009488>. Acesso em: 21 abr. 2025.

BIGAN, M.; MUTEL, B. Cold remote plasma modification of wood: Optimization process using experimental design. **Applied Surface Science**, [s. l.], v. 453, p. 423–435, set. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.252>.

BONFATTI JÚNIOR, E. A.; DE BARROS, J. M. R.; SILVA, G. F.; LENGOWSKI, E. C. A Comparative Analysis of Tannin and Commercial Fire Retardants in Wood Fire Protection. **Forests**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 951, jun. 2024. <https://doi.org/10.3390/f15060951>.

BOONSTRA, M. **A two-stage thermal modification of wood**. 2008. 297 f. Tese (Doutorado em Ciência da Madeira) – hent University, Bélgica; Université Henri Poincaré – Nancy 1, França, 2008. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=6e25171ac427fd4f52e583f638e155d2569f2147>. Acesso em: 12 maio 2025.

BUDAKÇI, M.; ŞENOL, S.; KORKMAZ, M. Thermo-Vibro-Mechanic® (TVM) wood densification method: Mechanical properties. **BioResources**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 1606–1626, 14 jan. 2022. <https://doi.org/10.15376/biores.17.1.1606-1626>.

CABRAL, J. P.; KAFLE, B.; SUBHANI, M.; REINER, J.; ASHRAF, M. Densification of timber: a review on the process, material properties, and application. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 68, n. 1, p. 1–24, dez. 2022. <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3>.

CADEMARTORI, P. H. G. de; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R.; STANGERLIN, D. M. Modification of static bending strength properties of *Eucalyptus grandis* heat-treated wood. **Materials Research**, [s. l.], v. 15, p. 922–927, dez. 2012. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000136>.

CAI, Z.; SENALIK, C. A.; ROSS, R. Chapter 12: Mechanical properties of wood-based composite materials. **Wood handbook—wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison, WI: Forest Products Laboratory (ed.) (ou U.S. Department of Agriculture se quiser colocar a instituição). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. p. 1–15. Disponível em: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/62260>. Acesso em: 21 abr. 2025.

CARVALHO, D. E.; ROCHA, M. P. D.; KLITZKE, R. J.; CADEMARTORI, P. H. G. D. Colour changes and equilibrium moisture content on thermomechanical densified wood. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 93, p. e20200109, 20 ago. 2021. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120200109>.

CARVALHO, D. M. de; SEVASTYANOVA, O.; PENNA, L. S.; SILVA, B. P. da; LINDSTRÖM, M. E.; COLODETTE, J. L. Assessment of chemical transformations in eucalyptus, sugarcane bagasse and straw during hydrothermal, dilute acid, and alkaline pretreatments. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 73, p. 118–126, 30 out. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.021>.

CARVALHO, W.; CANILHA, L.; FERRAZ, A.; MILAGRES, A. M. F. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, [s. l.], v. 32, p. 2191–2195, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000800033>.

CEFEP - CENTRO ESTADUAL FLORESTAL DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL PRESIDENTE CONSTA E SILVA. **Mapeamento de uso e ocupação do solo**. Sistema de Gestão Territorial da Fazenda Escola. 2022. Irati.

CHEN, C.; FAN, Q.; ZHOU, H.; HAO, X.; XU, J.; ZHOU, Q.; TU, D.; OU, R.; WANG, Q. Rapid production of high-performance unilaterally surface-densified wood through integrating mechanical compression and thermochemical modification. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 453, p. 139014, 29 nov. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139014>.

CHIO, C.; SAIN, M.; QIN, W. Lignin utilization: A review of lignin depolymerization from various aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 107, p. 232–249, 1 jun. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.008>.

CONCEIÇÃO, F. P. da; NASCIMENTO, A. M. do; GARCIA, R. A.; SOUZA, N. D. de; OLIVEIRA, R. N.; LAUDARES, F. A. L. Efeito da modificação térmica nas propriedades de madeiras exóticas de plantios comerciais. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 25, p. e135681, 31 jan. 2025. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212025000100795>.

COSTA, M. D. A. Efeito de diferentes estratégias de densificação sobre as propriedades de compensados e painéis de lâminas paralelas de paricá (*schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke). 2015. 136 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015. DOI 10.26512/2015.04.T.18959. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/18959>. Acesso em: 20 abr. 2025.

CRUZ, N.; BUSTOS, C. A.; AGUAYO, M. G.; CLOUTIER, A.; CASTILLO, R. Impact of the Chemical Composition of *Pinus radiata* Wood on its Physical and Mechanical Properties Following Thermo-Hygro-mechanical Densification. **BioResources**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 2268–2282, 2 fev. 2018. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.2268-2282>.

DAMMSTRÖM, S.; SALMÉN, L.; GATENHOLM, P. On the interactions between cellulose and xylan, a biomimetic simulation of the hardwood cell wall. **BioResources**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 3–14, 2009. .

DELUCIS, R. de A.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G. de; MISSIO, A. L.; SCHNEID, E. Propriedades físicas da madeira termorretrificada de quatro folhosas. **Floresta e Ambiente**, [s. l.], v. 21, p. 99–107, mar. 2014. <https://doi.org/10.4322/floram.2014.008>.

DIAS JUNIOR, A. F.; LANA, A. Q.; SANTOS, P. V. D.; CARVALHO, A. M. D.; SOUZA, N. D. D.; BRITO, J. O. Propriedades físicas e acabamento superficial da madeira de eucalipto termicamente tratada. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, [s. l.], v. 58, n. 3, p. 270–276, 2015. <https://doi.org/10.4322/rca.2010>.

DUBEY, M. K. **Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil**. 2010. 191 f. Thesis (Doctor of philosophy in Forestry) – Universidade de Canterbury, Christchurch, 2010. Disponível em: [http://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/10092/3856/1/Thesis\\_fulltext.pdf](http://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/10092/3856/1/Thesis_fulltext.pdf). Acesso em: 12 maio 2025.

ELOY, E.; BANDERA, E.; MANGINI, T. D. S.; TREVISAN, R.; CANDATEN, L.; ZANCHETTA, L. D. S. Thermal modification influences the mechanical resistance of wood from forestry species. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 53, n. 3, p. e20210467, 2023. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210467>.

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

FANG, C.-H.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A. Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part II: Hygroscopicity and mechanical properties. **BioResources**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 925–935, 13 jan. 2012b. <https://doi.org/10.15376/biores.7.1.925-935>.

FANG, C.-H.; MARIOTTI, N.; CLOUTIER, A.; KOUBAA, A.; BLANCHET, P. Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 70, n. 1–3, p. 155–163, jan. 2012a. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0524-4>.

FEDORKOV, A. L. Wood quality estimation in tree breeding programmes (short literature review). **Biological and technological aspects of forestry**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 30–35, ago. 2023. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-4-30-35>.

FERREIRA, B. S. **Avaliação do desempenho de compensados de *Pinus taeda* submetidos a tratamento térmico e químico**. 2017. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/151720>. Acesso em: 21 abr. 2025.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I. D.; RANGEL, E. C. Efeito da termorretrificação na qualidade de colagem de lâminas de madeira para a produção de compensado. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 274–282, 2 abr. 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509831585>.

FERREIRA, M. D.; MELO, R. R. D.; ZAQUE, L. A. M.; STANGERLIN, D. M. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de angelim-pedra submetida a

tratamento térmico. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 3–7, 2019. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20191297>.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 9, p. 157–174, 8 jan. 2021. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212009000400525>.

FU, Q.; CLOUTIER, A.; LAGHDIR, A.; STEVANOVIC, T. Surface Chemical Changes of Sugar Maple Wood Induced by Thermo-Hygro-mechanical (THM) Treatment. **Materials**, [s. l.], v. 12, n. 12, p. 1946, jan. 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12121946>.

GARCIA, R. A.; DE OLIVEIRA LOPES, J.; DO NASCIMENTO, A. M.; DE FIGUEIREDO LATORRACA, J. V. Color stability of weathered heat-treated teak wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 453–462, out. 2014. .

GARCIA, R. A.; MARINONIO, G. B. Color Variation of the Teak Wood as a Function of Density and Extractive Content. **Floresta e Ambiente**, [s. l.], v. 23, p. 124–134, 12 fev. 2016. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035313>.

GAŠPARÍK, M.; GAFF, M.; KAČÍK, F.; SIKORA, A. Color and chemical changes in teak (*Tectona grandis* L. f.) and meranti (*Shorea* spp.) wood after thermal treatment. **BioResources**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 2667–2683, 13 fev. 2019. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.2667-2683>.

GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRABNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER, M.; ROZENBERG, P.; PÂQUES, L. E. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. **Trees**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 102–108, 1 jan. 2004. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0290-y>.

GODINHO, D.; ARAÚJO, S.; PAIVA, T.; FERREIRA, C.; QUILHÓ, T.; GOMINHO, J. Avaliação da resistência à exposição atmosférica de madeiras termo-modificadas. **8as Jornadas de Corrosão e Proteção de Materiais, Fórum Tecnológico, Lisboa, 24 novembro, 2022**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.ulisboa.pt/handle/10400.5/27936>. Acesso em: 21 abr. 2025.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. *In*: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. **H.Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: John Wiley & Sons, 1971. p. 241–266.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O papel**, [s. l.], v. 47, n. 8, p. 36–38, 1986. .

GONG, M.; LAMASON, C.; LI, L. Interactive effect of surface densification and post-heat-treatment on aspen wood. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 210, n. 2, p. 293–296, 19 jan. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.013>.

GONZÁLEZ-PEÑA, M. M.; HALE, M. D. C. Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 2: Property predictions from colour changes. [s. l.], v. 63, n. 4, p. 394–401, jul. 2009.

<https://doi.org/10.1515/HF.2009.077>.

GRININS, J.; ANDERSONS, B.; IRBE, I.; ANDERSONE, I.; MEIJA-FELDMANE, A.; JANBERGA, A.; PAVLOVICS, G.; SANSONETTI, E. Thermo-hydro treated (THT) birch veneers for producing plywood with improved properties. **Holzforschung**, [s. l.], v. 70, n. 8, seř. Holzforschung, p. 739–746, 1 ago. 2016. <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0155>.

GROOVER, A.; MANSFIELD, S. D. An introduction to a Virtual Issue on Wood Biology. **New Phytologist**, [s. l.], v. 225, n. 4, p. 1401–1403, 2020. <https://doi.org/10.1111/nph.16384>.

GULLÓN, P.; ROMANÍ, A.; VILA, C.; GARROTE, G.; PARAJÓ, J. C. Potential of hydrothermal treatments in lignocellulose biorefineries. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 219–232, mar. 2012. <https://doi.org/10.1002/bbb.339>.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; BAKALI, I. E.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. Wettability changes and mass loss during heat treatment of wood. [s. l.], v. 59, n. 1, seř. Holzforschung, p. 35–37, 1 jan. 2005. <https://doi.org/10.1515/HF.2005.006>.

HERRERA, R.; SANDAK, J.; ROBLES, E.; KRISTOFIAK, T.; LABIDI, J. Weathering resistance of thermally modified wood finished with coatings of diverse formulations. **Progress in Organic Coatings**, [s. l.], v. 119, p. 145–154, jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.02.015>.

HIDAYAT, W.; QI, Y.; JANG, J. H.; PARK, B. H.; BANUWA, I. S.; FEBRIANTO, F.; KIM, N. H. Color Change and Consumer Preferences towards Color of Heat-Treated Korean White Pine and Royal Paulownia Woods. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, [s. l.], v. 45, n. 2, p. 213–222, 25 mar. 2017. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2017.45.2.213>.

HIKITA, Y.; TOYODA, T.; AZUMA, M. Weathering testing of timber: discoloration. *In*: IMAMURA, Y. **High performance utilization of wood for outdoor uses**. Kyoto: Press-Net, 2001.

HILL, C. A. S. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2007.

HUANG, X.; KOCAEFE, D.; KOCAEFE, Y.; BOLUK, Y.; PICHETTE, A. Changes in wettability of heat-treated wood due to artificial weathering. **Wood Science and Technology**, [s. l.], v. 46, n. 6, p. 1215–1237, 1 nov. 2012. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0479-6>.

IBÁ, INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **relatorio 2024**. [S. l.]: Brasília: Ibá, 2024. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.

İMIRZI, H. Ö.; ÜLKER, O.; BURDURLU, E. Effect of Densification Temperature and Some Surfacing Techniques on the Surface Roughness of Densified Scots Pine (<math>Pinus sylvestris</math> L.). **BioResources**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 191–209, nov. 2013. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.191-209>.

INOUE, M.; NORIMOTO, M.; TANAHASHI, M.; ROWELL, R. M. Steam or heat fixation of compressed wood. **Wood and Fiber Science**, [s. l.], , p. 224–235, 1993. .

IWAKIRI, S.; STINGHEN, A. B. M.; SILVEIRA, E. L. D.; ZAMARIAN, E. H. C.; PRATA, J. G.; BRONOSKI, M. Influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados. **FLORESTA**, [s. l.], v. 38, n. 3, 30 set. 2008. DOI 10.5380/uf.v38i3.12414. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/12414>. Acesso em: 9 maio 2025.

JIROUŠ-RAJKOVIĆ, V.; MIKLEČIĆ, J. Heat-Treated Wood as a Substrate for Coatings, Weathering of Heat-Treated Wood, and Coating Performance on Heat-Treated Wood. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2019, n. 1, p. 8621486, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8621486>.

JUIZO, C. G. F.; ZEN, L. R.; KLITZKE, W.; FRANÇA, M. C.; CREMONEZ, V. G.; KLITZKE, R. J. Propriedades tecnológicas da madeira de eucalipto submetida ao tratamento térmico. **Nativa**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 537–542, 4 set. 2018. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i5.5666>.

KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F.; ČABALOVÁ, I.; ĎURKOVIČ, J. Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 144, p. 669–674, 1 set. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.110>.

KAČÍKOVÁ, D.; KUBOVSKÝ, I.; ULBRIKOVÁ, N.; KAČÍK, F. The Impact of Thermal Treatment on Structural Changes of Teak and Iroko Wood Lignins. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 10, n. 14, p. 5021, jan. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10145021>.

KADIVAR, M.; GAUSS, C.; GHAVAMI, K.; SAVASTANO, H. Densification of Bamboo: State of the Art. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 19, p. 4346, 29 set. 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13194346>.

KAMKE, F. A. Densified radiata pine for structural composites. **Maderas. Ciencia y tecnología**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 83–92, 2006. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2006000200002>.

KAMKE, F. A.; SIZEMORE, H. **Viscoelastic thermal compression of wood**. [S. l.: s. n.], 29 jul. 2008. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US7404422B2/en>. Acesso em: 20 abr. 2025.

KARIMI, K., & NOORI, M. Chemical and structural analysis of alkali pretreated pinewood for efficient ethanol production. **RSC Advances**. 2016; 6. <https://doi.org/10.1039/C6RA11486E>.

KARIZ, M.; KUZMAN, M. K.; SERNEK, M.; HUGHES, M.; RAUTKARI, L.; KAMKE, F. A.; KUTNAR, A. Influence of temperature of thermal treatment on surface densification of spruce. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 75, n. 1, p. 113–123, 1 jan. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1052-z>.

KECKES, J.; BURGERT, I.; FRÜHMANN, K.; MÜLLER, M.; KÖLLN, K.; HAMILTON,

M.; BURGHAMMER, M.; ROTH, S. V.; STANZL-TSCHEGG, S.; FRATZL, P. Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood. **Nature Materials**, [s. l.], v. 2, n. 12, p. 810–813, dez. 2003. <https://doi.org/10.1038/nmat1019>.

KHADEMI BAMI, L.; MOHEBBY, B. Bioresistance of poplar wood compressed by combined hydro-thermo-mechanical wood modification (CHTM): Soft rot and brown-rot. **International Biodeterioration & Biodegradation**, [s. l.], v. 65, n. 6, p. 866–870, 1 set. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.03.011>.

KIM, J. S.; LEE, Y. Y.; KIM, T. H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 199, p. 42–48, jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>.

KLEMENT, I.; VILKOVSKÁ, T.; VILKOVSKÝ, P. Effects of beech wood dimensions and quality on edge-glued boards yield. **BioResources**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 910–922, 27 nov. 2024. <https://doi.org/10.15376/biores.20.1.910-922>.

KORKUT, D. S.; KORKUT, S.; BEKAR, I.; BUDAKÇI, M.; DILIK, T.; ÇAKICIER, N. The Effects of Heat Treatment on the Physical Properties and Surface Roughness of Turkish Hazel (*Corylus colurna* L.) Wood. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. 1772–1783, set. 2008. <https://doi.org/10.3390/ijms9091772>.

KUTNAR, A.; SERNEK, M. Densification of wood. **Zbornik Gozdarstva in Lesarstva**, [s. l.], v. 82, p. 53–62, 1 jan. 2007.

LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS (LPF). Banco de Dados Madeiras Brasileiras. Disponível em: <https://lpf.florestal.gov.br/ptbr/banco-de-dados-madeiras-brasileiras-selecao> (acesso em 18 maio 2024).

LACERDA, T. M.; ZAMBON, M. D.; FROLLINI, E. Ácido oxálico como catalisador para a hidrólise da polpa de *sisal*. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 71, p. 163–172, 1 set. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.072>.

LAINE, K.; BELT, T.; RAUTKARI, L.; RAMSAY, J.; HILL, C. A. S.; HUGHES, M. Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 48, n. 24, p. 8530–8538, dez. 2013. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7671-4>.

LAINE, K.; RAUTKARI, L.; HUGHES, M. The effect of process parameters on the hardness of surface densified Scots pine solid wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 71, n. 1, p. 13–16, jan. 2013. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0649-0>.

LAINE, K.; SEGERHOLM, K.; WÅLINDER, M.; RAUTKARI, L.; HUGHES, M. Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology. **Wood Science and Technology**, [s. l.], v. 50, n. 5, p. 883–894, set. 2016. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0835-z>.

LAMASON, C.; GONG, M. Optimization of pressing parameters for mechanically surface-densified aspen. **Forest Products Journal**, [s. l.], v. 57, n. 10, 2007.

LASKOWSKA, A. The Influence of Process Parameters on the Density Profile and Hardness of Surface-densified Birch Wood (*Betula pendula* Roth). **BioResources**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 6011–6023, 6 jul. 2017. <https://doi.org/10.15376/biores.12.3.6011-6023>.

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; NISGOSKI, S.; BOLZON DE MUÑIZ, G. I.; KLOCK, U.; LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; NISGOSKI, S.; BOLZON DE MUÑIZ, G. I.; KLOCK, U. Properties of thermally modified teakwood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, [s. l.], v. 23, 2021. DOI 10.4067/s0718-221x2021000100410.

LI, J., HAN, X., YAO, S., GUO, D., & CHU, F. Reinforcing flame retardancy, dimensional stability, and high strength of woods for structural applications through surface densification and chemical modification. **Industrial Crops and Products**. 2025 <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120175>.

LI, J.; CHEN, C.; ZHU, J. Y.; RAGAUSKAS, A. J.; HU, L. In Situ Wood Delignification toward Sustainable Applications. **Accounts of Materials Research**, [s. l.], v. 2, n. 8, p. 606–620, 27 ago. 2021. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.1c00075>.

LIMA, A. F. **Estudo da pré-hidrólise de madeira: influência de algumas variáveis e cinética química**. 1981. Master's Thesis – Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 1981.

LIMA, I. da S.; MONTEIRO, F. C.; SOARES, R. R. Potencial de utilização da glicerina bruta no pré-tratamento de biomassas florestais residuais. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, [s. l.], v. 22, n. 8, p. e6234–e6234, 12 ago. 2024. <https://doi.org/10.55905/oelv22n8-093>.

LOBATO, C. C. S.; VALE, I. D.; SOUZA, L. M. de; ABREU, J. L. L. de; FERREIRA, G. C.; BUFALINO, L. Densidade básica e estabilidade dimensional de madeiras tropicais modificadas por tratamentos térmicos. **Nativa**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 708–714, 11 nov. 2020. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i5.10630>.

LOPES, J. D. O.; GARCIA, R. A.; NASCIMENTO, A. M. D.; LATORRACA, J. V. D. F. Uniformização da cor da madeira jovem de teca pela termorreificação. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 561–568, jun. 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300019>.

LYNAM, J. G.; CORONELLA, C. J.; YAN, W.; REZA, M. T.; VASQUEZ, V. R. Acetic acid and lithium chloride effects on hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 102, n. 10, p. 6192–6199, 1 maio 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.035>.

MACEDO, L. B. de; FERRO, F. S.; VARANDA, L. D.; CAVALHEIRO, R. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 19, p. 674–679, jul. 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p674-679>.

MAHNERT, K.-C.; ADAMOPOULOS, S.; KOCH, G.; MILITZ, H. Topochemistry of

heat-treated and N-methylol melamine-modified wood of koto (*Pterygota macrocarpa* K. Schum.) and limba (*Terminalia superba* Engl. et . Diels). **hfsfg**, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 137–146, 1 fev. 2013. <https://doi.org/10.1515/hf-2012-0017>.

MANGINI, T. de S.; CANDATEN, L.; BANDERA, E.; ZANCHETTA, L. da S.; TREVISAN, R.; ELOY, E. Características anatômicas da madeira de *Handroanthus cryshotchus* submetida ao processo de modificação térmica. **Advances in Forestry Science**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 1403–1408, 1 set. 2021. <https://doi.org/10.34062/afs.v8i2.10555>.

MARENČE, J.; ŠEGA, B.; GORNIK BUČAR, D. Monitoring the Quality and Quantity of Beechwood from Tree to Sawmill Product. **Croatian journal of forest engineering**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 119–128, 31 jan. 2020. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.613>.

MARINI, L. J.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus* sp. pela colorimetria. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 21, p. 149–160, 13 nov. 2020. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100499>.

MARTHA, R.; BASRI, E.; SETIONO, L.; BATUBARA, I.; RAHAYU, I. S.; GÉRARDIN, P.; DARMAWAN, W. The effect of heat treatment on the characteristics of the short rotation teak. **International Wood Products Journal**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 218–227, 1 ago. 2021. <https://doi.org/10.1080/20426445.2021.1953723>.

MARTÍN, C.; DIXIT, P.; MOMAYEZ, F.; JÖNSSON, L. J. Hydrothermal Pretreatment of Lignocellulosic Feedstocks to Facilitate Biochemical Conversion. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, [s. l.], v. 10, 16 fev. 2022. DOI 10.3389/fbioe.2022.846592.

MATURANA, J. C.; GUINDOS, P.; LAGOS, J.; ARROYAVE, C.; ECHEVERRÍA, F.; CORREA, E. Two-step hot isostatic pressing densification achieved non-porous fully-densified wood with enhanced physical and mechanical properties. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 14324, 31 ago. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41342-8>.

MEDEIROS, D. T. D.; BATISTA, F. G.; MELO, R. R. D.; MASCARENHAS, A. R. P.; PEDROSA, T. D. Alterações físico-mecânicas na madeira de cambará (*Qualea paraensis*) termorretrificada. **Madera y Bosques**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. e2722176, 22 dez. 2021. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722176>.

MELO, R. R. de; SILVA, A. G. da M. F. e; SABINO, M.; STANGERLIN, D. M.; BATISTA, F. G.; SOUZA, M. J. C. de. Efeito do tratamento térmico sobre a resistência da madeira de cambará a cupins subterrâneos. **Revista de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 786–791, 13 ago. 2019. <https://doi.org/10.19084/rca.17079>.

MESQUITA DO VALE, L. **Efeito da termodensificação e do pós-tratamento térmico sobre propriedades da madeira de *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.** 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2020.

MIFTIEVA, E.; GAFF, M.; SVOBODA, T.; BABIAK, M.; GAŠPARÍK, M.; RUMAN, D.; SUCHOPÁR, M. Effects of Selected Factors on Bending Characteristics of Beech Wood. **BioResources**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 599–611, 24 nov. 2015. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.599-611>.

MILLANIYAGE, K.; KOTLAREWSKI, N.; WALLIS, L.; TAOUM, A.; NOLAN, G. Janka Hardness Evaluation of Plantation-Grown Eucalyptus nitens for Engineered Flooring Applications. **Buildings**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 1862, nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12111862>.

MOHEBBY, B.; GORBANI-KOKANDEH, M.; SOLTANI, M. Springback in acetylated wood based composites. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 23, n. 9, p. 3103–3106, 1 set. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.007>.

MORESCHI, J.C., *Propriedades da madeira*, Curitiba, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 2012

MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; CARDOSO, M. das G. Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Food Science and Technology**, [s. l.], v. 23, p. 396–400, dez. 2003. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612003000300018>.

MORSING, N. **Densification of Wood.: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to grain**. Lyngby, Dinamarca: Technical University of Denmark – Department of Structural Engineering and Materials, 2000. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/files/5301406/Morsing.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

MOYA, R.; FALLAS, R. S.; BONILLA, P. J.; TENORIO, C. Relationship Between Wood Color Parameters Measured by the CIELab System and Extractive and Phenol Content in *Acacia mangium* and *Vochysia guatemalensis* from Fast-Growth Plantations. **Molecules**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 3639–3652, abr. 2012. <https://doi.org/10.3390/molecules17043639>.

NAMARI, S.; DROSKY, L.; PUDLITZ, B.; HALLER, P.; SOTAYO, A.; BRADLEY, D.; MEHRA, S.; O'CEALLAIGH, C.; HARTE, A. M.; EL-HOUJEYRI, I.; OUDJENE, M.; GUAN, Z. Mechanical properties of compressed wood. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 301, p. 124269, 27 set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124269>.

NAVI, P.; PITTET, V.; PLUMMER, C. J. G. Transient moisture effects on wood creep. **Wood Science and Technology**, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 447–462, 1 dez. 2002. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0157-1>.

NAVI, Parviz; PIZZI, A. Property changes in thermo-hydro-mechanical processing: COST Action FP0904 2010–2014: Thermo-hydro-mechanical wood behavior and processing. **Holzforschung**, [s. l.], v. 69, n. 7, seq. Holzforschung, p. 863–873, 1 set. 2015. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0198>.

OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying—A review.

**BioResources**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 789–811, 2007. .

PELIT, Hüseyin. Colour characteristics of densified and thermally post-treated beech and pine woods. **Mugla Journal of Science and Technology**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 187–192, 19 dez. 2016. <https://doi.org/10.22531/muglajsci.283644>.

PELIT, Hüseyin; BUDAKÇI, M.; SÖNMEZ, A. Density and some mechanical properties of densified and heat post-treated Uludağ fir, linden and black poplar woods. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 76, n. 1, p. 79–87, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1182-y>.

PELIT, Hüseyin; SÖNMEZ, A.; BUDAKÇI, M. Effects of Thermomechanical Densification and Heat Treatment on Density and Brinell Hardness of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Eastern Beech (*Fagus orientalis* L.). **BIORESOURCES**, [s. l.], v. 10, n. 2, 2015. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.3097-3111>.

PELIT, Hüseyin; SÖNMEZ, A.; BUDAKÇI, M. Effects of ThermoWood® Process Combined with Thermo-Mechanical Densification on some Physical Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). **BioResources**, [s. l.], v. 9, n. 3, 2014.

PELIT, Hüseyin; YORULMAZ, R. Influence of densification on mechanical properties of thermally pretreated spruce and poplar wood. **BioResources**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 9739–9754, 25 out. 2019. <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.9739-9754>.

PEREIRA, C. A. B.; TRINDADE, C. A. Comparação entre o módulo de elasticidade da madeira peroba do norte na flexão de peças estruturais e na compressão em corpos de prova. **Caderno dos Trabalhos de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil • ECIV/FAENG/UFMS**, [s. l.], , p. 1–11, 2023. .

PERTUZZATTI, A.; CONTE, B.; MISSIO, A. L.; SOARES, A. K.; GUMA, R. L.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Alterações físicas e superficiais da madeira de canemaçu (*Tetrorchidium rubrivenium*) termorretrificada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 140–146, 27 mar. 2015. <https://doi.org/10.5039/agraria.v10i1a4999>.

PERTUZZATTI, A.; MISSIO, A. L.; DE CADEMARTORI, P. H. G.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; BERGER, C.; GATTO, D. A.; TONDI, G. Effect of process parameters in the thermomechanical densification of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* fast-growing wood. [s. l.], 2018. <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1576-1590>.

QUAN, C.; GAO, N.; SONG, Q. Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and product characterization. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 121, p. 84–92, 1 set. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.07.005>.

RAMANANANTOANDRO, T.; RAMANAKOTO, M. F.; RAJEMISON, A. H.; EYMA, F. Relationship between density and aesthetic attributes of wood and preference of Malagasy consumers. **Annals of Forest Science**, [s. l.], v. 70, n. 6, p. 649–658, set. 2013. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0299-3>.

RAUTKARI, L.; KUTNAR, A.; HUGHES, M.; KAMKE, F. Wood surface densification using different methods. **11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010**, [s. l.], v. 4, 1 jan. 2010a.

RAUTKARI, L.; PROPERZI, M.; PICHELIN, F.; HUGHES, M. Properties and set-recovery of surface densified Norway spruce and European beech. **Wood Science and Technology**, [s. l.], v. 44, n. 4, p. 679–691, 1 nov. 2010b. <https://doi.org/10.1007/s00226-009-0291-0>.

RODRIGUEZ-ZACCARO, F. D.; GROOVER, A. Wood and water: How trees modify wood development to cope with drought. **PLANTS, PEOPLE, PLANET**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 346–355, 2019. <https://doi.org/10.1002/ppp3.29>.

SADATNEZHAD, S. H.; KHAZAEIAN, A.; SANDBERG, D.; TABARSA, T. Continuous Surface Densification of Wood: A New Concept for Large-scale Industrial Processing. **BioResources**, [s. l.], v. 12, n. 2, 2017. .

SAHA, B. C.; YOSHIDA, T.; COTTA, M. A.; SONOMOTO, K. Hydrothermal pretreatment and enzymatic saccharification of corn stover for efficient ethanol production. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 44, p. 367–372, 1 jan. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.11.025>.

SANDBERG, D.; HALLER, P.; NAVI, P. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. **Wood Material Science & Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 64–88, 2012. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>.

SANDOVAL-TORRES, S.; JOMAA, W.; MARC, F.; PUIGGALI, J.-R. Causes of color changes in wood during drying. **Forestry Studies in China**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 167–175, 1 set. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11632-010-0404-8>.

SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H.; DE SOUZA, M. R. Properties of thermomechanically treated wood from *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **BioResources**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 1850–1865, mar. 2012. <https://doi.org/10.15376/biores.7.2.1850-1865>.

SANTOS, I. D. Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e na contração da madeira e no rendimento e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado. 2008. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, Brasília-DF, 2008.

SANTOS, T. M.; ALONSO, M. V.; OLIET, M.; DOMÍNGUEZ, J. C.; RIGUAL, V.; RODRIGUEZ, F. Efeito da auto-hidrólise na madeira de *Pinus radiata* para extração de hemicelulose. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 194, p. 285–293, 15 ago. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.010>.

SATO, S.; YAMAMOTO, S.; TORISU, S.; FUKAYA, M.; TAWARA, Y.; TANAKA, K.; FLORIAN, K. Numerically reproduced HE-E experiment of Mont Terri project by Thermo-Hydro-Mechanical coupled model. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 195, p. 04015, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019504015>.

SCHIEPPATI, D.; PATIENCE, N. A.; GALLI, F.; DAL, P.; SECK, I.; PATIENCE, G. S.; FUOCO, D.; BANQUY, X.; BOFFITO, D. C. Chemical and Biological Delignification of Biomass: A Review. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 62, n. 33, p. 12757–12794, 23 ago. 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01231>.

SCHNABEL, T.; ZIMMER, B.; PETUTSCHNIGG, A. J.; SCHÖNBERGER, S. An approach to classify thermally modified hardwoods by color. **Forest Products Journal**, [s. l.], v. 57, n. 9, p. 105, 2007.

SCHULZ, H. R.; ACOSTA, A. P.; BARBOSA, K. T.; GALLIO, E.; BELTRAME, R.; 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, 2020. <https://doi.org/10.5380/biofix.v5i1.68111>.

SHEN, D.; ZHANG, L.; XUE, J.; GUAN, S.; LIU, Q.; XIAO, R. Thermal degradation of xylan-based hemicellulose under oxidative atmosphere. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 127, p. 363–371, ago. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.067>.

SHI, J., PENG, J., HUANG, Q., SHI, S. Fabrication of densified wood via synergy of chemical pretreatment, hot-pressing and post mechanical fixation. *J Wood Sci* **66**, 5 (2020). <https://doi.org/10.1186/s10086-020-1853-x>

SHI, J.; LU, Y.; ZHANG, Y.; CAI, L.; SHI, S. Q. Effect of thermal treatment with water, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH aqueous solution on color, cell wall and chemical structure of poplar wood. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 17735, 7 dez. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36086-9>.

SILVA, B. M. da; BARBOSA, J. de A.; RANZINI, M.; LIMA, I. L. D. Efeito do tempo de modificação térmica nas propriedades da madeira de *Pinus patula* Schl. Et Cham. **Revista Scientia Rural - ISSN 2178-3608**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 39–50, 28 jan. 2021.

SILVA, C. M. S. da. **Pré-hidrólise e densificação termomecânica da madeira de pinus**. 2019. 71 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2019. Disponível em: [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV\\_78d18e2a2334bade03bb102450605888](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV_78d18e2a2334bade03bb102450605888). Acesso em: 19 abr. 2025.

SILVA MORAIS, A. P.; SANSÍGOLO, C. A.; DE OLIVEIRA NETO, M. Effects of autohydrolysis of *Eucalyptus urograndis* and *Eucalyptus grandis* on influence of chemical components and crystallinity index. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 214, p. 623–628, 1 ago. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.124>.

SIQUEIRA, G.; ARANTES, V.; SADDLER, J. N.; FERRAZ, A.; MILAGRES, A. M. F. Limitation of cellulose accessibility and unproductive binding of cellulases by pretreated sugarcane bagasse lignin. **Biotechnology for Biofuels**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 176, dez. 2017. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0860-7>.

SKYBA, O. **Durability and physical properties of thermo-hygro-mechanically (THM)-densified wood**. 2008. 154 f. Tese (Doutorado em Ciências) – ETH Zurich, Zurique, 2008. Disponível em: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/150676/eth-30841-02.pdf>. Acesso

em: 20 abr. 2025.

SŁUPIANEK, A.; KASPROWICZ-MALUŚKI, A.; MYŚKOW, E.; TURZAŃSKA, M.; SOKOŁOWSKA, K. Endocytosis acts as transport pathway in wood. **New Phytologist**, [s. l.], v. 222, n. 4, p. 1846–1861, 2019. <https://doi.org/10.1111/nph.15637>.

SONG, J.; CHEN, C.; ZHU, S.; ZHU, M.; DAI, J.; RAY, U.; LI, Y.; KUANG, Y.; LI, Y.; QUISPE, N.; YAO, Y.; GONG, A.; LEISTE, U. H.; BRUCK, H. A.; ZHU, J. Y.; VELLORE, A.; LI, H.; MINUS, M. L.; JIA, Z.; MARTINI, A.; LI, T.; HU, L. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. **Nature**, [s. l.], v. 554, n. 7691, p. 224–228, fev. 2018. <https://doi.org/10.1038/nature25476>.

SRIVARO, S.; LIM, H.; LI, M.; JANTAWEE, S.; TOMAD, J. Effect of compression ratio and original wood density on pressing characteristics and physical and mechanical properties of thermally compressed coconut wood. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 299, p. 124272, 13 set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124272>.

STEFANIDIS, S. D.; KALOGIANNIS, K. G.; ILIOPOULOU, E. F.; MICHAILOF, C. M.; PILAVACHI, P. A.; LAPPAS, A. A. A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 105, p. 143–150, 1 jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.013>.

STRAGLIOTTO, M.; BRITO, D. Y. O. D.; DI CARVALHO, M. A.; SANTOS JÚNIOR, J. A. D.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. D. Potencial da Densificação Termomecânica da Madeira. **Tópicos Especiais em Engenharia Florestal - Volume 1**. 1. ed. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2024. p. 196–209. DOI 10.37885/240416466.

TABARSA, T.; CHUI, Y. H. Effects of hot-pressing on properties of white spruce. **Forest Products Journal**, [s. l.], v. 47, n. 5, p. 71, 1997. .

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 264 cm-97. Preparation of wood for chemical analysis**, n. T 264 cm-97. Atlanta: Tappi Press, 1997a.

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T257 om-85. Sampling and preparing wood for analysis**, n. T257 om-85. Atlanta: Tappi Press, 1985.

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 222 om-97: Acid-insoluble lignin in wood and pulp**, n. TAPPI T 222 om-97. Atlanta: Tappi Press, 1997b.

TE MOLDER, T. D. J.; KERSTEN, S. R. A.; LANGE, J.-P.; RUIZ, M. P. From Woody Biomass to Ethylene Glycol: Inorganics Removal Boosts the Yield. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 60, n. 37, p. 13515–13522, 22 set. 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02353>.

TEIXEIRA, S. D.; FIORIO, J. L.; GALVAN, D.; SEFSTROM, C.; COGO, P. M.; SALES, V.; RODRIGUES, M. B.; HENDGES, A. P. P. K.; MAIA, B. H. L. de N. S.; BENGHI, T. G. S. Investigation on chemical composition and optimization of essential oil obtainment from waste *Pinus taeda* L. using hydrodistillation. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 59, 7 jun. 2016. DOI <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2016150043>.

TIAN, D.; CHANDRA, R. P.; LEE, J.-S.; LU, C.; SADDLER, J. N. A comparison of various lignin-extraction methods to enhance the accessibility and ease of enzymatic hydrolysis of the cellulosic component of steam-pretreated poplar. **Biotechnology for Biofuels**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 157, dez. 2017. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0846-5>.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, [s. l.], v. 63, n. 2, p. 102–111, abr. 2005. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0532-8>.

TODOROVIĆ, N.; POPOVIĆ, Z.; MILIĆ, G.; POPADIĆ, R. Estimation of heat-treated beechwood properties by color change. **BioResources**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 799–815, 6 jan. 2012. <https://doi.org/10.15376/biores.7.1.799-815>.

TONDI, G.; WIELAND, S.; WIMMER, T.; THEVENON, M. F.; PIZZI, A.; PETUTSCHNIGG, A. Tannin-boron preservatives for wood buildings: mechanical and fire properties. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 70, n. 5, p. 689–696, set. 2012. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0603-1>.

TOPANOTTI, L. R.; VAZ, D. R.; CARVALHO, S. D. P. C. E.; RIOS, P. D.; TOMAZELLO-FILHO, M.; DOBNER JR, M.; NICOLETTI, M. F. Growth and wood density of *Pinus taeda* L. as affected by shelterwood harvest in a two-aged stand in Southern Brazil. **European Journal of Forest Research**, [s. l.], v. 140, n. 4, p. 869–881, ago. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01372-1>.

TRIBOT, A.; AMER, G.; ABDOU ALIO, M.; DE BAYNAST, H.; DELATTRE, C.; PONS, A.; MATHIAS, J.-D.; CALLOIS, J.-M.; VIAL, C.; MICHAUD, P.; DUSSAP, C.-G. Wood-lignin: Supply, extraction processes and use as bio-based material. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 112, p. 228–240, 1 mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.01.007>.

TU, D.; SU, X.; ZHANG, T.; FAN, W.; ZHOU, Q. Thermo-mechanical Densification of *Populus tomentosa* var. *tomentosa* with Low Moisture Content. **BioResources**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 3846–3856, 8 maio 2014. <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.3846-3856>.

ULKER, O.; IMIRZI, O.; BURDURLU, E. The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **BioResources**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 5581–5592, 4 out. 2012. <https://doi.org/10.15376/biores.7.4.5581-5592>.

UNSAI, O.; AND CANDAN, Z. Moisture Content, Vertical Density Profile and Janka Hardness of Thermally Compressed Pine Wood Panels as a Function of Press Pressure and Temperature. **Drying Technology**, [s. l.], v. 26, n. 9, p. 1165–1169, 22

ago. 2008. <https://doi.org/10.1080/07373930802266306>.

UNSAI, O.; CANDAN, Z.; KORKUT, S. Wettability and roughness characteristics of modified wood boards using a hot-press. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 1455–1457, 1 nov. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.04.024>.

WAHYU, H.; JANG, J. H.; PARK, S. H.; QI, Y.; FEBRIANTO, F.; LEE, S. H.; KIM, N. H. Effect of Temperature and Clamping during Heat Treatment on Physical and Mechanical Properties of Okan (*Cylicodiscus gabunensis* [Taub.] Harms) Wood. **BioResources**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 6961–6974, 31 ago. 2015. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.6961-6974>.

WAKERLEY, D. W.; KUEHNEL, M. F.; ORCHARD, K. L.; LY, K. H.; ROSSER, T. E.; REISNER, E. Solar-driven reforming of lignocellulose to H<sub>2</sub> with a CdS/CdOx photocatalyst. **Nature Energy**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 1–9, 13 mar. 2017. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.21>.

WAN, Q.; LI, X.; ZHANG, Y.; SONG, S.; KE, Q. Visual perception of different wood surfaces: an event-related potentials study. **Annals of Forest Science**, [s. l.], v. 78, n. 2, p. 25, jun. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01026-7>.

WANG, Jiawei; MINAMI, E.; ASMADI, M.; KAWAMOTO, H. Effect of delignification on thermal degradation reactivities of hemicellulose and cellulose in wood cell walls. **Journal of Wood Science**, [s. l.], v. 67, n. 1, p. 19, dez. 2021. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01952-0>.

WANG, Junfeng; YANG, K.; LI, W.; WANG, X.; VAN DEN BULCKE, J.; VAN ACKER, J. The Impact of Earlywood and Latewood on the Compressive Stress of Thermally Modified Douglas Fir. **Forests**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 1376, 5 jul. 2023. <https://doi.org/10.3390/f14071376>.

WANG, X.; HOU, Q.; ZHANG, X.; ZHANG, Y.; LIU, W.; XU, C.; ZHANG, F. Color evolution of poplar wood chips and its response to lignin and extractives changes in autohydrolysis pretreatment. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 157, p. 673–679, ago. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.224>.

WELZBACHER, C. R.; WEHSENER, J.; RAPP, A. O.; HALLER, P. Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce (*Picea abies* Karst) in industrial scale – Dimensional stability and durability aspects. **Holz als Roh- und Werkstoff**, [s. l.], v. 66, n. 1, p. 39–49, fev. 2008. <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0198-0>.

WERNER, K.; POMMER, L.; BROSTRÖM, M. Thermal decomposition of hemicelluloses. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 110, p. 130–137, nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.08.013>.

WIEDENHOEFT, A. C.; MILLER, R. B. Structure and function of wood. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005. p. 9–33. Disponível em: [https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf2005/fpl\\_2005\\_wiedenhoeft001.pdf](https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf2005/fpl_2005_wiedenhoeft001.pdf). Acesso em: 22 abr. 2025.

WILLIAMS, R. S. Finishing of Wood. *In*: FOREST PRODUCTS LABORATORY (ed.). **Wood handbook: Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI, Chapter 16: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 1–39.

WOLCOTT, M. P.; KAMKE, F. A.; DILLARD, D. A. Fundamentals of Flakeboard Manufacture: Viscoelastic Behavior of the Wood Component. **Wood and Fiber Science**, [s. l.], , p. 345–361, 1990. .

XIE, Y.; FU, Q.; WANG, Q.; XIAO, Z.; MILITZ, H. Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, [s. l.], v. 71, n. 4, p. 401–416, jul. 2013. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0693-4>.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, [s. l.], v. 86, n. 12, p. 1781–1788, 1 ago. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>.

YIN, J.; YUAN, T.; LU, Y.; SONG, K.; LI, H.; ZHAO, G.; YIN, Y. Effect of compression combined with steam treatment on the porosity, chemical composition and cellulose crystalline structure of wood cell walls. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 155, p. 163–172, jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.08.013>.

YOON, S.-Y.; HAN, S.-H.; SHIN, S.-J. The effect of hemicelluloses and lignin on acid hydrolysis of cellulose. **Energy**, [s. l.], v. 77, p. 19–24, 1 dez. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.104>.

ZAMORA, H. Z. Produção simultânea de hemi(celulases) e açúcares redutores por *Pleurotus ostreatus* utilizando resíduos de *Alstroemeria* sp. 2017. Universidade Federal de Uberlândia, 2017. DOI 10.14393/ufu.di.2017.134.

ZENID, G. J.; CECCANTINI, G. C. T. **Identificação macroscópica de madeiras**. São Paulo - SP: IPT, 2007.

ZHANG, H.; FU, S.; CHEN, Y. Basic understanding of the color distinction of lignin and the proper selection of lignin in color-depended utilizations. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 147, p. 607–615, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.105>.

ZHANG, P.; GAO, J.; LIU, F.; CHEN, Y.; PENG, Y. Study on the Discoloration Mechanism of Eucalyptus Wood during Thermal Treatment in Different Media. **Polymers**, [s. l.], v. 15, n. 7, p. 1599, jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15071599>.

ZHANG, X.; LI, L.; XU, F. Chemical Characteristics of Wood Cell Wall with an Emphasis on Ultrastructure: A Mini-Review. **Forests**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 439, mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/f13030439>.