

**NIDIA NIELA DE LIMA**

**EXTRATOS TÂNICOS COMO PRESERVATIVO PARA MADEIRA  
TERMODENSIFICADA DE PINUS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Vinícius Resende de Castro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

L732e  
2021 Lima, Nídia Niela de, 1994-  
Extratos tânicos como preservativo para madeira  
termodensificada de pinus / Nídia Niela de Lima. – Viçosa, MG,  
2021.

1 dissertação eletrônica (75 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Vinicius Resende de Castro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2021.

Referências bibliográficas: f. 58-75.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.055>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Madeira - Preservativos. 2. Taninos. 3. Biodegradação.  
4. Madeira - Tratamento térmico. I. Castro, Vinicius Resende de,  
1986-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência  
Florestal. III. Título.

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.98411

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

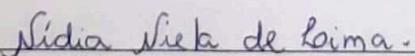
NÍDIA NIELA DE LIMA

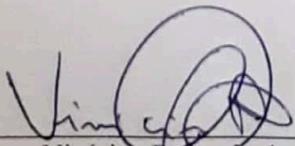
EXTRATOS TÂNICOS COMO PRESERVATIVO PARA MADEIRA  
TERMODENSIFICADA DE PINUS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 03 de dezembro de 2021

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Nidia Niela de Lima  
Autora

  
\_\_\_\_\_  
Vinícius Resende de Castro  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por fazer possível essa grande realização pessoal e profissional, mesmo em meio a um período difícil como o da pandemia.

Aos meus pais Lília Niela e Josemário de Lima, não só agradeço o amor e cuidados, como dedico este trabalho e todas as minhas realizações.

Ao meu avô José Lima, pelo incentivo e amor incondicional.

Aos meus irmãos Mabí Niela e Lauro Niela, por todo apoio e carinho.

Aos meus sobrinhos, Davi Figueiredo, Maria Niela e Rudá Niela, por serem meus grandes motivos de alegria.

Ao meu namorado Ítalo Nunes, pelo amor, parceria, apoio e cuidados.

Aos amigos que fiz durante o mestrado, Frances, Nayara e Gabriel, que não mediram esforços para ajudar em vários momentos.

Ao meu orientador, professor Vinícius Resende de Castro, que acreditou na minha capacidade como pesquisadora e que muito me ensinou.

Às professoras Cássia Carneiro e Ana Márcia Ladeira, por toda disponibilidade para esclarecer qualquer dúvida, além do acolhimento no LAPEM e LCP.

Aos professores Iara Demuner e Antônio Vinha, por aceitarem contribuir com meu trabalho e participar da banca.

Ao Miguel da Silva por ter ensinado todo o processo de densificação de madeira, que foi essencial para a realização do trabalho. E ao Welliton Cândido pela ajuda.

Aos técnicos do LAPEM, LPM e LCP, em especial a Leila, Wellington, Bráulio, Fernanda, Lawrence, Edna e Cássio pela colaboração.

Ao Paulinho pela disponibilidade para a produção das amostras na Serraria e Marcenaria da UFV.

À professora Renata Lopes e seu orientado Tiago Guimarães do Departamento de Química-UFV, pelas análises realizadas.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-graduação pela estrutura e apoio concedidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte e concessão da bolsa de estudos.

## RESUMO

LIMA, Nídia Niela de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2021. **Extratos tânicos como preservativo para madeira termomecânica de pinus**. Orientador: Vinícius Resende de Castro.

O objetivo geral do estudo foi avaliar a eficiência de extratos tânicos de *Acacia mearnsii* no tratamento de madeiras de pinus densificada termomecânica, em relação às propriedades químicas, físicas, mecânicas, anatômicas e de resistência biológica aos organismos xilófagos. Madeiras da espécie *Pinus elliottii* com dimensões 7,0 cm x 3,3 cm x 27 cm foram pré-tratadas com ácido oxálico em reator Par à temperatura de 120 °C por 90 minutos, e em seguida tratadas por difusão em soluções de taninos nas concentrações 5, 10 e 15%, e por fim, prensadas a 150 °C por 60 minutos. Propriedades químicas (teor de holoceluloses, lignina, extrativos, cinzas e FT-IR), físicas (retratibilidade, densidade aparente pelo método da balança hidrostática e por raios X, e permeabilidade), mecânicas (resistência a flexão estática, compressão paralela às fibras e dureza Janka), anatômicas (microscopia eletrônica de varredura) e resistência biológica da madeira a cupins de madeira seca (*Cryptotermes brevis*), foram avaliadas. A presença de taninos nas amostras de madeira modificada não foi identificada pela análise FT-IR. Houve redução da higroscopicidade e da permeabilidade da madeira modificada em relação ao pinus *in natura*. A densidade aparente da madeira modificada foi 87,8% maior em relação a madeira *in natura* para o tratamento na concentração de taninos de 15%. A resistência mecânica das madeiras modificadas aumentou para madeiras tratadas com taninos na concentração de 15%. Houve aumento da mortalidade dos cupins de madeira seca (*Cryptotermes brevis*) e redução do dano das madeiras modificadas tratadas com taninos na concentração de 15%. De maneira geral, as madeiras tratadas com taninos na concentração de 15% obtiveram os melhores resultados de resistência mecânica, biológica a cupins de madeira seca e para os parâmetros físicos. A madeira de pinus densificada e preservada com extrativos tânicos mostrou-se uma alternativa tecnologicamente viável como material construtivo de alto desempenho.

**Palavras-chave:** Biodeterioração. Densificação termomecânica. Modificação da madeira. Preservante. Taninos.

## ABSTRACT

LIMA, Nídia Niela de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December 2021. **Tannic extracts as a preservative for thermo-densified pine wood.** Advisor: Vinícius Resende de Castro.

The general objective of the study was to evaluate the efficiency of tannic extracts of *Acacia mearnsii* in the treatment of thermomechanically densified pine wood, in relation to physical, mechanical, anatomical and biological resistance properties to xylophagous organisms. *Pinus elliottii* wood with dimensions 7.0 cm x 3.3 cm x 27 cm were pretreated with oxalic acid in a Par reactor at 120 °C for 90 minutes, and then treated by diffusion in tannin solutions at concentrations 5, 10 and 15%, and finally, pressed at 150 °C for 60 minutes. Chemical properties (holocelluloses, lignin, extractives and ash contents and FT-IR), physical (shrinkage, apparent density by the hydrostatic balance and X-ray method, and permeability), mechanical (strength to static bending, compression parallel to the fibers and Janka hardness), anatomical (scanning electron microscopy) and biological resistance of wood to dry wood termites (*Cryptotermes brevis*) were evaluated. The presence of tannins in the modified wood samples was not detected by the FT-IR analysis. There was an increase in hygroscopicity and a reduction in permeability of modified wood compared to untreated pine. The bulk density of modified wood was 87.8% higher than that of untreated pine wood for treatment with concentration of tannins of 15%. The mechanical strength of modified wood increased mainly for wood treated with tannins at a concentration of 15%. There was an increase in the mortality of drywood termites (*Cryptotermes brevis*) and a reduction in the damage of modified woods treated with tannins at a concentration of 15%. In general, woods treated with tannins at a concentration of 15% had the best results in terms of mechanical resistance, biological resistance to dry wood termites and physical parameters. Pine wood densified and preserved with tannic extractives has been identified as a technologically viable alternative as a high-performance constructive material.

**Keywords:** Biodeterioration. Preservative. Tannins. Thermo-mechanical densification. Wood modification.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	8
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	9
2.1 OBJETIVO GERAL.....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	9
3.1 GÊNERO <i>PINUS</i> E A MADEIRA ENGENHEIRADA.....	9
3.1.1 Características tecnológicas das madeiras do gênero <i>Pinus</i> .....	11
3.1.1.2 Estabilidade dimensional e permeabilidade da madeira de <i>Pinus</i> .....	14
3.2 DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA MADEIRA.....	16
3.3 BIODETERIORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DE MADEIRA DE PINUS.....	18
3.3.1 Taninos.....	19
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	21
4.1 MODIFICAÇÃO DA MADEIRA DE PINUS.....	21
4.2 HIDRÓLISE ÁCIDA.....	22
4.3 TRATAMENTO PRESERVATIVO.....	22
4.3.1 Taninos.....	22
4.4 DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA.....	23
4.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA.....	24
4.5.1 Análise de espectros FT-IR.....	25
4.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	25
4.7 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA.....	25
4.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	27
4.9 ENSAIOS BIOLÓGICOS.....	27
4.9.1 Cupins de madeira seca.....	27
4.9.2 Ensaio de atividade biológica em taninos.....	28
4.10 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	28
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO TANINOS.....	29
5.1.1 Caracterização Química Elementar e Teor de Metais.....	29
5.1.2 Caracterização das soluções de taninos.....	30
5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA.....	31

5.2.1 Análise de espectros FT-IR .....	32
5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	33
5.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA .....	35
5.4.1 Retratibilidade .....	35
5.4.2 Densidade Aparente .....	38
5.4.2.1 Densitometria de Raios X .....	39
5.4.3 Permeabilidade .....	44
5.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	45
5.5.1 Flexão Estática .....	45
5.5.2 Compressão Paralela .....	47
5.5.3 Dureza Janka.....	48
5.6 ENSAIOS BIOLÓGICOS .....	49
5.6.1 Cupins de madeira seca .....	49
5.6.2 Atividade biológica em soluções de taninos .....	53
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A densificação termomecânica ou termodensificação é um processo de modificação que consiste em aplicar temperatura e pressão na madeira com objetivo de diminuir o espaço entre os poros e, conseqüentemente, aumentar sua densidade e resistência mecânica (LAINE et al., 2016; PELIT; YALÇIN, 2017; PERTUZZATTI et al., 2018). Em geral, é realizado em madeiras de baixa densidade, tais como o pinus, com a finalidade de agregar valor e expandir o uso das espécies por meio da melhoria das propriedades físicas e mecânicas (PERTUZZATTI et al., 2018).

Estudos propõem o uso da modificação termomecânica em conjunto com um pré-tratamento químico (com ácido oxálico ou hidróxido de sódio e sulfito de sódio) com a finalidade de facilitar a compressão e reduzir os danos à estrutura da madeira durante a modificação (PERTUZZATTI et al., 2018; SONG et al., 2018; SILVA, 2019).

Entretanto, o pré-tratamento químico e a modificação térmica na prensa podem contribuir com o aumento da susceptibilidade da madeira ao ataque de organismos xilófagos, como fungos e térmitas (cupins), devido à degradação de extrativos (UNSAI et al., 2008; LESAR et al., 2013; KHALIL et al., 2014), e o uso do tratamento preservativo em conjunto com a termodensificação pode ser uma alternativa de melhoria da resistência biológica da madeira modificada.

Dentre os preservantes de madeira, os taninos extraídos da espécie *Acacia mearnsii*, que são polímeros de flavan-3-ol e/ou flavan-3,4-diol, são uma alternativa viável em substituição aos preservantes hidrossolúveis convencionais, tais como arseniato de cobre cromatado (CCA) e o borato de cobre cromatado (CCB), devido à baixa toxicidade aos seres humanos e ao meio ambiente, e eficiência contra a biodeterioração da madeira por térmitas (cupins) e fungos apodrecedores (MONTEIRO et al., 2005; TASCIOGLU et al., 2012; TASCIOGLU et al., 2013; OGAWA; YAZAKI, 2018).

Diante da necessidade de melhorar a resistência biológica da madeira de pinus termodensificada, o uso de extratos tânicos de *Acacia mearnsii* pode ser uma alternativa de menor impacto ambiental e à saúde humana, como rota tecnológica para produção de materiais lignocelulósicos construtivos de alto desempenho.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar a eficiência de extratos tânicos de *Acacia mearnsii* no tratamento de madeiras de pinus termodensificada, em relação às propriedades químicas, físicas, mecânicas e de resistência biológica.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o efeito do tratamento preservativo com solução tânica nas propriedades químicas, físicas, mecânicas e anatômicas da madeira de pinus termodensificada;
- Obter o perfil densitométrico da madeira de pinus tratada com taninos e termodensificada por imagens de raios X;
- Avaliar o efeito da concentração dos taninos em solução na resistência à biodeterioração de madeiras de pinus termodensificada;
- Avaliar o efeito da concentração dos taninos em solução na inibição a microrganismos em placa de Petri.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 GÊNERO *PINUS* E A MADEIRA ENGENHEIRADA**

As plantações de pinus se estabeleceram no Brasil durante as décadas de 1970 e 1980 por meio de programas governamentais de incentivos fiscais para promover investimentos em plantações florestais, e eram voltadas para a indústria de celulose e papel (EMBRAPA, 2008). Em 1990, com a maturação dos plantios, o gênero tornou-se matéria-prima na indústria de madeira sólida principalmente para produção de molduras, esquadrias, janelas, portas, etc.; e posteriormente para fabricação de móveis destinados ao mercado interno e externo (EMBRAPA, 2008). A alta demanda de madeira como matéria-prima nos setores industriais e comerciais fez com que o gênero se tornasse requisitado, possuindo relevante importância para a indústria de base florestal (VASQUES et al., 2007; CADEMARTORI et al., 2012). Atualmente, a produção e comercialização interna e exportação da madeira de pinus e seus

derivados ajudam a impulsionar a economia nacional, com participação no crescimento econômico do setor brasileiro de árvores plantadas (IBÁ, 2021).

No Brasil em 2020, a área plantada com o gênero *Pinus* ocupou 1,7 milhão de hectares, concentrando-se na região Sul e Sudeste, com os maiores produtores nos Estados do Paraná (com 43% dos plantios), Santa Catarina (24%), Rio Grande do Sul (18%) e São Paulo (10%) (IBÁ, 2021); e tem a madeira produzida destinada, principalmente, para serraria (56%), celulose e papel (20%), produção de painéis reconstituídos (15%) e lenha industrial (8%) (IBÁ, 2019). A consolidação da produção e consumo da madeira de pinus nas regiões Sul e Sudeste do Brasil se deve à adaptação das espécies às condições edafoclimáticas e à melhor aceitação pela indústria madeireira no beneficiamento de produtos (TRIANOSKI et al., 2013; ABIMCI, 2019).

Com mais da metade do percentual produtivo de pinus destinado para a serraria, os principais setores abastecidos são da construção civil, embalagens e movelaria, além das exportações de madeira serrada (ABIMCI, 2019). Em 2020 a indústria madeireira no Brasil exportou 3.033.861 m<sup>3</sup> de madeira serrada do gênero, principalmente para os Estados Unidos, México e China (ABIMCI, 2021).

Na indústria civil, devido à busca por produtos de madeira mais homogêneos, com melhor desempenho estrutural e custo competitivo, o uso de madeira sólida tem passado por modificações e o uso do termo “madeira engenheirada” tem intensificado para garantir o suprimento da demanda desses materiais inovadores no mercado (HERÄJÄRVI et al., 2004; MIRSKI et al., 2020).

Madeiras engenheiradas são produtos resultantes de madeiras sólidas submetidas a processos para obter propriedades desejáveis, principalmente, para o uso estrutural (HERÄJÄRVI et al., 2004; HILDEBRANDT et al., 2017; LOLLI et al., 2019). A *Cross Laminated Timber* (CLT) e Madeira Laminada Colada (MLC ou *Glulam*) são alguns dos exemplos bem-sucedidos de produtos estruturais de madeira utilizados na construção civil (CHERRY et al., 2019; LOLLI et al., 2019). A CLT é formada por no mínimo três camadas de lâminas de madeira cruzadas unidas por adesivo (NGUYEN et al., 2018; CHERRY et al., 2019; LOLLI et al., 2019), enquanto a MLC é formada por lâminas dispostas com as fibras paralelas ao eixo longitudinal da peça (ICIMOTO et al., 2016; LOLLI et al., 2019; MIRSKI et al., 2020),

e ambos os produtos já possuem o uso consolidado na construção civil, apesar de poucas fábricas no Brasil.

A madeira de pinus tem se destacado como matéria-prima na produção de madeira engenheirada devido ao desempenho estrutural desejável do gênero (ICIMOTO et al., 2016; CHINIFORUSH et al., 2019; MIRSKI et al., 2020), além da disponibilidade das florestas de pinus nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, onde também estão instaladas as principais empresas produtoras de madeira engenheirada, o que favorece o fornecimento otimizado de matéria-prima para a indústria (AMATA, 2020).

Com a finalidade de ampliar e diversificar o mercado de madeira engenheirada, pesquisas estão sendo realizadas para avaliar o comportamento da madeira de pinus modificada por processo de densificação termomecânica para utilização na indústria civil (ESTEVEZ et al., 2017; PELIT; YALÇIN, 2017; PERTUZZATTI et al., 2018; NEYSES et al., 2019). O processo, que tem como objetivo aumentar a densidade e resistência mecânica da madeira utilizando pressão e temperatura para comprimir a estrutura da madeira, pode ser uma alternativa para produção de materiais de uso estrutural de alto valor agregado (PERTUZZATTI et al., 2018; NEYSES et al., 2019). A modificação pode também favorecer no aumento da resistência biológica da madeira de pinus quando em conjunto com um tratamento preservativo. E dentre as substâncias preservativas existentes no mercado, o uso dos taninos pode ser uma alternativa de menor toxicidade aos seres humanos e meio ambiente, usado em substituição aos preservantes hidrossolúveis tradicionais, como CCA e CCB (BOSSARDI; BARREIROS, 2011; TONDI et al., 2013a).

### 3.1.1 Características tecnológicas das madeiras do gênero *Pinus*

A madeira produzida pelo gênero *Pinus* possui propriedades mecânicas e físicas que variam entre as espécies, sendo as de maior densidade e resistência mecânica *Pinus taeda*, *Pinus tecunumanii* e *Pinus maximinoi* (Tabela 1), que são utilizadas principalmente na fabricação de móveis, chapas, embalagens e para fins estruturais; e outras de menor densidade e resistência mecânica (Tabela 1), como o *Pinus chapensis*, *Pinus caribea* e *Pinus elliottii* que são destinadas aos setores de acabamentos, marcenaria e artesanatos; além de espécies serem destinadas à produção de resina (*Pinus elliottii*, *Pinus caribea*, etc) (EMBRAPA, 2008; TRIANOSKI et al., 2014).

**Tabela 1** - Propriedades mecânicas e físicas de madeiras do gênero *Pinus* com 17 a 18 anos de idade

Espécies	Flexão estática		Compressão paralela às fibras		Dureza Janka N	Densidade aparente (Kg/m <sup>3</sup> )
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)		
<i>Pinus elliotti</i>	6463	69,6	8846	31,5	1932	480*
<i>P. caribaea var. bahamensis</i>	7187	65,0	9186	30,0	2153	435
<i>Pinus chiapensis</i>	7293	59,0	10060	33,0	2558	435
<i>Pinus taeda</i>	8234	64,0	12432	37,0	3162	527
<i>Pinus maximinoi</i>	8943	70,0	12990	37,0	3405	533
<i>Pinus tecunumanii</i>	8943	71,0	14049	39,0	3410	577

MOE: Módulo de elasticidade; MOR: Módulo de ruptura. (\*) Densidade aparente a 15% de umidade; demais espécies: densidade aparente a 12% de umidade. Fonte: IPT (1989); TRIANOSKI et al. (2014).

Como composições químicas, as espécies do gênero *Pinus* possuem teores de celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos que podem variar entre 38-41%, 10-30%, 27-31%, 4-6%, respectivamente (POUBEL et al., 2013; MATTOS et al., 2014; COLODETTE; GOMES, 2015; ACOSTA et al., 2021).

No manejo das florestas de pinus (de uso múltiplo), em geral, o primeiro desbaste ocorre entre 7 e 8 anos após o plantio com produção de madeira de menor diâmetro (diâmetro em torno de 15 cm) destinada principalmente para celulose e energia; o segundo aos 12 anos (18 - 24 cm de diâmetro) destinado para serraria, celulose e energia; e o corte final entre os 15 e 20 anos (com diâmetro em torno de 25 e 30 cm), que podem ser destinados à serraria, laminação, painéis, energia e celulose (EMBRAPA, 2008, 2020; AMATA, 2020). E quando o objetivo da colheita é a obtenção de madeira serrada, o desdobro pode ser realizado na forma convencional que, em geral, são feitos cortes tangenciais nas toras, sem a classificação por diâmetro; ou programada, com separação por classe diamétrica e modelo de corte pré-estabelecido para a máxima utilização da tora (MANHIÇA et al., 2013; MURARA JÚNIOR et al., 2013).

O gênero *Pinus*, em geral, tem como característica a produção significativa de madeira juvenil, principalmente naquelas provenientes dos primeiros desbastes com idade entre 7 e 8 anos, devido ao rápido crescimento comparado ao de espécies nativas, que faz com que o fuste

atinja dimensões de comercialização ainda jovem (com 7 a 12 anos), resultando numa madeira de baixa densidade, com traqueídeos curtos, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina, menor conteúdo de celulose e menor resistência mecânica, que são características indesejáveis para fins estruturais na indústria civil (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000; EMBRAPA, 2008; VIDAURRE et al., 2011). Além disso, a composição química e a estrutura anatômica da madeira de baixa densidade são fatores atrativos a organismos xilófagos, como fungos e cupins, que penetram com maior facilidade nos poros e se nutrem dos polímeros que compõem a estrutura lenhosa, fazendo com que essas madeiras tenham como característica, a baixa durabilidade natural aos organismos xilófagos (LAZAROTTO et al., 2016; PELIT; YALÇIN, 2017). E como consequência da colonização da madeira por agentes biodeterioradores, pode haver o comprometimento da resistência mecânica, limitando o uso, principalmente estrutural, e causando prejuízos econômicos ao setor madeireiro e ao usuário da madeira (STANGERLIN et al., 2013; CARVALHO et al., 2015b).

Estudos comprovam a susceptibilidade das madeiras do gênero *Pinus* ao ataque de organismos xilófagos, em que foram utilizadas como testemunhas devido aos altos índices de deterioração e perda de massa da madeira quando expostas aos fungos causadores da podridão parda e branca (*Gloeophyllum trabeum*, *Postia placenta* e *Trametes versicolor*), e cupins de madeira seca (*Cryptotermes brevis*) (GONÇALVES; OLIVEIRA, 2006; OLIVEIRA; PAES, 2019; CARVALHO et al., 2015b; STALLBAUN et al., 2016). Portanto, devido à baixa durabilidade natural e aos baixos valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira de pinus em comparação à madeiras reconhecidamente superiores (ipê - *Tabebuia serratifolia*, cumaru - *Dipteryx odorata*, teca - *Tectona grandis* e angelim-pedra - *Hymenolobium petraeum*), sua utilização em ambientes expostos ao ataque de organismos xilófagos ou o uso estrutural requer modificações nos parâmetros físicos, químicos e anatômicos da madeira, e que melhorem as propriedades mecânicas (LAINE et al., 2013b; POUBEL et al., 2013); e/ou tratamentos preservativos que aumentem a vida útil e protejam o material lignocelulósico de agentes biodeterioradores (YILDIZ et al., 2004; STIRLING; TEMIZ, 2014; PEPIN et al., 2020).

### 3.1.1.2 Estabilidade dimensional e permeabilidade da madeira de *Pinus*

A madeira é um material higroscópico e quando exposto à ambientes com maiores ou menores umidades pode ocasionar no fenômeno conhecido como retratibilidade, que é a variação dos seus parâmetros dimensionais (tangencial, radial e longitudinal) provocados pela contração e inchamento da madeira devido à troca de umidade com o ambiente (OLIVEIRA et al., 2010; ARZOLA-VILLEGAS et al., 2019). Abaixo do ponto de saturação das fibras, a movimentação das moléculas de água ligadas por pontes de hidrogênio à estrutura da parede celular da madeira causa o afastamento ou a aproximação das microfibrilas por meio do processo de adsorção (entrada de água da madeira) e dessorção (saída de água), provocando o inchamento e a retração da madeira, respectivamente (OLIVEIRA et al., 2010). Essas variações podem limitar algumas finalidades de uso ou causar dificuldades no processamento da madeira, sendo necessário investigações sobre seus parâmetros dimensionais para a correta utilização na indústria de produtos sólidos (TRIANOSKI et al., 2013a), tanto da madeira na forma *in natura*, quanto modificada por processos físicos ou físico-mecânicos.

Dentre os parâmetros dimensionais que podem ser avaliados na madeira destacam-se a contração e o inchamento. Em madeiras do gênero *Pinus* a contração volumétrica pode variar de 8-10%, em base seca (TRIANOSKI et al., 2013a), e o inchamento entre 9 a 14%, em base seca (MODES et al., 2013; GULLER, 2012; TIRYAKI et al., 2016).

Outro parâmetro dimensional que pode ser avaliado na madeira é o coeficiente anisotrópico, que consiste na razão entre a contração no sentido tangencial e radial (TRIANOSKI et al., 2013a; LOIOLA et al., 2021). O coeficiente está relacionado à qualidade da madeira, pois a classifica quanto a sua estabilidade dimensional, podendo ser considerada madeira estável e menos propensa a fendilamentos durante o processo de secagem, aquelas que possuem o menor coeficiente anisotrópico, e quando maior que 2, não são indicadas para usos que requeiram maior estabilidade dimensional (OLIVEIRA et al., 2010; MIRANDA et al., 2012; FREITAS et al., 2016). No entanto, o coeficiente não deve ser avaliado isoladamente, pois pode sub ou superestimar o fator de classificação das madeiras, sendo, portanto, necessário considerar as variações dimensionais específicas de cada sentido (tangencial e radial) (OLIVEIRA et al., 2010; VALENTE et al., 2013).

De modo geral, as variações dimensionais no sentido radial da madeira tendem a ser menores do que as variações tangenciais, devido à influência restritiva dos raios nessa direção

(KOLLMAN; CÔTÉ, 1968; SILVA; OLIVEIRA, 2003; OLIVEIRA et al., 2010). No entanto, em madeiras de coníferas esse comportamento pode também ser explicado pelo arranjo helicoidal das microfibrilas da parede dos traqueídeos tangenciais, que propiciam uma maior variação dimensional na direção tangencial (KOLLMAN; CÔTÉ, 1968; OLIVEIRA et al., 2010).

Em madeiras modificadas a retratibilidade é também um parâmetro a ser avaliado, pois a interação da madeira tratada com a umidade do ambiente pode causar variações dimensionais que inviabilizam o uso final do produto (LAINE et al., 2013a; YU et al., 2020). Na madeira termodensificada, devido ao esforço de compressão, a energia de deformação elástica se armazena nas macromoléculas de celulose, fazendo com que ocorra uma nova conformação entre as ligações de hidrogênio das hemiceluloses e celulose, e entre as ligações covalentes que unem hemiceluloses e lignina, havendo, portanto, uma deformação reversível durante o processo de reumidecimento (LAINE et al., 2013a), que tem como consequência a maior instabilidade dimensional da madeira no sentido em que for comprimida (geralmente o radial). Com o objetivo de aumentar a estabilidade da madeira densificada, estudos propõem pré-tratamentos com compostos químicos, como o ácido oxálico, juntamente com altas temperaturas (125 - 160°C) e prensagem a quente da madeira (4,9 - 9,0 MPa), que podem favorecer na minimização das variações em espessura quando a madeira é submetida ao inchamento (FANG et al., 2012; LAINE et al., 2013a; SILVA, 2019; SILVA et al., 2019).

Além dos índices dimensionais, as propriedades físicas da madeira podem ser avaliadas conforme a permeabilidade de fluidos ou ar no interior de suas cavidades. A permeabilidade da madeira está relacionada à sua anatomia (porosidade), e consiste na facilidade ou dificuldade de um líquido ou gás percorrer no interior de um material, sendo, por isso, uma propriedade física importante a ser avaliada, pois influencia na secagem, polpação e no tratamento preservativo de madeiras (LEGGATE et al., 2019). Na permeabilidade ao ar, as amostras de madeira de área e comprimento conhecidos, são submetidas a um fluxo de ar sob determinada pressão, e assim é medida a taxa do fluxo percorrido no interior dos poros (HANSMANN et al., 2002; LEGGATE et al., 2019). De acordo com a literatura, a madeira de pinus pode ter permeabilidade longitudinal variando de 0,42 a 30,20 m<sup>3</sup>.m/N.s, e essa variação pode ser influenciada pelas características anatômicas (como a presença de canais de resina, cristais e corpos estranhos), idade, posição radial, densidade da madeira e da saturação de seiva nos

espaços livres da madeira (COMSTOCK, 1970; MAGALHÃES et al., 2004; POONIA et al., 2016; JANG; KANG, 2019).

### 3.2 DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA MADEIRA

A madeira é um material natural e reciclável, com utilização versátil como matéria-prima para diversos produtos (PELIT; YALÇIN, 2017; SONG et al., 2018). No entanto, o desempenho mecânico devido à heterogeneidade em sua estrutura anatômica, e a susceptibilidade biológica de madeiras de baixa densidade de florestas plantadas, podem limitar alguns usos, tais como o uso estrutural ou em locais que favoreçam o ataque por organismos xilófagos, como expostas ao ambiente ou próxima ao solo (BLOMBERG et al., 2005; YU et al., 2017; SONG et al., 2018).

Devido aos limites de uso da madeira de baixa densidade, relacionados a resistência mecânica e susceptibilidade a ataques biológicos, modificações devem ser feitas em sua estrutura anatômica e composição química para melhorar a estabilidade dimensional, dureza, resistência ao desgaste e resistência aos organismos xilófagos (LAINE et al., 2016). Para modificar a madeira, alguns processos podem ser utilizados (SANDBERG et al., 2017), destacando-se os tratamentos químicos (HILL, 2007; XIE et al., 2013); os termo-hidro (TH) (SANDBERG et al., 2013), termomecânicos e termo-hidro-mecânicos (THM) (NAVI; SANDBERG, 2012; LESAR et al., 2013); bem como tratamentos físicos com o uso de irradiação eletromagnética ou plasma (GIBIAT et al., 2007; VOLOKITIN et al., 2016).

Dentre os processos de modificação, a densificação termomecânica pode ser uma alternativa viável para agregar valor às madeiras de espécies de menor densidade (FU et al., 2016), como as do gênero *Pinus*, e aumentar sua resistência mecânica. O processo consiste em aplicar temperatura e pressão na madeira com objetivo de diminuir o espaço entre os poros e, conseqüentemente, aumentar sua densidade e resistência mecânica (LAINE et al., 2016; PELIT; YALÇIN, 2017; PERTUZZATTI et al., 2018). Um processo semelhante que dá origem a um produto conhecido como *Staypak*® foi criado e patenteado nos EUA (STAMM et al., 1948). O processo de fabricação consiste em comprimir a madeira com umidade em torno de 12%, sob temperaturas que variam de 160 a 180 °C, e pressão 9,65 a 13,79 MPa, resultando num material

mais homogêneo, com maior estabilidade dimensional e alta densidade comparado à madeira que deu origem (STAMM et al., 1948; MORSING, 1998).

Para facilitar a densificação termomecânica, a madeira pode ser previamente submetida a um tratamento hidrotérmico em alta temperatura (140-220 °C) sob condições ácidas em que ocorrem a liberação de ácidos orgânicos da biomassa, e promovem alterações na lignina e hemiceluloses, tornando o material mais maleável, moldável e de fácil compactação (PU et al., 2013; CARVALHO et al., 2015a). Este processo em que são utilizados o tratamento hidrotérmico e densificação termomecânica em madeiras é conhecido como termo-hidro-mecânico (THM) (NAVI; SANDBERG, 2012).

As modificações termo-hidro-mecânicas, que combinam água, temperatura e força mecânica com o objetivo de obter uma madeira moldável, foram se adaptando a fim de aprimorar os resultados do processo, e estudos demonstram a eficiência da adição de compostos químicos durante o tratamento hidrotérmico, facilitando a densificação (SONG et al., 2018; SILVA, 2019; SILVA et al., 2019).

A imersão das madeiras de *Tilia* sp., *Quercus* sp., *Populus*, *Thuja plicata* e *Pinus strobus* em solução aquosa de NaOH e Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> em conjunto com a prensagem à quente, resultaram em madeiras com propriedades mecânicas superiores às da madeira natural, excedendo, inclusive, a de outros materiais, como plásticos e aço (SONG et al., 2018). A solução de NaOH e Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> agiu removendo parcialmente a lignina, composto aglutinante da madeira, facilitando a prensagem, possibilitando um alto grau de alinhamento das nanofibras de celulose, obtendo um material de alta densidade, resistência à tração e compressão axial (SONG et al., 2018).

Assim como a ação dos compostos alcalinos a base de NaOH e Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> (SONG et al., 2018), a adição de ácidos ao tratamento hidrotérmico é uma alternativa para maximizar a hidrólise em baixas temperaturas (SILVA et al., 2019). O pré-tratamento com ácido diluído remove parcialmente hemiceluloses e lignina da madeira (CARVALHO et al., 2015a), sobretudo o ácido oxálico, o qual permite a hidrólise da celulose em condições mais amenas comparado a outros ácidos, favorecendo uma maior organização das cadeias de celulose com alto grau de cristalinidade (LACERDA et al., 2015).

O pré-tratamento da madeira com ácido oxálico reduz a rigidez da estrutura lenhosa tornando-a mais maleável, o que, conseqüentemente, facilita a densificação termomecânica, além de resultar em peças com nenhum ou poucos defeitos visíveis, como rachaduras e

deformações laterais (SILVA, 2019; SILVA et al., 2019). A densificação termomecânica precedida por tratamento de hidrólise com ácido oxálico em madeira da espécie *Pinus elliottii* resultou em incremento na densidade básica e aparente, dureza Janka e resistência a compressão paralela às fibras em relação a amostra *in natura*, além de baixa variabilidade dimensional, sendo, portanto, um processo viável na conversão de madeiras de pinus em materiais maciços de elevada densidade, resistência mecânica e baixa higroscopicidade (SILVA, 2019).

As modificações termo-hidro-mecânicas conferem à madeira de baixa densidade melhorias nas propriedades físicas e mecânicas. No entanto, em relação à resistência biológica, somente essa modificação pode não ser eficiente na redução da susceptibilidade da madeira a organismos xilófagos (UNSAL et al., 2008; KUTNAR et al., 2011; KHALIL et al., 2014).

Em estudo sobre a influência do processo de impregnação química e compressão da madeira do gênero *Aghatis* concluiu-se que o tratamento não foi capaz de inibir a madeira do ataque de cupins da espécie *Cryptotermes cynocephalus* (KHALIL et al., 2014). A madeira de *Pinus sylvestris* L. densificada, submetida ao ataque de fungos de podridão branca (*Trametes versicolor*) e parda (*Gloeophyllum trabeum*), e de cupins (*Reticulotermes flavipes* Kollar), não teve incremento na resistência biológica após a densificação termomecânica (UNSAL et al., 2008). A degradação ou extração parcial dos extrativos presentes na madeira durante o processo de hidrotérmico ou térmico pode explicar a diminuição da durabilidade biológica da madeira modificada, facilitando o ataque de organismos xilófagos aos polímeros que compõem a parede celular (LESAR et al., 2013).

### 3.3 BIODETERIORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DE MADEIRA DE PINUS

A madeira do gênero *Pinus* tem como característica a baixa durabilidade natural, sendo, por isso, susceptível ao ataque de organismos xilófagos (LAZAROTTO et al., 2016). Para prolongar sua vida útil é necessária a utilização de substâncias tóxicas aos organismos biodeterioradores, como o arseniato de cobre cromatado (CCA) e borato de cobre cromatado (CCB), cuja função é preservar as madeiras, conferindo maior resistência biológica ao material tratado (DIAS; BARREIROS, 2017; VIVIAN et al., 2020). Esses produtos preservantes hidrossolúveis são normalmente impregnados na madeira por meio de processo de vácuo-pressão-vácuo (célula cheia) em autoclave, e as reações de fixação dos componentes ocorrem na secagem da madeira durante o período de “repouso” de duas a três semanas a que devem ser

submetidas antes do uso (FERRARINI et al., 2012). Apesar da eficiência na preservação de madeiras, os produtos químicos preservantes têm como desvantagem a alta toxicidade aos seres humanos e meio ambiente devido à presença de elementos carcinogênicos, como o arsênio e cromo em suas composições (FERRARINI et al., 2012; VIVIAN et al, 2020). Como alternativa a essas substâncias químicas, compostos de origem natural podem ser utilizados para tratar madeiras não duráveis (SILVEIRA et al., 2017; MISSIO, 2019). Os preservativos alternativos (à base de polifenóis) aos compostos químicos comumente utilizados na preservação de madeiras (CCA e CCB) são materiais extraídos de plantas ou madeiras, tais como os taninos, que são tóxicos aos organismos xilófagos e têm como vantagem a baixa toxicidade aos seres humanos e meio ambiente (BOSSARDI; BARREIROS, 2011).

### 3.3.1 Taninos

Os taninos são polifenóis solúveis em água encontrados em folhas, frutos, raízes, madeira e casca de árvores de espécies como *Acacia mearnsii*, *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, entre outras (PRIGIONE et al., 2018). Ocorrem nos vegetais nas células do raio e parênquima longitudinal do cerne, na casca, e raramente no alburno (TRUGILHO et al., 2003). São classificados como hidrolisáveis e condensados. Os taninos hidrolisáveis consistem em ésteres de ácido gálico, ácido hexa-hidroxi-difênico e glicose, e outros poliois, enquanto que os taninos condensados são polímeros de flavan-3-ol e/ou flavan-3,4-diol (AGOSTINI-COSTA, 2003; WEILER et al., 2019). Os taninos condensados são observados principalmente nos gêneros *Schinopsis* e *Acacia*, e na planta são capazes formar complexos com a celulose e pectina, impedindo que as enzimas dos microrganismos, como fungos e bactérias, se liguem aos substratos (ZUCKER, 1983; RICCI et al., 2015). A capacidade de proteção dos taninos hidrolisáveis na planta está relacionada à inibição de enzimas digestivas de organismos xilófagos, tais como insetos (ZUCKER, 1983).

No Brasil os taninos condensados de acácia-negra (*Acacia mearnsii*) são os principais compostos tânicos de interesse comercial, e possuem em sua composição em torno de 70 a 80% de substâncias tânicas constituídas por unidades de flavanoides, e 20 a 40% de substâncias não-tânicas compostas por gomas hidrocoloides, carboidratos e frações de aminoácidos (PIZZI, 1983; MISSIO et al., 2017).

Devido à composição química dos taninos, sua aplicação é permitida em substituição a produtos não renováveis como o fenol (utilizado na produção de adesivos) e cromo (utilizado para o curtimento de couro) (ARAÚJO et al., 2021). Na indústria, são extraídos em água quente (BIANCHI et al., 2015), e amplamente utilizados devido à capacidade de ligar proteínas por meio de pontes de hidrogênio entre os grupos fenólicos e determinados sítios do complexo proteico, ao caráter antioxidante de suas moléculas, e capacidade complexante em relação aos metais (MONTEIRO et al., 2005; PRIGIONE et al., 2018), além de possuir eficiência como preservante de madeira alternativo no controle de fungos apodrecedores e cupins (TASCIOGLU et al., 2012; TASCIOGLU et al., 2013), e com eficácia semelhante a de madeiras tratadas com misturas de preservantes químicos, como o borato de cobre cromatado (CCB) (SILVEIRA et al., 2017).

A alta reatividade dos taninos com proteínas contribui para interferência nas funções em sistemas biológicos vitais, como o enzimático, tendo como consequência a inibição da atividade de organismos xilófagos, que dependem de proteínas e hidratos de carbono para sobrevivência (FIELD; LETTINGA, 1992; MONTEIRO et al., 2005).

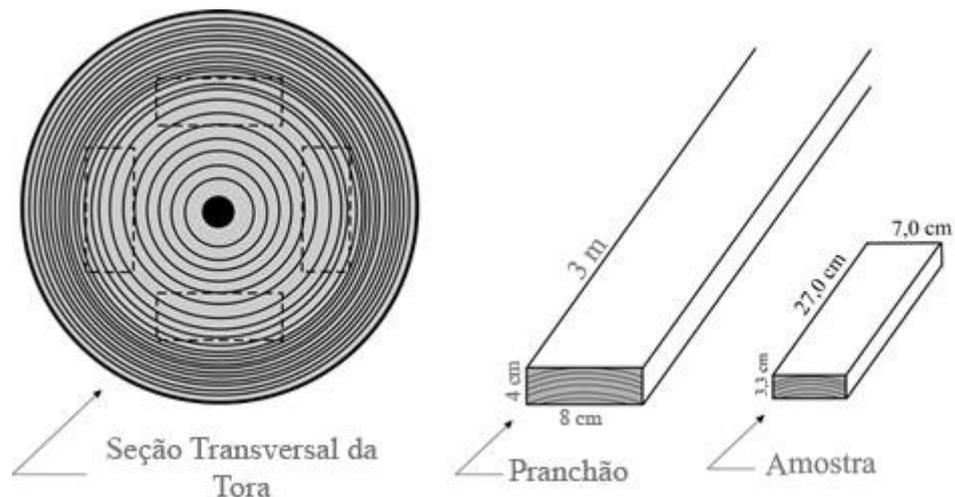
Outro mecanismo inibitório dos taninos está relacionado à sua capacidade de complexar íons metálicos, que em sistemas biológicos, incluindo de microrganismos, são fundamentais devido à função como cofatores enzimáticos (MONTEIRO et al., 2005). Como preservativo de madeiras contra o ataque de fungos apodrecedores e cupins, os taninos demonstram ser eficientes em concentrações que variam de 9 a 12% (TASCIOGLU et al., 2012; 2013), sendo também um agente fixador de preservantes à base de boro, corroborando para a permanência e efeito biocida das soluções na madeira (TONDI et al., 2012; HU et al., 2017). Os taninos possuem capacidade de se ligar a superfícies hidrofílicas através de ligações de hidrogênio (MISSIO et al., 2018; GUO et al., 2019), o que pode promover sua interação com os constituintes da madeira durante o processo de preservação.

Em relação composição química dos taninos, os teores de cinzas, nitrogênio e enxofre podem variar de 2,41 a 8,75%, 0,04 a 0,63% e 0,098 a 3,38%, respectivamente (WEILER et al., 2019). O teor de cinzas pode estar diretamente relacionado ao processo de extração e a absorção de nutrientes pela planta, enquanto que o teor de nitrogênio está associado ao complexo polissacarídeo-proteína presentes na constituição da espécie em que foi extraído (GREIN et al. 2013; WEILER et al., 2019).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 MATÉRIA-PRIMA

A madeira utilizada foi da espécie *Pinus elliottii*, proveniente de plantio experimental localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil (coordenadas: 20° 45' 37" S 42° 52' 04" O). O desdobro da madeira foi realizado por meio de cortes balanceados para retirada de pranchões de 4 cm de espessura x 8 cm de largura e 3 m comprimento. As amostras oriundas de pranchões de corte tangencial, de acordo com orientação dos anéis de crescimento (Figura 1), foram seccionadas com dimensões de 3,3 cm de espessura (sentido radial), 7 cm de largura (sentido tangencial) e 27 cm de comprimento (sentido longitudinal), totalizando 16 amostras por tratamento, conforme proposto por Silva (2019). Amostras com presença de defeitos (nós e rachaduras) foram eliminadas da amostragem.



**Figura 1-** Esquema de corte e orientação das amostras. Fonte: Adaptado de Silva (2019).

### 4.2 MODIFICAÇÃO DA MADEIRA DE PINUS

A modificação da madeira de pinus ocorreu em três etapas sequenciais, a saber:

I) Hidrólise ácida da madeira com ácido oxálico com objetivo de remover parcialmente as hemiceluloses e lignina, tornando-a mais maleável, e como consequência, facilitar a densificação termomecânica e diminuir a ocorrência de defeitos no material densificado;

II) Aplicação de extratos tânicos de *Acacia mearnsii* como preservativo da madeira de pinus visando aumentar a resistência à biodeterioração;

III) Densificação termomecânica da madeira de pinus tratada com extratos tânicos de *Acacia mearnsii*, com objetivo de aumentar a densidade, e consequentemente, a resistência mecânica.

### 4.3 HIDRÓLISE ÁCIDA

Para o tratamento de hidrólise ácida com a finalidade de remoção parcial de hemiceluloses e lignina da madeira, tornando-a mais maleável e facilitando a densificação termomecânica, foram inseridas 12 amostras de madeira por vez, em reator em Parr (*Floor Stand Reactor*) com capacidade de 18,75 L, imersas em solução de ácido oxálico na concentração de 25 g/L, à temperatura de 120 °C durante 90 minutos, com o sistema de circulação aberto. Ao final do procedimento, as amostras foram lavadas em água corrente e imersas em solução de taninos. A concentração do ácido oxálico, o tempo e temperatura da hidrólise foram utilizados com base nos estudos de Silva et al. (2019), Pertuzzatti et al. (2018) e Song et al. (2018), além de testes preliminares.

### 4.4 TRATAMENTO PRESERVATIVO

#### 4.4.1 Taninos

O tanino em pó extraído da espécie *Acacia mearnsii* foi doado por empresa produtora. Caracterizou-se a solução de taninos quanto ao teor de sólidos (ABNT, 2002), viscosidade da solução em viscosímetro rotativo Brookfield (21 °C, rotação 100 rpm, 300 mL de solução) (TONDI et al., 2013a) e pH em pHmetro digital DIGIMED- D22 (ASTM, 2015). A análise da presença de metais foi realizada em amostras de taninos em pó por espectrofotometria de absorção atômica (equipamento da marca Perkin Elmer - modelo AAnalyst 200) (DEMUNER et al., 2021). A análise da composição química elementar CNHS (equipamento TruSpec Micro-Leco) (DEMUNER et al., 2021) foi realizada em amostras de taninos em pó, e o percentual de oxigênio obtido por diferença em relação aos demais componentes ( $O\% = 100\% - CNHS\%$ ).

Os taninos em pó foram solubilizados em água destilada nas concentrações de 5, 10 e 15%. As amostras de pinus submetidas a hidrólise ácida foram imersas em 10 litros de solução

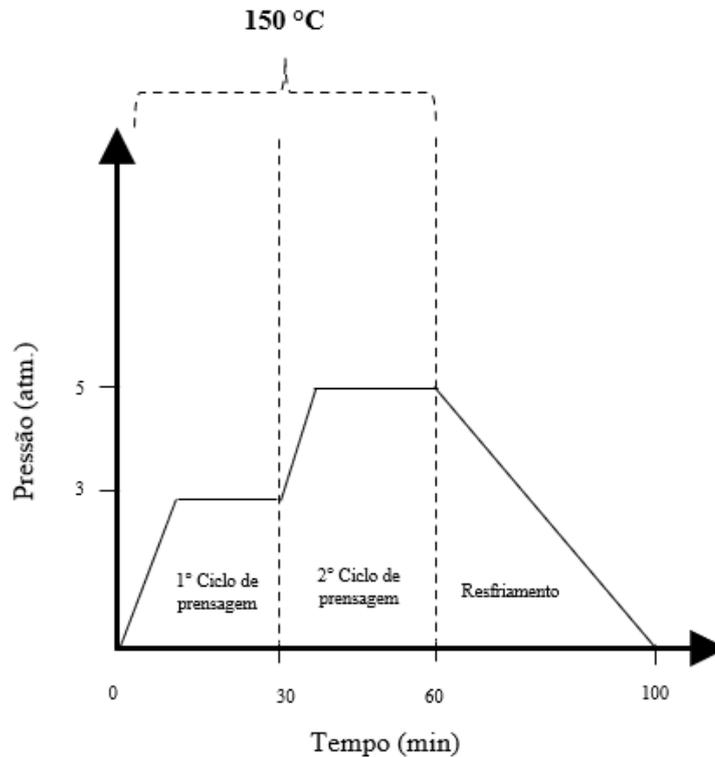
de taninos para cada concentração, e deixadas até a saturação completa. Por tratamento foram utilizadas 16 unidades amostrais.

As concentrações avaliadas foram baseadas em estudos que encontraram bons resultados para resistência de madeiras tratadas com taninos ao ataque de cupins (TASCIOGLU et al., 2012; SILVEIRA et al., 2017; YINGPRASERT et al., 2021). Após o tratamento preservativo, as amostras foram submetidas ao processo de densificação termomecânica.

#### 4.5 DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA

As madeiras retiradas das soluções de taninos foram inicialmente aquecidas a 100 °C no vapor d'água, com auxílio de uma autoclave, para que não houvesse ocorrência de defeitos (rachaduras e fendilamentos) nas amostras quando expostas à alta temperatura da prensa hidráulica.

Após aquecidas, as amostras foram prensadas em prensa hidráulica a 150 °C por 60 minutos, conforme estabelecido por Silva (2019). Quatro separadores em cada lado da prensa foram utilizados, correspondendo 40% da espessura nominal da amostra. O ciclo de prensagem foi de 30 minutos a pressão de 3 atm., e posteriormente a pressão foi elevada a 5 atm., permanecendo por mais 30 minutos (Figura 3). Ao final, o termostato foi desligado, e em seguida, a pressão gradualmente reduzida a  $\pm 0,1$  atm em dispositivo de controle. Após a densificação a amostra permaneceu na prensa por mais 40 minutos, resfriando, de modo a minimizar a ocorrência de defeitos. Finalizada a etapa de densificação, as amostras foram armazenadas em sala de climatização a 20 °C e 65% de umidade relativa do ar, até atingirem a umidade de equilíbrio higroscópico para a realização dos ensaios.



**Figura 2-** Ciclo de prensagem das amostras de *Pinus elliotti*. Fonte: Adaptado de Silva (2019).

#### 4.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

As amostras foram moídas em moinho de facas Willey Standard, em seguida peneiradas com uma peneira de malha 40-60 *mesh*, e a fração retida foi utilizada para determinar a sua composição química estrutural de acordo com as normas da Associação Técnica da Indústria de Celulose e Papel (TAPPI, 1996). Inicialmente as amostras foram submetidas à sequência de extração em etanol, tolueno e água quente para a determinação dos teores totais de extrativos (TAPPI, 2006). O teor de lignina insolúvel e lignina solúvel foi determinado de acordo com a TAPPI T 222 om- 02 (2002) e TAPPI UM 250 (2000), respectivamente. O teor de lignina total foi obtido a partir do somatório dos teores de lignina insolúvel e solúvel. O teor de holoceluloses foi estimado a partir do total de 100% subtraídos os teores de extrativos totais, ligninas totais e cinzas. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a TAPPI T 211 om-02 (2002).

#### 4.6.1 Análise de espectros FT-IR

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) foi realizada para determinar a presença de taninos nas amostras de madeira de pinus tratadas (TONDI et al., 2013b; YINGPRASERT et al., 2021). Para as medições foi utilizado o espectrofotômetro Vertex 70v, marca Bruker, comprimento de onda entre 1800 - 600  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

#### 4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Para avaliar as modificações ocorridas na madeira após as modificações, foram obtidas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (BUDAKÇI et al., 2016; PELIT; YALÇIN, 2017). Para o procedimento as amostras nas dimensões 0,5 cm x 0,5 cm x 0,5 cm foram fixadas em suporte porta-amostras do microscópio (“stub”) com cola de carbono e metalizadas com ouro em metalizador *Electron Microscopy Sciences* (modelo 550X) no Núcleo de Microscopia e microanálise da Universidade Federal de Viçosa. A visualização das estruturas anatômicas foi feita em microscópio eletrônico de varredura JEOL (modelo JSM-6010LA) no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa.

#### 4.8 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

As amostras de madeira modificadas foram colocadas em câmara climática à temperatura de 20 °C e 65% de umidade relativa do ar até as amostras atingirem massa constante. O teor de umidade de equilíbrio foi calculado em base seca conforme NBR 7190 (ABNT, 1997).

Para determinar as variações dimensionais da madeira foi realizado o ensaio de retratibilidade, em que foi avaliado o inchamento e contração tangencial, radial e volumétrica da madeira conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997) adaptada para as dimensões das amostras de 1,3 cm de espessura x 3 cm de largura x 5 cm de comprimento.

A densidade aparente ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) foi determinada (na umidade: 15, 10, 9 e 9%, para os tratamentos controle, 5, 10 e 15%, respectivamente), por medição direta com paquímetro, dividindo a massa (g) pelo volume correspondente ( $\text{cm}^3$ ), conforme NBR 7190 (ABNT, 1997)

adaptada devido à dimensão inferior da espessura das amostras após a densificação termomecânica.

Para análise de densidade aparente por raios X as amostras de madeira foram cortadas com 2 mm de espessura em serra circular e acondicionadas em sala climatizada à temperatura de 20 °C, 65% de umidade relativa do ar por 24 horas (CASTRO et al., 2020). As amostras foram inseridas com a escala de calibração de acetato de celulose no compartimento blindado do equipamento de raios X digital Faxitron modelo LX-60 previamente calibrado para a leitura automática (30 Kv, 19 segundos) (CASTRO et al., 2020), e as imagens digitais com ultra-contraste e resolução foram salvas em formato DICOM (FAXITROM, 2009). Os perfis de densidade aparente foram construídos com as imagens digitais em escala de cinza, convertidas em escala rainbow (imagem colorida) no software Adobe Photoshop e a calibração analisada no software ImageJ. Nas imagens em escala de cinza, as tonalidades mais próximas às cores de branca e preta foram associadas à maior e menor densidade, respectivamente. Na escala rainbow (imagem colorida) as tonalidades vermelha, amarela, verde e azul foram associadas, em ordem decrescente, da maior para menor densidade, respectivamente (MEDEIROS et al., 2020).

A permeabilidade ao ar atmosférico foi determinada pelo método do fluxômetro adaptado de Teixeira (2015). As amostras de madeira foram confeccionadas no formato cilíndrico no equipamento de furadeira vertical acoplada com serra copo. As amostras com dimensões de 1,3 cm de diâmetro e 5 cm de comprimento, e tiveram as faces raspadas com estilete para desobstrução dos elementos anatômicos. As faces transversais foram cobertas com fita adesiva e as amostras impermeabilizadas radialmente com parafina para impedir a infiltração de ar. No equipamento composto por quatro fluxômetros com uma sequência de escalas de 0,04 a 25,0 LPM (litros por minuto) conectados a uma bomba a vácuo, as amostras foram encaixadas em mangueira de 1,5 cm de diâmetro ajustada com abraçadeira de metal, e os dados de vazão e pressão de saída coletados (TEIXEIRA, 2015).

A permeabilidade das amostras de madeira foi expressa pela lei de Darcy, em que:

$$\text{Permeabilidade} = k = \frac{\text{Gradiente}}{\text{Fluxo}} = \frac{q/A}{\Delta p/L} = \frac{QL}{A \Delta P},$$

Onde:  $K$  = permeabilidade ( $\text{cm}^3.\text{cm}/\text{atm}.\text{s}$ );  $Q$  = vazão ( $\text{cm}^3/\text{S}$ );  $L$  = comprimento da madeira na direção do fluxo (cm);  $A$  = seção transversal da madeira perpendicular à direção do fluxo ( $\text{cm}^2$ );  $\Delta P$  = diferencial de pressão ( $\text{atm}./\text{cm}^2$ ).

#### 4.9 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

Os testes mecânicos foram adaptados da NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997) devido às dimensões das amostras após a densificação serem inferiores às dimensões sugeridas na norma. No ensaio de flexão estática com a determinação o módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) foram utilizados 12 corpos de prova-de-prova de 2 cm largura x 1,3 cm de espessura x 27 cm comprimento para cada tratamento, incluindo a testemunha (madeira não tratada e não densificada). Para o ensaio de compressão paralela às fibras foram utilizados 12 corpos-de-prova para cada concentração do tratamento preservativo, nas dimensões de 2 cm de largura x 1,4 cm de espessura x 5 cm de comprimento. Para o ensaio de dureza Janka na direção normal às fibras foram utilizados 8 corpos-de-prova nas dimensões 5 cm de largura x 1,4 de espessura x 10 cm de comprimento.

#### 4.10 ENSAIOS BIOLÓGICOS

##### 4.10.1 Cupins de madeira seca

O ensaio de cupins de madeira seca foi desenvolvido segundo o método descrito pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Madeiras - IPT/DIMAD D - 2 (IPT, 1980). Para cada madeira tratada e *in natura*, foram obtidas amostras com dimensões adaptadas de  $1,3 \times 0,6 \times 7,0$  cm (radial  $\times$  tangencial  $\times$  longitudinal). Cada unidade experimental foi constituída por um par de amostras, submetida ao contato com 40 cupins de madeira seca, sendo 38 operários e dois soldados, da espécie *Cryptotermes brevis* (Walker), família Kalotermitidae. O experimento foi mantido por 45 dias em laboratório a  $25 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$  de umidade relativa (CASTRO et al., 2019).

Ao final, foram obtidas a taxa de mortalidade dos cupins, número de orifícios e o dano avaliado por quatro examinadores através de nota que varia de 0 a 4, classificando como (0) a amostra que não teve nenhum dano superficial, (1) dano superficial, (2) dano moderado, (3) dano acentuado e (4) dano profundo (IPT, 1980).

#### 4.10.2 Ensaio de atividade biológica em taninos

O ensaio de atividade biológica em taninos foi adaptado das recomendações do NCCLS - National Committee for Clinical Laboratory Standards (2003) e Evancho et al. (2001) para avaliar a contaminação espontânea de soluções de taninos.

Estudos preliminares para avaliar o crescimento espontâneo de microrganismos em soluções de taninos resultaram em baixa inibição nas concentrações 5, 10 e 15%. Diante disso, foram testadas soluções de taninos em maiores concentrações (30, 50 e 100%).

Os meios de cultura BDA (batata, ágar e dextrose) foram preparados na proporção 39 gramas para 1 litro de água destilada, com esterilização em autoclave. A solução foi vertida na placa de Petri em capela de fluxo laminar e esterilizada com luz U.V. Após a esterilização, as placas foram submetidas ao teste de esterilidade ficando em incubação por 72 horas. Em seguida, as soluções de taninos/água destilada nas concentrações 30%, 50% e 100% foram vertidas em 50% da área da placa sobre o BDA gelatinizado. O ensaio foi realizado em triplicata.

As placas foram mantidas sem tampa em ambiente aberto durante 30 dias para avaliação da eficiência inibitória de soluções de taninos a microrganismo presentes no ar (fungos, bactérias e ácaros). A cada 3 dias o crescimento das colônias de microrganismos foi avaliado em fotografias feitas até o preenchimento de toda a placa.

#### 4.11 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi instalado em um delineamento inteiramente casualizado com 4 tratamentos, sendo um com a madeira *in natura* e três com diferentes concentrações de taninos. Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) ao nível de 5% de significância, e quando houve diferenças significativas, foi realizado teste Tukey utilizando o software SISVAR 5.8 (FERREIRA, 2011).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO TANINOS

#### 5.1.1 Caracterização Química Elementar e Teor de Metais

Os valores médios da composição química elementar e de metais do tanino comercial utilizado no tratamento das madeiras de pinus densificadas são apresentados na Tabela 2. A quantificação dos componentes químicos dos taninos é de fundamental importância para a indústria (WEILER et al., 2019), pois qualifica quanto a sua capacidade antioxidante, inibidora e reativa (SEPPERER et al., 2020; ZANETTI et al., 2021).

**Tabela 2-** Composição química elementar e de metais dos taninos

Análise Elementar (%)					Metais (mg/Kg)							
C	H	N	S	O	Fe	Ca	Cu	Mn	Mg	Na	K	
56,45	4,79	0,40	0,08	38,28	34,07	996,10	2,90	30,12	1201,49	892,06	13085,11	

Os taninos em estudo possuem composição rica em carbono e oxigênio, e com baixo teor de enxofre, e foram semelhantes aos encontrados por Zanetti et al. (2021) para taninos extraídos da espécie *Acacia mearnsii*, em que a porcentagem de carbono e enxofre foi de 52,3 e 0,04%, respectivamente. O teor de enxofre está relacionado aos sais de bissulfito ou sulfito de sódio adicionados durante o processo de extração dos taninos (WEILER et al., 2019). E o maior teor de carbono é uma característica dos taninos condensados que constitui a espécie *Acacia mearnsii* (ZANETTI et al., 2021). Os taninos condensados de acácia possuem em sua composição em média 70 a 80% de substâncias tânicas, que são unidades flavanoides, formadas, principalmente, por ácido p-cumárico (C<sub>9</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>) e catecol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>), e que possuem ação tóxica aos organismos xilófagos (PIZZI, 1983; TASCIOGLU et al., 2012; MISSIO et al., 2017).

O teor de nitrogênio do presente estudo foi de 0,40%, e segundo Weiler et al. (2019), pode variar entre 0,044 e 0,628% em taninos comerciais de acácia, e está associado ao complexo polissacarídeo-proteína presente na constituição da espécie em que foi extraído (GREIN et al. 2013; WEILER et al., 2019).

Dentre os metais, estão presentes teores significativos de ferro, cálcio, cobre, manganês, magnésio, sódio e potássio. A concentração considerável de potássio nos taninos está relacionada ao solo rico em KCl em que a espécie é cultivada (ZANETTI et al., 2021).

### 5.1.2 Caracterização das soluções de taninos

Os valores médios do pH, teor de sólidos e viscosidade das soluções de taninos nas concentrações de 5, 10 e 15%, são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3-** Valores médios de pH, teor de sólidos e viscosidade das soluções de taninos nas concentrações 5, 10 e 15%

Análise	Taninos 5%	Taninos 10%	Taninos 15%
pH	4,81 a <sup>(0,73)</sup>	4,70 b <sup>(0,64)</sup>	4,65 b <sup>(0,12)</sup>
Teor de sólidos (%)	4,29 c <sup>(1,15)</sup>	7,82 b <sup>(0,83)</sup>	11,33 a <sup>(1,72)</sup>
Viscosidade (cP)	3,60 c <sup>(0,42)</sup>	4,14 b <sup>(0,14)</sup>	4,68 a <sup>(0,12)</sup>

Médias seguidas horizontalmente pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p > 0,05$ ) para uma mesma variável. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação (%).

O pH das soluções de taninos possui caráter ácido, e diminuiu com o aumento da concentração dos taninos. Entretanto, o teor de sólidos e a viscosidade aumentaram com o incremento da concentração da solução, com os maiores valores na solução de taninos a 15%.

O pH das soluções preservativas de taninos pode ter influência na penetração do preservante na madeira, uma vez que a viscosidade da solução tende a aumentar com a variação do pH (TONDI et al., 2013a).

A viscosidade é um parâmetro importante a ser analisado, pois pode influenciar na penetração da substância tânica na estrutura da madeira. A viscosidade da solução de taninos é dependente do teor de sólidos, pH e temperatura (TONDI et al., 2013a), portanto, devido a menor concentração de taninos e menor teor de sólidos, a solução a 5% teve a menor viscosidade, comparada as soluções de taninos nas concentrações a 10 e 15%. E de acordo com Tondi et al. (2013a), a menor viscosidade pode resultar em maiores taxas de impregnação, no entanto, menores quantidades da substância preservativa são levadas para o interior da madeira.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

Os teores médios de extrativos, ligninas, holoceluloses e cinzas das madeiras de *Pinus elliottii in natura* e modificada por tratamento com taninos e densificação termomecânica, são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4-** Composição química da madeira *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificada por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica

Parâmetro (%)	Controle	Taninos 5%	Taninos 10%	Taninos 15%
Extrativos	5,48 c <sup>(1,04)</sup>	7,47 b <sup>(4,14)</sup>	8,70 ab <sup>(0,21)</sup>	8,88 a <sup>(6,34)</sup>
Lignina Total	29,68 b <sup>(1,24)</sup>	37,35 a <sup>(4,79)</sup>	34,26 ab <sup>(1,03)</sup>	38,43 a <sup>(6,69)</sup>
Holoceluloses	64,57 a <sup>(0,48)</sup>	54,81 b <sup>(3,81)</sup>	56,72 b <sup>(0,65)</sup>	52,31 b <sup>(5,94)</sup>
Cinzas	0,26 b <sup>(6,28)</sup>	0,36 a <sup>(6,64)</sup>	0,32 ab <sup>(10,34)</sup>	0,37 a <sup>(9,31)</sup>

Médias seguidas horizontalmente pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p > 0,05$ ) para uma mesma variável. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação (%).

Os teores médios dos componentes químicos da madeira de pinus *in natura* (controle) foram semelhantes aos encontrados por Acosta et al. (2021) para madeira de *Pinus elliottii* com idade de 25 anos, em que os teores de holoceluloses, lignina total e extrativos foram de 60, 30 e 5%, respectivamente.

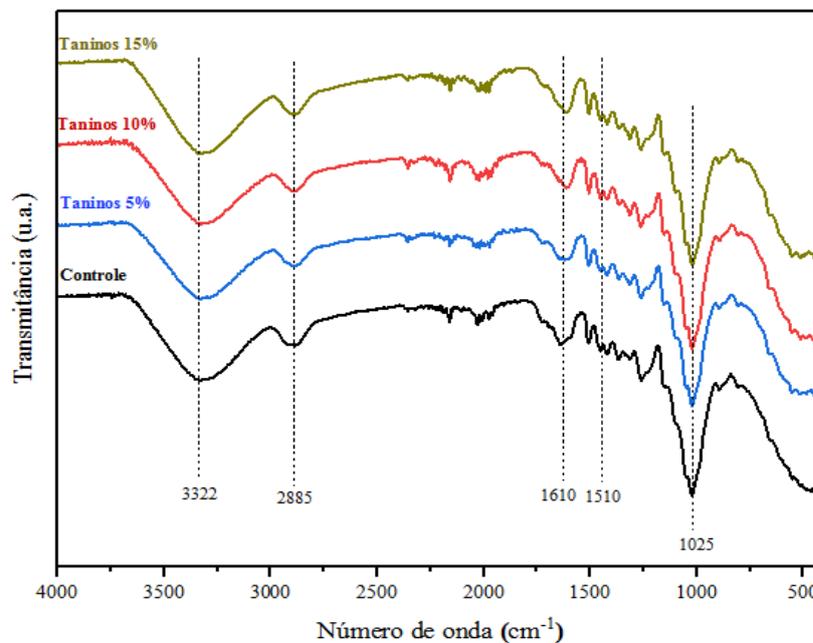
Em relação às madeiras modificadas, houve um incremento no teor de extrativos, comparado a madeira de pinus *in natura* (Tabela 4). Esse aumento se deve, principalmente, ao tratamento com taninos, que é um extrativo fenólico constituído por oligômeros de flavanoides, e que são quantificados durante a análise devido a solubilidade em solventes orgânicos e água quente (CARVALHO et al., 2015; WEILER et al., 2019).

Nas madeiras modificadas tratadas com taninos a 5 e 15%, os teores de lignina total aumentaram em relação a madeira de pinus *in natura*, enquanto que, os teores de holoceluloses diminuíram para todos os tratamentos. O pré-tratamento da madeira com ácido oxálico pode degradar parcialmente componentes da parede celular, como as hemiceluloses e ligninas, favorecendo a um aumento proporcional no teor de ligninas, provavelmente, devido a formação das pseudoligninas pelo processo de condensação e polimerização dos produtos da degradação desses componentes sob pré-tratamento em ácido (KUMAR et al., 2013; CARVALHO et al., 2015; SILVA et al., 2019, WAN et al., 2019).

O teor de cinzas aumentou nas madeiras modificadas tratadas com taninos a 5 e 15% em relação a madeira de pinus *in natura*. Os teores de cinzas das madeiras modificadas aumentaram devido à presença de materiais inorgânicos presentes nos taninos comerciais, como cálcio, magnésio e potássio (Tabela 2).

### 5.2.1 Análise de espectros FT-IR

Os espectros da madeira de *Pinus elliottii in natura* e modificadas pelo tratamento com taninos nas concentrações de 5, 10 e 15% e densificação termomecânica, são apresentados na Figura 3.



**Figura 3-** Espectros FT-IR de madeira de *Pinus elliottii in natura* e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica.

A banda larga em  $3322\text{ cm}^{-1}$  corresponde a vibração axial de ligação OH de álcoois, grupos fenólicos e ácidos carboxílicos presentes nos carboidratos e lignina (ESTEVEZ et al., 2013; YINGPRASERT et al., 2021). A banda  $2885\text{ cm}^{-1}$  é típica de vibrações do alongamento C – H dos grupos metil e metileno (SHARMA et al., 2020).

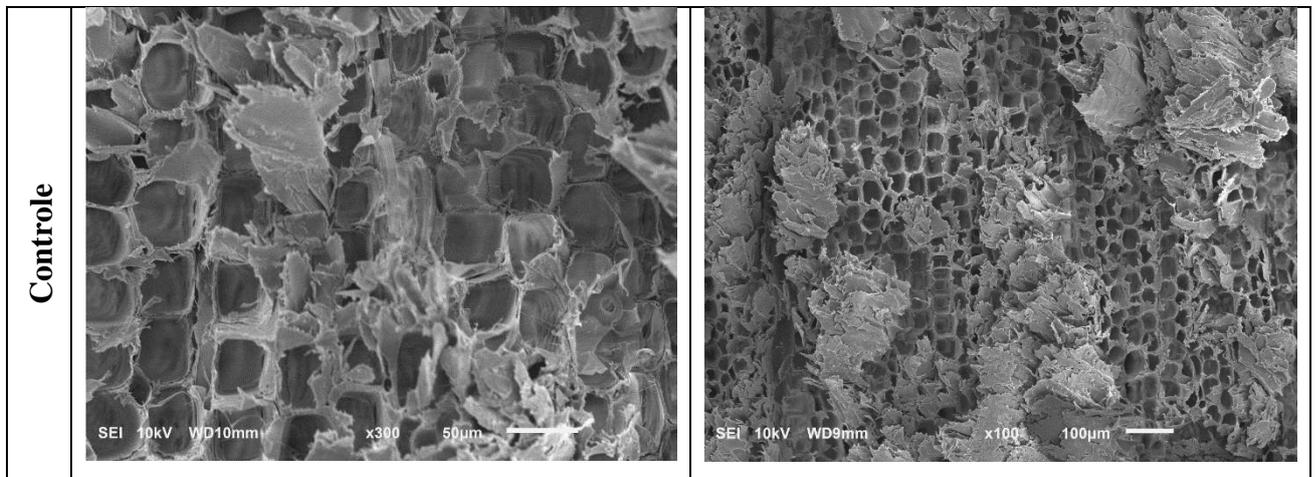
As regiões de  $1600$  e  $1500\text{ cm}^{-1}$  correspondem a vibrações do esqueleto aromático (C=C) dos anéis benzênicos característicos da lignina e taninos (TONDI et al., 2013; SCHNABEL et al., 2014; POZO et al., 2016).

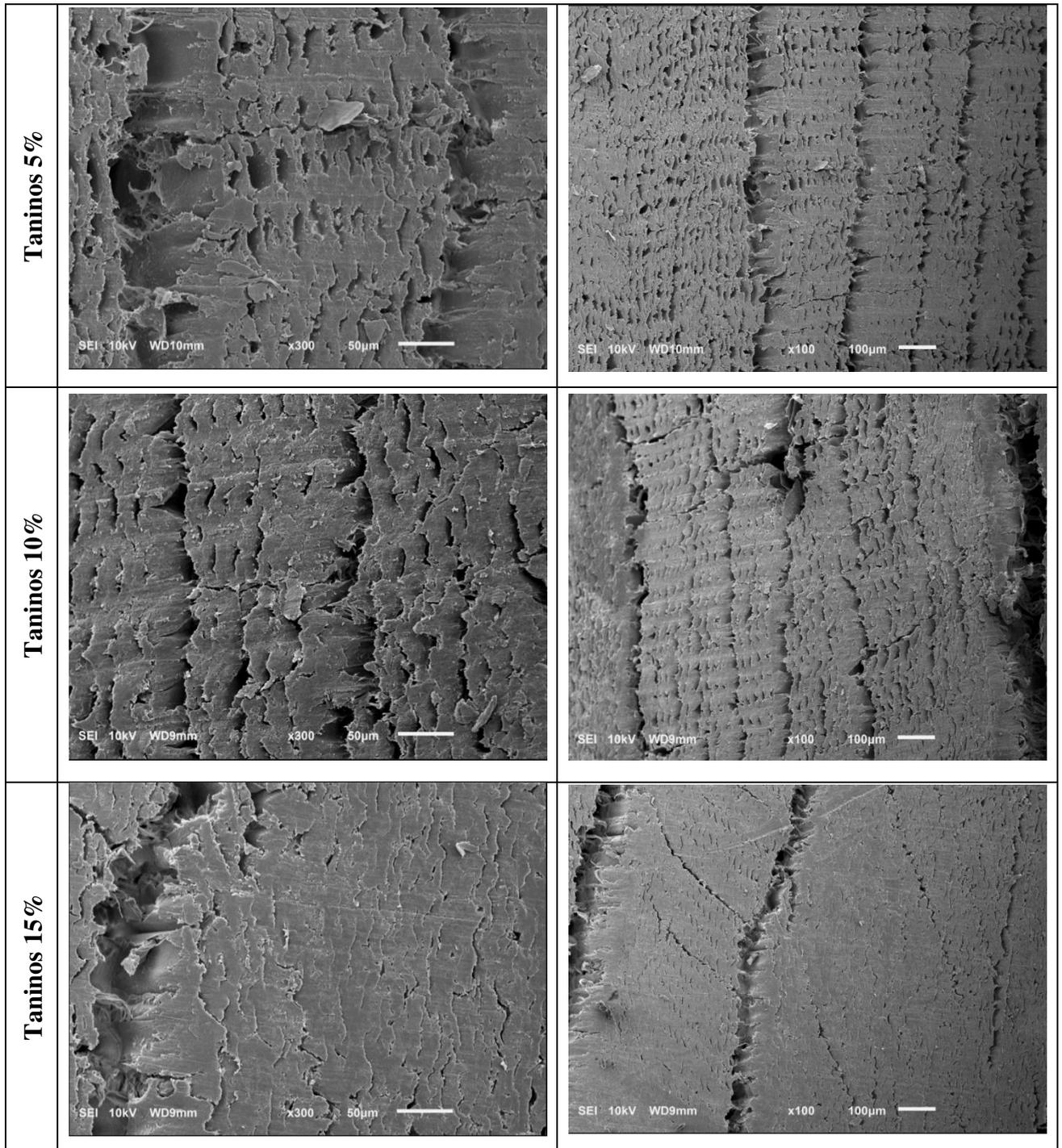
O aumento da intensidade na banda de  $1610\text{ cm}^{-1}$  para madeiras tratadas com taninos foi observado por outros autores, evidenciando a presença do preservante na madeira atribuído ao alongamento C=C do anel aromático (POLETTTO et al., 2012; TONDI et al., 2013; YINGPRASERT et al., 2021). No entanto, para madeiras tratadas e termodensificadas não foram identificadas modificações significativas nas bandas que representam a presença dos taninos, apesar de ter sido observado uma mudança de coloração nas madeiras tratadas.

As vibrações na banda de  $1025\text{ cm}^{-1}$  podem ser atribuídas a estiramentos das ligações  $\text{CH}_2\text{-OH}$  de álcoois primários, deformação C-O de grupos metoxílicos e ligações glicosídicas dos carboidratos (POZO et al., 2016; TRAORÉ et al., 2018).

### 5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Imagens de microscopia eletrônica de varredura para avaliar as alterações anatômicas das madeiras de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica, são apresentadas na Figura 11.





**Figura 11** – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do plano transversal das madeiras de *Pinus elliotii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica.

De acordo com a análise das imagens de microscopia eletrônica de varredura, as modificações resultaram em alterações da estrutura anatômica da madeira de pinus. Com a

compressão da madeira, houve redução do volume de espaços vazios e concentração das paredes celulares colapsadas, semelhante ao observado por BUDAKÇI et al. (2016) para madeiras das espécies *Abies bornmulleriana*, *Tilia grandifolia* e *Populus nigra* termomodificadas. No entanto, a parede celular não foi totalmente danificada, permanecendo nítida a estrutura dos traqueídeos em diversas regiões, principalmente, nas madeiras modificadas tratadas com as menores concentrações de taninos (5 e 10%). Para a madeira tratada a 15% de taninos a nitidez da estrutura do lúmen dos traqueídeos foi reduzida.

A pressão exercida pela prensa hidráulica em conjunto com a temperatura de 150 °C favorecem a compressão dos componentes anatômicos da madeira, gerando um material de maior resistência mecânica e densidade, comparado à madeira de pinus *in natura* (controle). A temperatura da prensa acima da temperatura de transição vítrea dos polímeros amorfos da madeira, associada ao pré-tratamento com ácido oxálico que reage com as hemiceluloses e lignina, são responsáveis pela deformação da parede celular dos traqueídeos, promovendo a compressão da estrutura sem a ocorrência de defeitos que influenciassem negativamente na resistência mecânica do material resultante (BUDAKÇI et al., 2016; PELIT; YALÇIN, 2017; SILVA et al., 2019).

## 5.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

### 5.4.1 Retratibilidade

Os valores médios da contração e inchamento (radial, tangencial e volumétrico), coeficiente anisotrópico e umidade de equilíbrio higroscópico da madeira de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento com taninos a 5, 10 e 15% e por densificação termomecânica, são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5-** Variações dimensionais da madeira de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificada por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica

Parâmetros	Controle	Taninos 5%	Taninos 10%	Taninos 15%
C.T. (%)	5,61 a <sup>(7,32)</sup>	5,06 ab <sup>(8,81)</sup>	4,85 ab <sup>(5,77)</sup>	4,27 b <sup>(14,07)</sup>
C.R. (%)	4,53 b <sup>(9,22)</sup>	12,53 a <sup>(6,80)</sup>	14,13 a <sup>(6,34)</sup>	12,78 a <sup>(7,88)</sup>
I.T. (%)	5,94 a <sup>(7,75)</sup>	5,33 ab <sup>(9,30)</sup>	5,10 ab <sup>(6,08)</sup>	4,47 b <sup>(14,60)</sup>
I.R. (%)	4,75 b <sup>(9,63)</sup>	14,33 a <sup>(7,79)</sup>	16,47 a <sup>(7,32)</sup>	14,66 a <sup>(9,03)</sup>

C.V. (%)	10,44 b <sup>(4,17)</sup>	17,26 a <sup>(3,56)</sup>	18,77 a <sup>(6,19)</sup>	16,93 a <sup>(4,85)</sup>
I.V. (%)	11,63 b <sup>(4,66)</sup>	20,87 a <sup>(4,33)</sup>	23,12 a <sup>(7,51)</sup>	20,39 a <sup>(5,85)</sup>
C.A.	1,25 a <sup>(11,37)</sup>	0,41 b <sup>(14,78)</sup>	0,34 b <sup>(6,13)</sup>	0,34 b <sup>(19,46)</sup>
U.E.H. (%)	15,13 a <sup>(0,72)</sup>	10,04 b <sup>(3,30)</sup>	9,07 c <sup>(2,11)</sup>	9,32 c <sup>(2,53)</sup>

C.T.: Contração Tangencial; C.R.: Contração Radial; I.T.: Inchamento Tangencial; I.R.: Inchamento Radial; C.V.: Contração Volumétrica; I.V.: Inchamento Volumétrico; C.A.: Coeficiente Anisotrópico; U.E.H.: Umidade de Equilíbrio Higroscópico.

Médias seguidas horizontalmente pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p > 0,05$ ) para uma mesma variável. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação (%).

Os valores médios de contração e inchamento radial das madeiras modificadas por tratamento preservativo com taninos e por densificação termomecânica foram os que tiveram as maiores variações em relação madeira de pinus *in natura*. Para a contração radial houve um aumento de 190% para as madeiras modificadas em relação a madeira de pinus *in natura*, e para o inchamento radial esse incremento foi de 219%. A maior propensão às variações dimensionais da madeira modificada no sentido em que foi comprimida se deve à energia de deformação elástica que se armazena nas macromoléculas de celulose devido ao esforço de compressão, promovendo uma nova conformação entre as ligações de hidrogênio que unem a celulose e hemiceluloses, e entre as ligações covalentes que unem hemiceluloses e lignina, havendo, portanto, uma deformação reversível durante o processo de reumidecimento (LAINE et al., 2013a).

O tratamento com taninos pode aprimorar a estabilidade dimensional da madeira, devido à possibilidade de penetração na parede celular e reação com regiões amorfas entre as microfibrilas, causando a redução da higroscopicidade da madeira (YINGPRASERT et al., 2021). No entanto, nas madeiras termodensificadas não foi observado redução da variação dimensional no sentido da compressão (radial), e são necessários estudos posteriores para a elucidação dessas reações entre os taninos e a parede celular da madeira modificada.

O inchamento e contração tangenciais reduziram em 24% para as madeiras modificadas tratadas com taninos na concentração de 15%. Em geral, na direção tangencial a madeira tem as maiores variações dimensionais em relação ao sentido radial, devido ao arranjo helicoidal das microfibrilas da parede dos traqueídeos tangenciais, que propiciam uma maior variação dimensional nesse sentido (KOLLMAN; CÔTÉ, 1968; OLIVEIRA et al., 2010; HANSSON et al., 2017), além da influência restritiva dos raios na direção radial que fazem com que suas variações dimensionais sejam menores (KOLLMAN; CÔTÉ, 1968; SILVA; OLIVEIRA, 2003;

OLIVEIRA et al., 2010). No entanto, as madeiras modificadas por termodensificação tendem a recuperar sua dimensão original quando exposta a umidade ou com resfriamento após o processo de compressão, pelo fenômeno conhecido como “*springback*” (DUBEY et al., 2016; NEYSES et al., 2019), colaborando, portanto, com a maior variação no sentido radial em comparação com o tangencial (Tabela 5).

A contração e o inchamento volumétrico aumentaram em média 69 e 84%, respectivamente, para as madeiras modificadas, em relação a madeira de pinus *in natura*. Após a modificação da madeira, a média da contração volumétrica foi 17%, e a de inchamento volumétrico 21%. Em madeiras do gênero *Pinus* a contração volumétrica pode variar de 8 a 10% (TRIANOSKI et al., 2013a), e o inchamento entre 9 e 14% (MODES et al., 2013; GULLER, 2012; TIRYAKI et al., 2016).

O coeficiente anisotrópico reduziu para as madeiras modificadas devido ao aumento da variação radial das madeiras modificadas (com taninos e por densificação termomecânica) com processo de compressão no sentido radial. Estabelecendo-se classes de qualidade da madeira em função da anisotropia, conforme proposto por Logsdon et al. (2008), é possível classificar a madeira de pinus *in natura* e modificadas como pertencentes à categoria de madeiras “excelentes”, com alta estabilidade dimensional, cujo coeficiente de anisotropia pode ser de até 1,50. No entanto, o coeficiente não deve ser avaliado isoladamente, pois pode sub ou superestimar o fator de classificação das madeiras (OLIVEIRA et al., 2010), sendo necessário considerar as variações dimensionais específicas de cada sentido (tangencial e radial) (OLIVEIRA et al., 2010; VALENTE et al., 2013).

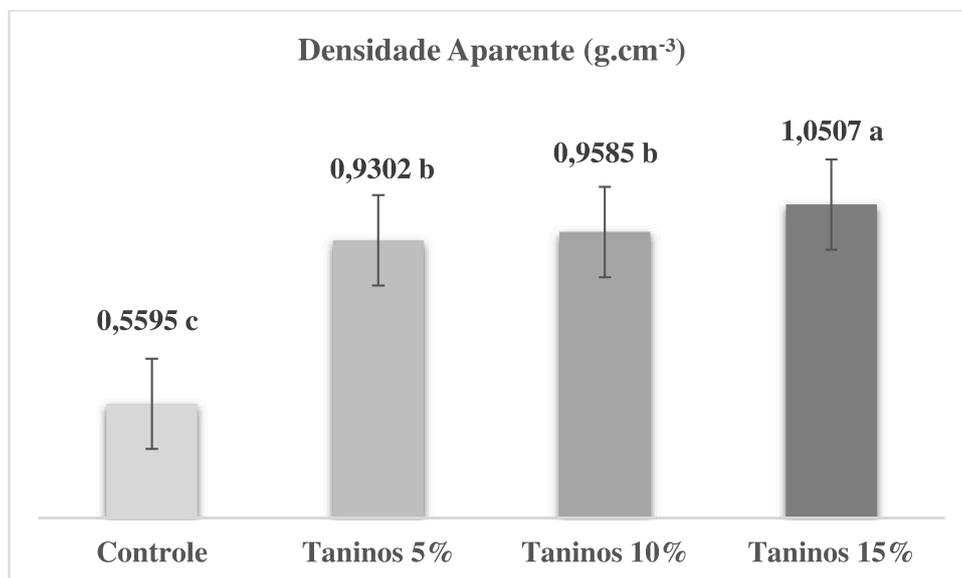
Portanto, considerando o aumento nos percentuais de contração e inchamento radiais das madeiras modificadas, é possível concluir que as mesmas não são estáveis no sentido em que foram comprimidas (radial), ainda que o coeficiente de anisotropia indique alta estabilidade dimensional, sendo recomendado, neste caso, o uso de verniz, stain, tinta ou selador para diminuir a higroscopicidade e a instabilidade dimensional da madeira no sentido radial.

Houve redução na umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) de 33% para as madeiras modificadas tratadas com taninos na concentração de 5%, e, em média, 39% para as amostras tratadas com taninos a 10 e 15%, em relação à madeira de pinus *in natura* (Tabela 5). A redução da UEH das madeiras modificadas pode ter sido influenciada pela degradação das hemiceluloses, devido ao pré-tratamento da madeira com ácido oxálico que favorece a redução

dos grupos hidrofílicos entre as cadeias moleculares das microfibrilas de celulose (SILVA, 2019; SILVA et al., 2019). O tratamento da madeira com taninos também possibilita a redução da higroscopicidade devido à penetração na parede celular e reação com regiões amorfas entre as microfibrilas (YINGPRASERT et al., 2021).

#### 5.4.2 Densidade Aparente

Os valores médios de densidade aparente das madeiras de pinus *in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica, são apresentados na Figura 4.



**Figura 4** - Densidade aparente média de madeira de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p > 0,05$ ). \*UEH das amostras: 15, 10, 9 e 9%, respectivamente.

Houve aumento significativo da densidade aparente das madeiras de pinus modificadas em relação à *in natura* (Figura 4). O incremento de densidade aparente das madeiras modificadas tratadas com a concentração de 15% de taninos foi 87,8%; e, em média, 68,8% para aquelas tratadas com as concentrações de taninos de 5 e 10%. A compressão da madeira pelo processo de densificação termomecânica é responsável pelo achatamento das estruturas anatômicas, com a redução dos espaços vazios (lúmens) e concentração de massa lignocelulósica

por unidade volumétrica, tendo como consequência, a formação de um material mais homogêneo de maior densidade e resistência mecânica (LAINE et al., 2016; PERTUZATTI et al., 2018; SILVA, 2019). Com a alta temperatura de prensagem (150 °C), parte da lignina que constitui a madeira e que não é removida durante o pré-tratamento com ácido oxálico (SILVA et al., 2019), “plasticiza”, contribuindo para a moldagem e formação da madeira de alta densidade (Figura 5).



**Figura 5-** Madeiras de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica.

Para as madeiras modificadas, houve diferença significativa entre os tratamentos, com um aumento de 10% na densidade aparente das madeiras modificadas tratadas com maior concentração de taninos (15%), comparado às madeiras tratadas com as menores concentrações (5 e 10%). O tratamento com taninos pode ser responsável pelo incremento da densidade aparente das madeiras modificadas, uma vez que, nas concentrações de taninos e no tempo de imersão que foram aplicados em estudo, há uma tendência de impregnação dos traqueídeos e raios que compõem a estrutura anatômica da madeira de pinus (TONDI et al., 2013a), justificando, principalmente, o aumento de densidade da madeira modificada tratada com taninos a 15%, pois há aumento de massa para um mesmo volume.

#### 5.4.2.1 Densitometria de Raios X

As imagens de raios X e os perfis densitométricos da madeira de *Pinus elliottii in natura* e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica, são apresentados na Figura 6.

Na imagem de raios X em escala de cinza da madeira de pinus *in natura* (amostra controle), é possível observar regiões com tonalidade de cinza escuro, cuja a densidade aparente é menor e pode atingir até  $0,202 \text{ g.cm}^{-3}$ ; e regiões com tonalidade de cinza claro, com densidade aparente de  $1,125 \text{ g.cm}^{-3}$ . Nas imagens de raios X em escala de cinza das madeiras modificadas por tratamento preservativo com taninos e por densificação termomecânica, a predominância

de regiões em tons de cinza claro, são características da maior densidade das amostras modificadas em relação à controle, cuja densidade máxima foi de 1,072, 1,145 e 1,252 g/cm<sup>3</sup>, para os tratamentos com taninos a 5, 10 e 15%, respectivamente.

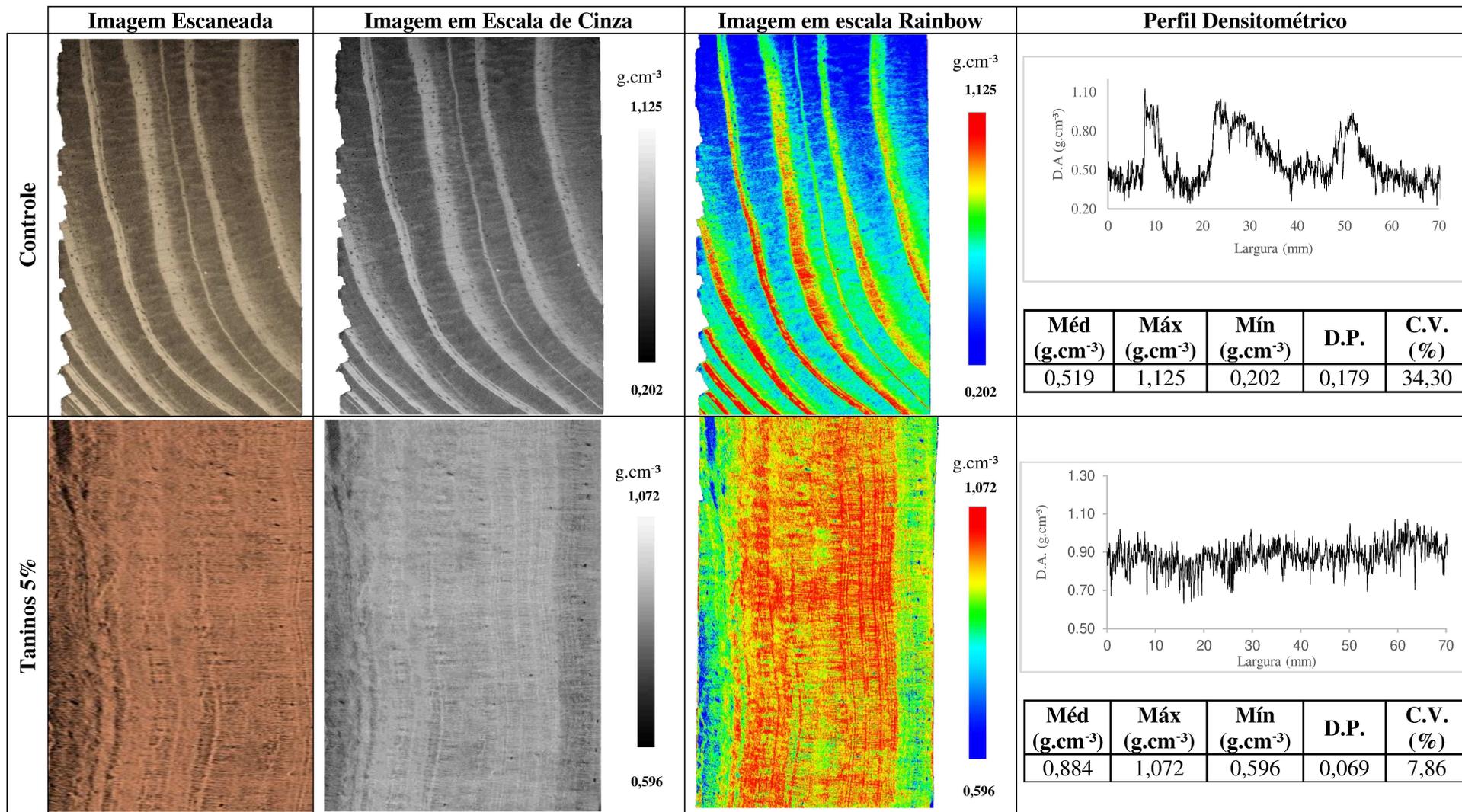
Comportamento semelhante ocorre nas imagens em escala rainbow (colorida), em que as regiões de menor densidade da madeira possuem tonalidade azul, e as de maior densidade, tonalidade vermelha. Na amostra controle, a variação de tonalidade entre áreas de menor e maior densidade se alternam seguindo as mudanças do lenho inicial (menor densidade - cor azul) e tardio (maior densidade – cor vermelha). Nas imagens em escala rainbow das amostras modificadas, essa variação nos lenhos não é nítida, e há predominância de tons de vermelho, amarelo e verde que são resultantes da maior densidade das madeiras modificadas em relação à madeira de pinus *in natura*.

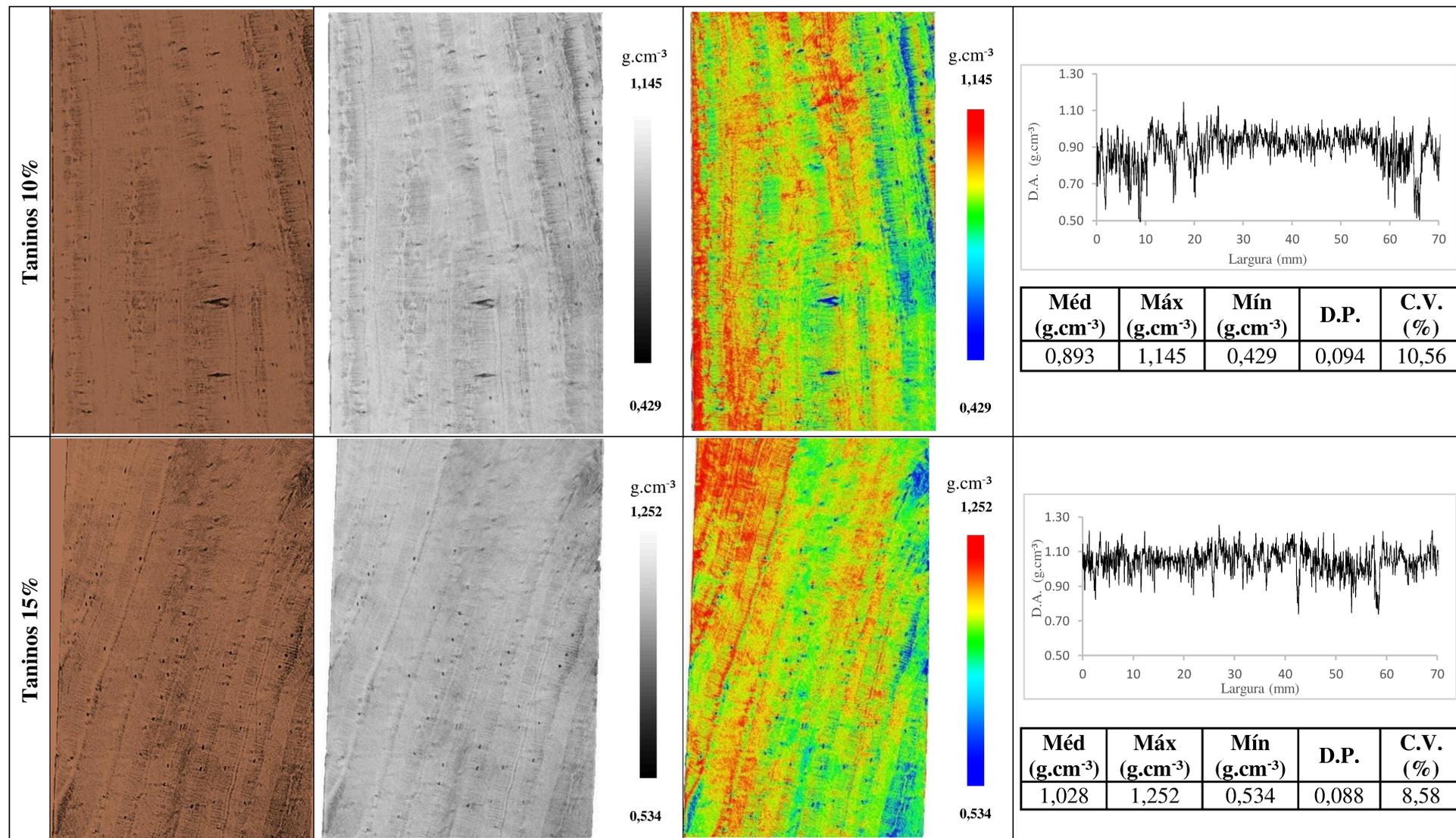
Na madeira de pinus *in natura*, as variações de densidade aparente ocorrem devido a diferenciação do lenho inicial e tardio que são formados com o crescimento em diâmetro da árvore. Nas coníferas, as regiões de lenho tardio são formadas durante o período de lento crescimento da árvore, e possui como característica a parede dos traqueídeos mais espessa e lúmens menores (TRIANOSKI et al., 2013b; MARINI et al., 2021), resultando em maior densidade nessas áreas; enquanto que no lenho inicial, os traqueídeos possuem paredes mais finas e lúmens maiores (TRIANOSKI et al., 2013b), tendo como característica a formação de regiões de menor densidade na madeira. Na madeira modificada essa variação dos lenhos não é nítida devido à compressão da madeira pelo processo de densificação termomecânica, que resulta na junção dos lenhos e maior concentração de massa lignocelulósica por unidade volumétrica, formando um material mais homogêneo e de maior densidade aparente (LAINE et al., 2016; PERTUZATTI et al., 2018; SILVA, 2019).

No perfil densitométrico da madeira de pinus *in natura* (controle), as regiões de lenho tardio (de maior densidade) são caracterizadas pelos picos de densidade, que atingiram a densidade aparente máxima de 1,125 g.cm<sup>-3</sup> (Figura 6). Enquanto que, nas áreas de lenho inicial, em que ocorre a presença de traqueídeos com paredes mais finas e lúmens maiores, a densidade é menor, sendo representado nos perfis pelos vales mais baixos.

Nos perfis densitométricos das madeiras modificadas, os picos de densidade caracterizam-se pela maior homogeneidade das amostras, com menor variação entre as áreas de baixa e alta densidade aparente, comparados a amostra controle. Os menores coeficientes de

variação em relação a amostra controle (34,30%) também evidenciam a maior homogeneidade das madeiras modificadas (Figura 6). A homogeneidade pode ser um fator positivo no processo de beneficiamento da madeira, pois garante características físicas e mecânicas semelhantes ao longo da peça, resultando em menores propensões a defeitos (ROSZYK et al., 2020). Além de que, a maior densidade das madeiras modificadas pode qualificá-las para a produção de móveis, pisos e usos construtivos (ULKER et al., 2012; PERTUZZATTI et al., 2018).

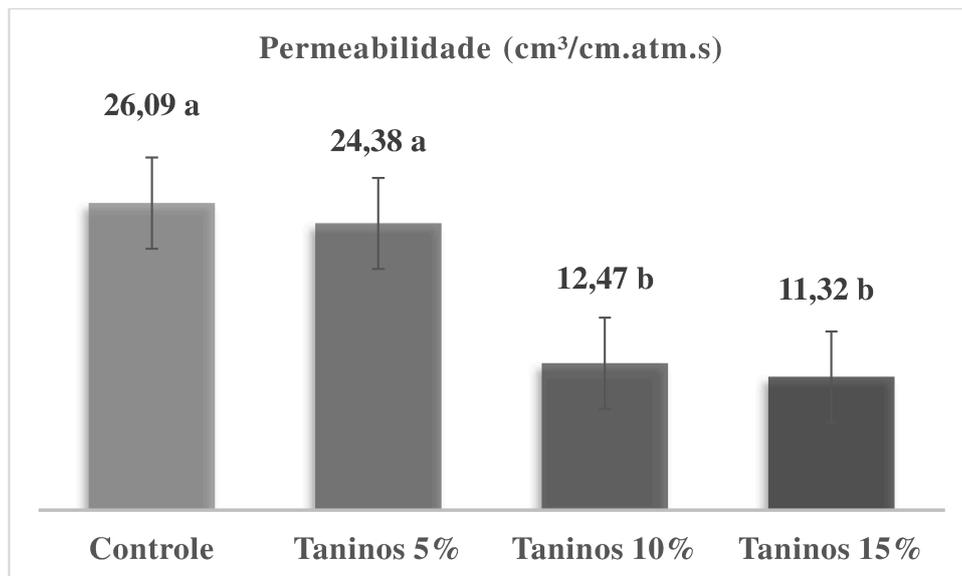




**Figura 6** - Imagens de raios X e perfis densitométricos da madeira de *Pinus elliottii in natura* e modificada por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e por densificação termomecânica. Méd: média de densidade aparente; Máx: valor máximo de densidade aparente; Mín: valor mínimo de densidade aparente; D.P.: desvio padrão; C.V.: coeficiente de variação.

### 5.4.3 Permeabilidade

Os valores médios da permeabilidade ao ar da madeira de pinus *in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e por densificação termomecânica, são apresentados na Figura 7.



**Figura 7-** Permeabilidade longitudinal (cm<sup>3</sup>/cm.atm.s) da madeira de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p > 0,05$ ).

Em relação à madeira de pinus *in natura* (amostra controle), a permeabilidade ao ar na direção longitudinal foi semelhante aos valores encontrados na literatura, que variaram entre 5,51 a 30,2 cm<sup>3</sup>/cm.atm.s para madeiras do gênero *Pinus* (MAGALHÃES et al., 2004; POONIA et al., 2016). Estes valores podem ser influenciados pelas características anatômicas (como a presença de canais de resina, cristais e corpos estranhos), densidade e da saturação de seiva nos espaços livres da madeira úmida (COMSTOCK, 1970; MAGALHÃES et al., 2004; POONIA et al., 2016).

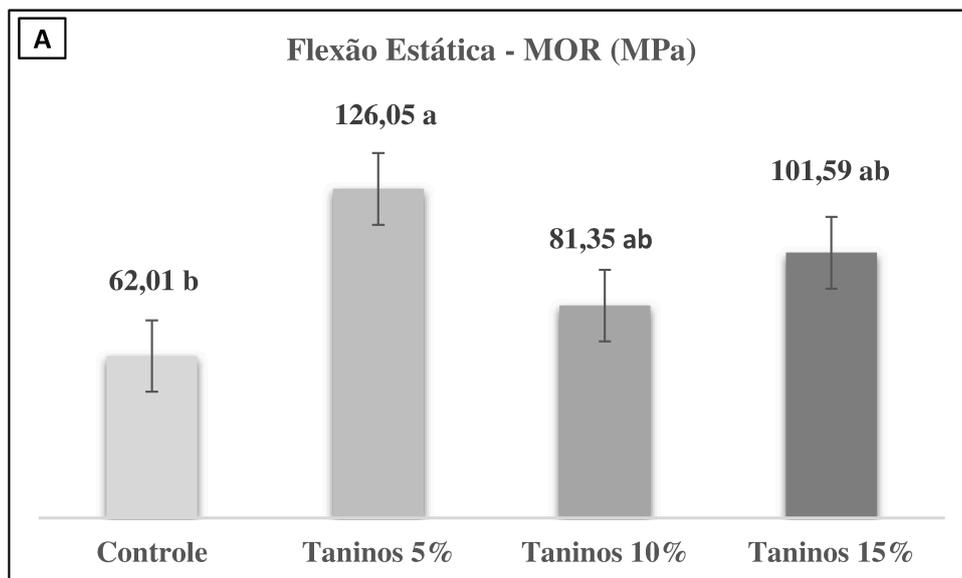
Com a modificação das madeiras pelo processo de densificação termomecânica, é presumido que haja a diminuição da permeabilidade na direção longitudinal devido à compressão e deformação da estrutura anatômica, e consequente diminuição da vazão do ar no interior dos traqueídeos. No entanto, foi observado que a adição de 10 e 15% de solução tânica ocasionou na redução média de 54% da permeabilidade das madeiras. A maior quantidade de

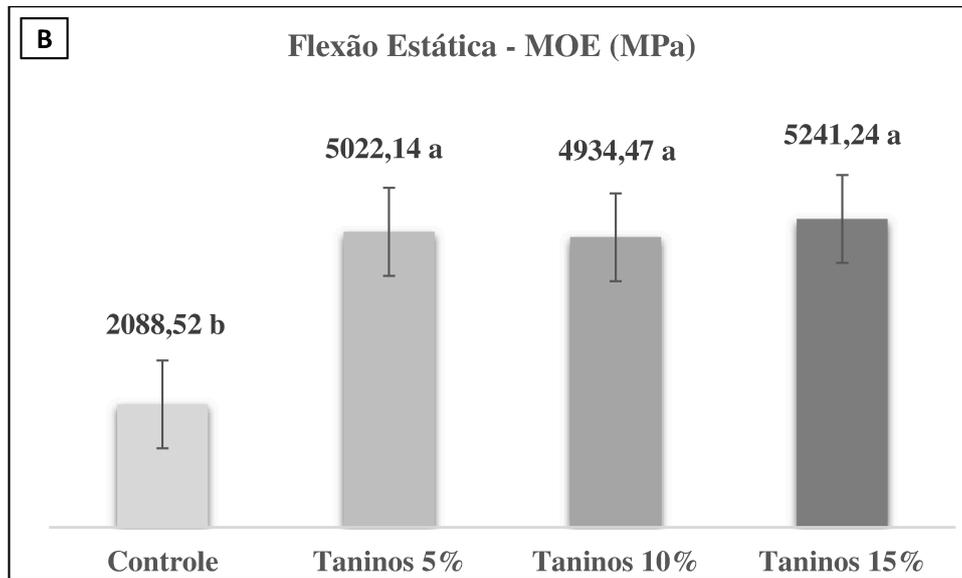
substância tânica aderida, impregnada ou ligada à parede celular pode ter contribuído para a redução da permeabilidade ao ar na direção longitudinal.

## 5.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

### 5.5.1 Flexão Estática

Os valores médios dos módulos de ruptura e elasticidade resultantes do ensaio de flexão estática na madeira de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificada por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e por densificação termomecânica, são apresentados na Figura 8.





**Figura 8-** Módulos de Ruptura (A) e Elasticidade (B) da madeira de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p > 0,05$ ).

Na madeira *in natura* os valores médios de resistência (Figura 8) são similares aos encontrados por Acosta et al. (2021), para madeira de *Pinus elliottii* proveniente de plantio com idade de 25 anos, em que os valores de MOR e MOE foram 50 e 2000 MPa, respectivamente. No entanto, esses valores podem variar na literatura devido a fatores inerentes a amostra utilizada, como idade, propriedades químicas, físicas da madeira, bem como posição radial e longitudinal de amostragem (PERTUZZATTI et al., 2018; SCHULZ et al., 2019).

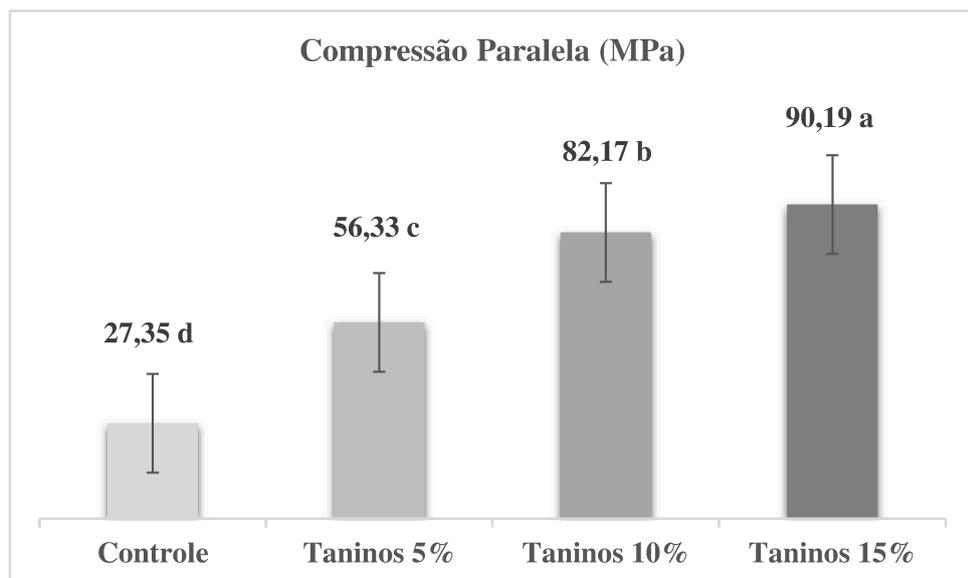
O módulo de ruptura da madeira modificada preservada com taninos a 5% diferiu da madeira de pinus *in natura*, com um incremento de 103% (Figura 8 - A). Houve um aumento médio para o módulo de elasticidade da madeira modificada em relação à *in natura* de 142% (Figura 8 - B). Comportamento semelhante foi observado na madeira de *Pinus elliottii* pré-tratada pelo processo de hidrólise e submetida a densificação termomecânica a 150 °C durante 60 minutos, obtendo um aumento nos módulos de ruptura e elasticidade em 294 e 84%, respectivamente (PERTUZZATTI et al., 2018). A densificação termomecânica é responsável por melhorar o desempenho mecânico da madeira, com incremento na resistência devido ao rompimento da parede celular e alinhamento das nanofibras de celulose que aumentam a ligação de hidrogênio e reforçam a estrutura da madeira (SONG et al., 2018). Além disso, o pré-tratamento com ácido oxálico e a direção da compressão no sentido radial reduzem os danos a estrutura, como rachaduras e empenamentos dos anéis de crescimento, favorecendo as

melhorias nas propriedades mecânicas e físicas da madeira modificada (SANDBERG et al., 2012; SILVA, 2019; SILVA et al., 2019).

Os valores de resistência das madeiras modificadas se aproximam dos valores encontrados na literatura para madeiras de espécies cujas propriedades mecânicas são reconhecidamente superiores, como angelim-pedra (*Hymenolobium* spp.), tauari (*Couratari oblongifolia*) e peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*), as quais o módulo de ruptura e elasticidade variam de 88-109 MPa e 9248-10591 MPa, respectivamente (IPT, 2009).

### 5.5.2 Compressão Paralela

Os valores médios de compressão paralela da madeira de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e por densificação termomecânica, são apresentados na Figura 9.



**Figura 9** - Compressão Paralela da madeira de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p > 0,05$ ).

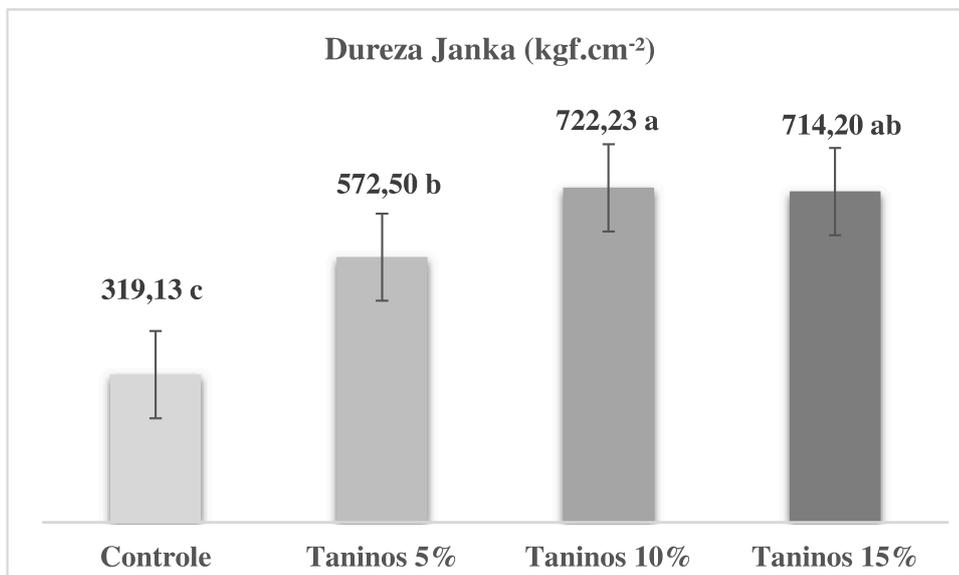
Houve um aumento gradual da resistência à compressão paralela das madeiras de pinus modificadas. Os maiores incrementos ocorreram nas madeiras tratadas com taninos nas concentrações de 10 e 15%, com 200 e 229%, respectivamente. A modificação da madeira com o processo de densificação termomecânica é responsável pelo aumento da resistência mecânica da madeira, incluindo da resistência à compressão paralela às fibras (LAINE et al., 2013b;

PERTUZZATTI et al., 2018; SONG et al., 2018), devido ao rearranjo dos elementos anatômicas após a compactação, que resultam numa estrutura mais homogênea com menor proporção de espaços vazios e maior quantidade de massa lignocelulósica por unidade de volume, gerando um material com maior capacidade de resistir a cargas mecânicas (ULKER et al., 2012; PERTUZZATTI et al., 2018; SILVA, 2019). No entanto, os tratamentos com diferentes concentrações de taninos podem também contribuir para o aumento da resistência à compressão paralela, principalmente em maiores teores, como na concentração de 15%. O aumento do conteúdo de extrativos no interior da parede celular dos traqueídeos pode influenciar em melhores propriedades mecânicas na direção transversal da madeira, como na resistência a compressão e dureza (GÜNDÜZ et al., 2011; SOMMERAUER et al., 2019).

Os valores médios de resistência a compressão paralela das madeiras modificadas, que variam de 56,33 a 90,19 MPa se aproximam dos valores encontrados na literatura para madeiras de espécies cujas propriedades mecânicas são reconhecidamente superiores, como angelim-pedra (*Hymenolobium* spp.), cedroana (*Cedrelinga cateniformis*) e peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*), as quais a resistência à compressão varia de 23,3 a 52,3 MPa (IPT, 2009).

### 5.5.3 Dureza Janka

Os valores médios de resistência a dureza Janka no sentido normal às fibras da madeira de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e por densificação termomecânica, são apresentados na Figura 10.



**Figura 10** - Dureza Janka das madeiras de *Pinus elliottii in natura* (controle) e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p > 0,05$ ).

Houve aumento significativo na dureza das madeiras modificadas em relação a *in natura*, em que o tratamento da madeira modificada com taninos a 10% de concentração teve um incremento no valor da dureza de 126,3% em relação à madeira sem nenhum tratamento.

Com o processo de densificação termomecânica, os parâmetros como tempo de fechamento e temperatura da prensa podem influenciar no aumento dureza e densidade da madeira (LAINE et al., 2013b). No entanto, o tratamento com taninos também tem impacto positivo no processo, visto que, foi observado no tratamento da madeira da espécie *Fagus sylvatica* com preservante à base de copolímeros de taninos, aumento da dureza de 45, 25 e 12% nas direções axial, radial e tangencial, respectivamente (SOMMERAUER et al., 2019).

A dureza Janka é um dos principais parâmetros avaliados para madeiras utilizadas na produção de pisos (ANPM, 2015), pois é uma variável influenciada pelo esforço aplicado na superfície por objetos e trânsito de pessoas. E conforme proposto pela Associação Nacional dos Produtores de Pisos de Madeira - ANPM (2015), a madeira pode ser classificada de baixa dureza quando os valores médios de resistência estão abaixo de 364 kgf.cm<sup>-2</sup>; média dureza entre 364 e 802 kgf.cm<sup>-2</sup>, e alta dureza acima de 802 kgf.cm<sup>-2</sup>. As madeiras de pinus modificadas são classificadas média dureza, se diferenciando da madeira *in natura* (baixa dureza). Os valores médios de dureza Janka das madeiras modificadas variaram entre 572,50 e 722,23 kgf.cm<sup>-2</sup>, sendo estes, semelhantes à de algumas das principais espécies de madeiras utilizadas para a produção de pisos, tais como *Eucalyptus grandis*, *Hovenia dulcis* (uva-do-japão), *Pterogyne nitens* (amendoim bravo) e *Apuleia leiocarpa* (garapa), cujas durezas são 580, 596, 608 e 845 kgf.cm<sup>-2</sup>, respectivamente (ANPM, 2015; MARCHESAN et al., 2020).

## 5.6 ENSAIOS BIOLÓGICOS

### 5.6.1 Cupins de madeira seca

Os resultados de resistência biológica ao ataque de cupins de madeira seca (*Cryptotermes brevis*) das madeiras de *Pinus elliottii in natura* e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica, são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6-** Resistência biológica ao ataque de cupins da madeira de *Pinus elliottii* *in natura* (controle) e modificadas por tratamento com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica

<b>Parâmetro</b>	<b>Controle</b>	<b>Taninos 5%</b>	<b>Taninos 10%</b>	<b>Taninos 15%</b>
Mortalidade (%)	49,58 b <sup>(18,16)</sup>	50,83 b <sup>(34,17)</sup>	62,08 ab <sup>(18,26)</sup>	76,67 a <sup>(17,82)</sup>
Dano	3,0 a <sup>(28,45)</sup>	2,0 b <sup>(39,01)</sup>	1,7 bc <sup>(48,99)</sup>	1,2 c <sup>(67,76)</sup>
Número de orifícios	3 a <sup>(38,97)</sup>	2 ab <sup>(41,83)</sup>	2 ab <sup>(27,39)</sup>	1 b <sup>(54,77)</sup>

Médias seguidas de mesma letra na mesma linha são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação das amostras.

Houve incremento no percentual da mortalidade de cupins em 54% para o tratamento com taninos na concentração de 15%, em relação a madeira de pinus *in natura*.

O tratamento com taninos teve impacto na redução de danos e no número de orifícios causados pelos cupins. Os taninos possuem toxicidade a microrganismos e insetos, e em sua composição as protocianidinas (que são polímeros de flavan-3-ol e/ou flavan-3,4-diol) são os compostos termiticidas com capacidade de inativar enzimas dos cupins (OHARA et al., 1994; MONTEIRO et al., 2005; OGAWA; YAZAKI, 2018), favorecendo a mortalidade e baixo nível de dano à madeira. No entanto, parte da composição dos extratos tânicos é constituída de substâncias não-tânicas, formadas por carboidratos, gomas hidrocoloides e frações de aminoácido (PIZZI, 1983; MISSIO et al., 2017), que pode reduzir a eficiência completa (100% da mortalidade média dos cupins, sem danos à madeira) da substância preservativa no controle de cupins.

Na madeira de pinus *in natura* o dano é considerado acentuado (nível 3); e para as madeiras modificadas, houve diminuição no nível de dano para moderado nas madeiras tratadas com taninos a 5 e 10%, e superficial para tratadas com taninos a 15%.

Na madeira de pinus *in natura* o dano é considerado acentuado, com presença de orifícios que ultrapassam a espessura da madeira, galerias e cavidades superficiais; e para as amostras tratadas com as concentrações de taninos a 5 e 10% o nível de dano é moderado, com orifícios e cavidades principalmente na região da junção entre as madeiras que formam a amostra (área em que, provavelmente, há maior susceptibilidade à deterioração). Para a madeira tratada com taninos a 15% o nível de dano é superficial, com menor número de orifícios e cavidades (Figura 12).

Nas madeiras modificadas com taninos na concentração a 15%, houveram amostras em que a mortalidade de cupins foi de 100% (Figura 12, seta vermelha), sem nenhum dano à superfície. Esse comportamento em conjunto com o menor número de orifícios e danos

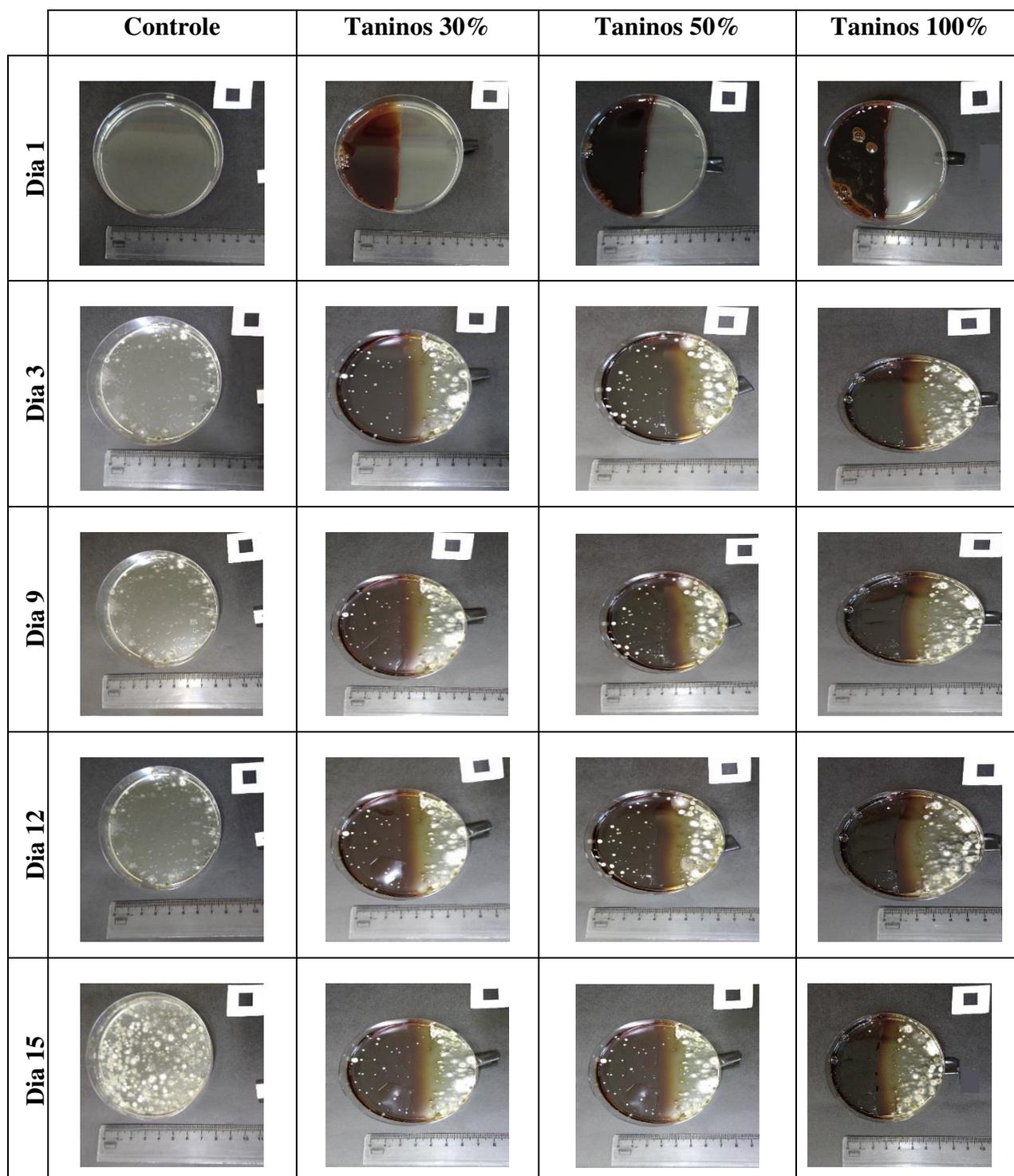
causados às madeiras modificadas com a concentração de taninos de 15%, pode evidenciar a eficiência do tratamento preservativo em madeiras densificadas, ao ataque de cupins da espécie *Cryptotermes brevis*.

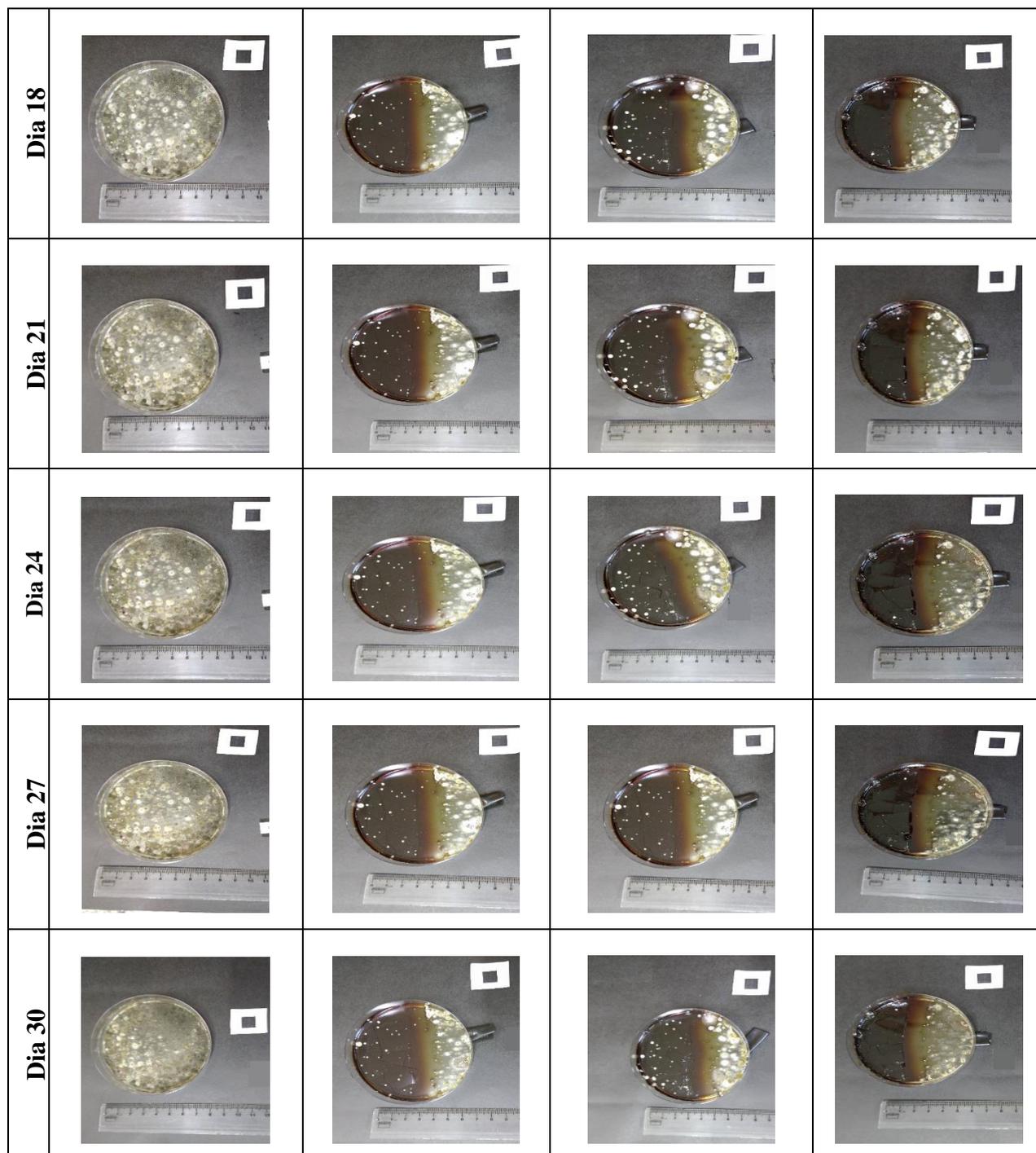


**Figura 12-** Danos causados por cupins às madeiras de *Pinus elliottii in natura* e modificadas por tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica. Seta: Amostras de madeira de pinus modificadas em que a mortalidade dos cupins foi 100%.

### 5.6.2 Atividade biológica em soluções de taninos

A capacidade de inibição a microrganismos presentes no ar por soluções de taninos nas concentrações de 30, 50 e 100%, foi avaliada (Figura 13).





**Figura 13-** Ensaio de atividade biológica em placa de Petri de soluções de taninos nas concentrações 30, 50 e 100% (1:1 Taninos/água destilada).

Na placa de Petri com o meio de cultura (controle) e na metade das placas sem tratamento houve um aumento acentuado no crescimento de colônias de microrganismos. A partir do terceiro dia de avaliação é possível observar metade da placa sem tratamento totalmente ocupada por colônias de microrganismos.

Na metade da placa com as soluções de taninos, a concentração de 100% foi a que obteve menor crescimento de colônias, no entanto, nas menores concentrações de taninos (30 e 50%) é possível observar que a partir do dia 3 o crescimento manteve-se constante, com pouca ou nenhuma variação (Figura 13).

Os extratos tânicos possuem capacidade de inibir o crescimento de colônias devido à toxicidade específica para cada microrganismo (SANTOS et al., 2017; OGAWA; YAZAKI, 2018). Em bactérias, são responsáveis pelo rompimento da membrana citoplasmática das células, e nos fungos pela inibição enzimática (OLAJUYIGBE; AFOLAYAN, 2014; SANTOS et al., 2017; OGAWA; YAZAKI, 2018).

Embora tenha havido um crescimento moderado de colônias nas placas com as soluções de taninos em relação ao meio de cultura (sem tratamento), o tratamento é considerado susceptível à sedimentação de microrganismos presentes no ar, como fungos, bactérias e ácaros. Os extratos de acácia são compostos por 70 a 80% de substâncias tânicas, que são unidades flavanoides tóxicas aos microrganismos, e por uma fração de 20 a 30% de substâncias não-tânicas formadas, principalmente, por carboidratos, gomas hidrocoloides e frações de aminoácidos (PIZZI, 1983; MISSIO et al., 2017). A susceptibilidade das soluções de taninos a microrganismos pode ter sido influenciada pela porção não-tânica do extrato, que é propensa a atividade microbiana pela presença de açúcares que são degradados em seus processos metabólicos.

Diante disso, o uso dos taninos combinados com outras substâncias de origem vegetal, como óleos essenciais à base de compostos fenólicos, pode ser necessário para a obtenção de maior eficiência antimicrobiana. Os óleos essenciais extraídos de espécies como *Thymus vulgaris* e *Lippia origanoides* possuem elevados teores de 2-isopropil-5-metil-fenol (timol), cuja atividade biocida é relatada em diversos estudos (AL MAQTARI et al., 2011; MEDEIROS et al., 2016; GONÇALVES; LAHR, 2020).

## 6. CONCLUSÃO

A modificação da madeira com tratamento preservativo com taninos a 5, 10 e 15% e densificação termomecânica promoveu alterações significativas nos parâmetros químicos, físicos, mecânicos, anatômicos e biológicos na madeira de *Pinus elliottii*, tais como:

- A presença de taninos nas madeiras modificadas não foi detectada por espectroscopia FT-IR.

- Em relação à caracterização química das madeiras, houve um aumento no teor de extrativos para as madeiras modificadas devido à adição das soluções tânicas.
- Para as propriedades físicas, houve aumento da densidade aparente e redução da permeabilidade e higroscopicidade das madeiras modificadas.
- A menor variação dos picos de densidade dos perfis densitométricos pelas imagens de raios X evidenciam maior homogeneidade das madeiras modificadas.
- As madeiras modificadas não possuem estabilidade dimensional na face em que foi comprimida (sentido radial).
- Incremento nas propriedades mecânicas (flexão estática, compressão paralela e dureza Janka).
- A compressão no processo termomecânico resultou em modificação da estrutura anatômica da madeira, com redução do volume de espaços vazios e aumento de paredes celulares colapsadas.
- Aumento da resistência biológica à cupins de madeira seca (*Cryptotermes brevis*), principalmente para as madeiras tratadas com a concentração de 15% de taninos.
- Os tratamentos com altas concentrações de taninos (30, 50 e 100%) em placas de Petri não foram eficientes na inibição total do crescimento de microrganismos presentes no ar.
- De maneira geral, as madeiras modificadas tratadas com taninos na concentração de 15% obtiveram os melhores resultados de resistência mecânica, biológica a cupins de madeira seca (*Cryptotermes brevis*) e para os parâmetros físicos.

## 7. RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS

Diante dos resultados satisfatórios do tratamento com taninos, recomenda-se usar a concentração de 15% como tratamento preservativo de madeiras termodensificadas para inibir o ataque de cupins de madeira seca. No entanto, para avaliar a inibição do crescimento de microrganismos, a combinação de taninos com outras substâncias de origem vegetal, tais como o Timol, pode ser utilizada com a finalidade de obtenção da maior eficiência antimicrobiana.

Para a conclusão mais completa sobre a eficiência dos taninos contra os demais agentes biológicos deterioradores de madeira, são necessárias análises complementares por meio de ensaios biológicos de campo e de apodrecimento acelerado com fungos xilófagos.

Para reduzir a instabilidade dimensional e higroscopicidade no sentido da compressão é recomendado o uso de verniz, stain, tinta ou selador na face radial da madeira modificada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, A. P.; BARBOSA, K. T.; AMICO, S. C., MISSIO, A. L.; AVILA DELUCIS, R.; GATTO, D. A. Improvement in mechanical, physical and biological properties of eucalyptus and pine woods by raw pine resin in situ polymerization. **Industrial Crops and Products**, v. 166, p. 113495, 2021.

AGOSTINI-COSTA, T. S.; LIMA, A.; LIMA, M. V. Determinação de taninos em pedúnculo de caju: método da vanilina versus método do butanol ácido. **Química Nova**, v. 26, n. 5, p. 763-765, 2003.

AL MAQTARI, M. A. A.; ALGHALIBI, S. M.; ALHAMZY, E. H. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil of *Thymus vulgaris* from Yemen. **Turkish Journal of Biochemistry**, v. 36, n. 4, pág. 342-349, 2011.

AMATA. **Resumo do Plano de Manejo- Plantio de pinus e eucalipto por meio do manejo voltado ao múltiplo uso da florestal**. Paraná, 26 p. 2020. Disponível em: <https://cdn.amatabrasil.com.br/wp-content/uploads/2021/05/RPM-PR-2020.pdf>. Acesso em: 25 de agosto de 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **E70-07**: Standard test method for pH of aqueous solutions with the glass electrode. West Conshohocken: ASTM Internacional, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.-ASTM. **D2017**: Standard test method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods. West Conshohocken: ASTM Internacional, 2005.

ARAUJO, E.S.; LOURENÇO, M.S.; ZIDANES, U.L.; SOUSA, T.B.; MOTA, G. S.; REIS, V.N.O.; SILVA, M.G.; MORI, F.A. Quantification of the bark *Myrcia eximia* DC tannins from the Amazon rainforest and its application in the formulation of natural adhesives for wood. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124324, 2021.

ARZOLA-VILLEGAS, X.; LAKES, R.; PLAZA, NZ; JAKES, JE. Wood moisture-induced swelling at the cellular scale—Ab intra. **Forests**, v. 10, n. 11, p. 996, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Balanco das exportações 2020**. Curitiba, 2021. Disponível em: <https://abimci.com.br/balanco-das-exportacoes-2020/>. Acesso em: 03 maio 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Estudo Setorial. Ano Base 2018**. Curitiba, 161 p. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11125**: Insumos - Tanante - Determinação do teor de sólidos totais. Rio de Janeiro: ABNT. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE PISOS DE MADEIRA-ANPM. **Madeiras para piso: Características de Espécies Brasileiras**. Disponível em: < <http://www.anpm.org.br/?S=17&L=1>>. Acesso em: 14 de maio de 2021.

BIANCHI, S.; KROSLAKOVA, I.; JANZON, R.; MAYER, I.; SAAKE, B.; PICHELIN, F. Characterization of condensed tannins and carbohydrates in hot water bark extracts of European softwood species. **Phytochemistry**, v. 120, p. 53-61, 2015.

BLOMBERG, J.; PERSSON, B.; BLOMBERG, A. Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. **Wood Science and Technology**, v. 39, n. 5, p. 339–350, 2005.

BOSSARDI, K.; BARREIROS, R. M. Produtos naturais como preservantes para madeiras de rápido Crescimento—uma revisão. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 2, n. 2, p. 10-12, 2011.

BUDAKÇI, M.; PELIT, H.; SÖNMEZ, A.; KORKMAZ, M. The effects of densification and heat post-treatment on hardness and morphological properties of wood materials. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 7822-7838, 2016.

CADEMARTORI, P. H. G.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; SCHNEID, E.; HAMM, L. G. Qualidade da madeira serrada de *Pinus elliottii* engelm. procedente de florestas resinadas. **Cerne**, v. 18, n. 4, p. 577–583, 2012.

CARVALHO, D. E.; SANTINI, E. J.; GOUVEIA, F. N.; ROCHA, M. P. D. Resistência natural de quatro espécies florestais submetidas a ensaio com fungos apodrecedores. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 271-276, 2015b.

CARVALHO, D. M.; SEVASTYANOVA, O.; PENNA, L. S.; SILVA, B. P.; 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**, v. 73, p. 118–126, 2015a.

CASTRO, V. C.; CHAMBI-LEGOAS, R.; TOMMAZIELLO FILHO, M.; SURDI, P. G.; ZANUNCIO, J. C.; ZANUNCIO, A. J. V. The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis*. **Scientific Reports**, v.10, p.2530, 2020.

CASTRO, V. R.; CASTRO, M. P. F.; ZANUNCIO, A. J. V.; ZANUNCIO, J. C.; CASTRO, P. G. S.; CARNEIRO, A. A. D. C. O.; VITAL, B. R. Resistance of in natura and Torrefied Eucalyptus Wood to *Cryptotermes brevis* (Isoptera). **BioResources**, v. 14, n. 2, p. 2480-2490, 2019.

CHERRY, R.; MANALO, A.; KARUNASENA, W.; STRINGER, G. Out-of-grade sawn pine: a state-of-the-art review on challenges and new opportunities in cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 858-868, 2019.

CHINIFORUSH, A. A.; AKBARNEZHAD, A.; VALIPOUR, H.; MALEKMOHAMMADI, S. Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 207, p. 70-83, 2019.

COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B. **Branqueamento de polpa celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado**. Viçosa, MG, 2015, 816 p.

COMSTOCK, G. L. Directional permeability of softwoods. **Wood and Fiber Science**, v. 1, n. 4, p. 283-289, 1970.

DEMUNER, I. F.; GOMES, F. J. B.; COURA, M. R.; GOMES, J. S.; DEMUNER, A. J.; CARVALHO, A. M. M. L.; SILVA, C. M. Determination of chemical modification of

eucalypt kraft lignin after thermal treatment by Py-GC–MS. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 156, p. 105158, 2021.

DIAS, K. B.; BARREIROS, R. M. Potentiality of Tall Oil as Preservative for Wood. **Trees**, v. 5, p. 8, 2018.

DUBEY, M. K.; PANG, S.; CHAUHAN, S.; WALKER, J. Dimensional stability, fungal resistance and mechanical properties of radiata pine after combined thermo-mechanical compression and oil heat-treatment. **Holzforschung**, v. 70, n. 8, p. 793-800, 2016.

EMBRAPA. **Pinus na silvicultura brasileira**. Ed: SHIMIZU, J.Y. Embrapa Florestas, 2008. 223 p.

EMBRAPA. **Transferência de Tecnologia Florestal - Perguntas e Respostas**. Ed: PENTEADO, J.; PICHELLI, K. Embrapa Florestas, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pinus/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 24 de agosto de 2021.

ESTEVES, B.; RIBEIRO, F.; CRUZ-LOPES, L.; FERREIRA, J. V.; DOMINGOS, I.; DUARTE, M; DUARTE, S.; NUNES, L. Densification and heat treatment of maritime pine wood. **Wood Research**, v. 62, n. 3, p. 373-388, 2017.

ESTEVES, B.; VELEZ MARQUES, A. M.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 15, n. 2, p. 245-258, 2013.

EVANCHO, G.M.; SVEUM, W.H., MOBERG, L.J., FRANK, J.F. Microbiological Monitoring of the Food Processing Environment. In: Downes FP, Ito K, editors. **Compendium of methods for the microbiological examination of foods**. 4th ed. Washington, D.C.: APHA, p. 25-36, 2001.

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**, v. 70, n. 1, p. 155-163, 2012.

FAXITRON. **User manual Faxitron D X radiography system**. Lincolnshire: [s. n.], 95 p. 2009.

FERRARINI, S. F.; SANTOS, H. S. D.; MIRANDA, L. G.; AZEVEDO, C.; PIRES, M. J.; MAIA, S. M. Classificação de resíduos de madeira tratada com preservativos à base de arseniato de cobre cromatado e de boro/flúor. **Química Nova**, v. 35 n. 9, p. 1767-1771, 2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, p. 1039-1042, 2011.

FIELD, J. A.; LETTINGA, G. Toxicity of tannic compounds to microorganisms. In: **Plant polyphenols**. Springer, Boston, MA. p. 673-692, 1992.

FREITAS, D. L.; CARVALHO, D. E.; BELTRAME, R.; SANTOS, G. A.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Estabilidade dimensional da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p. 435-439.

FU, Q.; CLOUTIER, A.; LAGHDIR, A. Optimization of the Thermo-Hygro-mechanical (THM) Process for Sugar Maple Wood Densification. **BioResources**, v. 11, n. 4, 2016.

GIBIAT, V.; SELMER, J.; HALARY, J-L. **Wood-treatment method comprising in situ polymerization under electromagnetic radiation**. U.S. Patent Application n. 10/582,639, Concessão: 31 maio 2007.

GONÇALVES, D.; LAHR, F. A. R. Deterioro y preservación de maderas mediante el uso de preservadores naturales de potencial interés en Brasil. **Bosque**, v. 41, n. 3, p. 213-220, 2020.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S. Resistência ao ataque de cupim-de-madeira seca (*Cryptotermes brevis*) em seis espécies florestais. **Cerne**, v. 12, n. 1, p. 80-83, 2006.

GREIN, A.; SILVA, B. C.; WENDEL, C. F.; TISCHER, C. A.; SIERAKOWSKI, M. R.; MOURA, A. B. D.; IACOMINI, M.; GORIN, P. A. J. SIMAS-TOSIN, F. F.;

GULLER, B. Effects of heat treatment on density, dimensional stability and color of *Pinus nigra* wood. **African Journal of Biotechnology**, v. 11, n. 9, p. 2204-2209, 2012.

GÜNDÜZ, G.; AYDEMİR, D.; AKGÜN, K. The effects of tannin and thermal treatment on physical and mechanical properties of laminated chestnut wood composites. **BioResources**, v. 6, n 2, p. 1543-1555, 2011.

GUO, J.; SUMA, T.; RICHARDSON, J. J.; EJIMA, H. Modular assembly of biomaterials using polyphenols as building blocks. **ACS Biomaterials Science & Engineering**, v. 5, n. 11, p. 5578-5596, 2019.

HANSMANN, C.; GINDI, W.; WIMMER, R.; BOKU, A.T. PERMEABILITY OF WOOD-A REVIEW. **WOOD RESEARCH**, v. 47, n. 4, p. 1-16, 2002.

HANSSON, L.; COUCEIRO, J.; FJELLNER, B. Estimation of shrinkage coefficients in radial and tangential directions from CT images. **Wood Material Science & Engineering**, v. 12, n. 4, p. 251-256, 2017.

HERÄJÄRVI, H.; JOUHIAHO, A.; TAMMIRUUSU, V.; VERKASALO, E. Small-diameter Scots Pine and Birch timber as raw materials for engineered wood products. **International Journal of Forest Engineering**, v. 15, n. 2, p. 23-34, 2004.

HILDEBRANDT, J.; HAGEMANN, N.; THRÄN, D. The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe. **Sustainable Cities and Society**, v. 34, p. 405-418, 2017.

HILL, C. A. Wood modification: chemical, thermal and other processes. John Wiley & Sons, 2007.

HU, J.; THEVENON, M. F.; PALANTI, S.; TONDI, G. Tannin-caprolactam and Tannin-PEG formulations as outdoor wood preservatives: biological properties. **Annals of Forest Science**, v. 74, n.1, p. 18, 2017.

ICIMOTO, F.H.; CALIL NETO, C.; FERRO, F.S.; MACEDO, L.B.; CHRISTOFORO, A.L.; LAHR, F.A.R.; CALIL JÚNIOR, C. Influence of lamellar thickness on strength and stiffness of glued laminated timber beams of *Pinus oocarpa*. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 2, pág. 51-55, 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2019**. Brasília, 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2020**. Brasília, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2021**. Brasília, 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Informações sobre madeiras: *Pinus eliotti*. Disponível em: [http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=7](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7). Acesso em: 03 maio 2020.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- IPT. **Madeira: uso sustentável na construção civil. Ed. 2.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas–SVMA, 2009. Disponível em: <http://www.ipt.br>. Acesso em: 05 outubro 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **IPT nº 1157:** Métodos de ensaios e análise em preservação de madeira: Ensaio acelerado de laboratório da resistência natural ou de madeira preservada ao ataque de *Cryptotermes* (Fam. Kalotermitidae). São Paulo, 1980.

JANG, E.S.; KANG, C.W. Changes in gas permeability and pore structure of wood under heat-treating temperature conditions. **Journal of Wood Science**, v. 65, n. 1, p. 1-9, 2019.

KHALIL, H. A.; DUNGANI, R.; MOHAMMED, I. A.; HOSSAIN, M. S.; APRILIA, N. S.; BUDIARSO, E.; ROSAMAH, E. Determination of the combined effect of chemical modification and compression of agatis wood on the dimensional stability, termite resistance, and morphological structure. **Bioresources**, v. 9, n. 4, p. 6614-6626, 2014.

KOLLMANN, F.F.P; CÔTÉ, W. A. Principles of wood science and technology. vol. I. Solid Wood. In: **Principles of Wood Science and Technology. Vol. I. Solid Wood.** 1968.

KUMAR, R.; HU, F.; SANNIGRAHI, P.; JUNG, S.; RAGAUSKAS, A. J.; WYMAN, C. E. Carbohydrate derived-pseudo-lignin can retard cellulose biological conversion. **Biotechnology and bioengineering**, v. 110, n. 3, p. 737-753, 2013.

KUTNAR, A.; HUMAR, M.; KAMKE, F. A.; SERNEK, M. Fungal decay of viscoelastic thermal compressed (VTC) wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 2, p. 325-328, 2011.

LACERDA, T. M.; ZAMBON, M. D.; FROLLINI, E. Oxalic acid as a catalyst for the hydrolysis of sisal pulp. **Industrial Crops and Products**, v. 71, p. 163–172, 2015.

LAINE, K., BELT, T.; RAUTKARI, L.; RAMSAY, J.; HILL, C. A.; HUGHES, M. Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood. **Journal of Materials Science**, v. 48, n. 24, p. 8530-8538, 2013a.

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**, v. 71, n. 1, p. 13-16, 2013b.

LAINE, K.; SEGERHOLM, K.; WÅLINDER, M.; RAUTKARI, L.; HUGHES, M. Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 5, p. 883–894, 2016.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 279-291, 2000.

LAZAROTTO, M.; OLIVEIRA, L. D. S.; HARAKAVA, R.; ZANATTA, P.; FARIAS, C. R. J. D. Identificação de fungos emboloradores em madeira de *Pinus* spp. em laboratório. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 602-605, 2016.

LEGGATE, W.; REDMAN, A.; WOOD, J.; BAILLERES, H.; LEE, D. J. Radial permeability of the hybrid pine (*Pinus elliottii* x *Pinus caribaea*) in Australia. **BioResources**, v. 14, n. 2, p. 4358-4372, 2019.

LESAR, B.; HUMAR, M.; KAMKE, F. A.; KUTNAR, A. Influence of the thermo-hydro-mechanical treatments of wood on the performance against wood-degrading fungi. **Wood science and technology**, v. 47, n. 5, p. 977-992, 2013.

LOGSDON, N.B.; FINGER, Z.; PENNA, E.S. Caracterização físico-mecânica da madeira de Cedro-marinho, *Guarea trichilioides* L. (Meliaceae). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 43-51, 2008.

LOIOLA, P. L.; KLITZE, R. J.; ROCHA, M. P.; VIDAURRE, G. B. PHYSICAL Properties of wood *Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and *Pinus oocarpa* for pencil production. **FLORESTA**, v. 51, n. 2, p. 354-362, 2021.

LOLLI, N.; FUFA, S. M.; KJENDSETH WIIK, M. An assessment of greenhouse gas emissions from CLT and glulam in two residential nearly zero energy buildings. **Wood Material Science & Engineering**, v. 14, n. 5, p. 342-354, 2019.

MAGALHÃES, W.L.E.; MUNIZ, G.I.B.; MAZZA, R.A. Tratamento mecânico visando o aumento da permeabilidade em madeira de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii*. In: **Embrapa**

**Florestas-Artigo em anais de congresso.** In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9, UFMT, 2004.

MANHIÇA, A. A.; ROCHA, M. P.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R. Custos no desdobro de *Pinus* spp. com utilização de modelos de corte numa serraria. **Floresta e Ambiente**, v. 20, p. 327-335, 2013.

MARCHESAN, R.; FRANÇA, M. C.; LOIOLA, P. L.; ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J.; SILVA, J. R. M. Caracterização da madeira de *Hovenia dulcis* para a fabricação de pisos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, 2020.

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**, v. 21, n. 1, p. 149-160, 2021.

MATTOS, B. D.; LOURENÇON, T. V.; GATTO, D. A.; SERRANO, L.; LABIDI, J. Chemical characterization of wood and extractives of fast-growing *Schizolobium parahyba* and *Pinus taeda*. **Wood Material Science & Engineering**, v. 11, n. 4, p. 209-216, 2014.

MEDEIROS, A. D.; SILVA, L. J.; SILVA, J. M.; DIAS, D. C. F. S.; PEREIRA, M. D.IJCropSeed: An open-access tool for high-throughput analysis of crop seed radiographs. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, p. 105555, 2020.

MEDEIROS, F.C.; GOUVEIA, F. N.; BIZZO, H. R.; VIEIRA, R. F.; DEL MENEZZI, C. H. Fungicidal activity of essential oils from Brazilian Cerrado species against wood decay fungi. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 114, p. 87-93, 2016.

MIRANDA, M. C.; CASTELO, P. A. R.; MIRANDA, D. L. C.; RONDON, E.V. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Parkia gigantocarpa* Ducke. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 3, n. 2, p. 10-12953/2177-6830, 2012.

MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; CHUDA-KOWALSKA, M.; KAWALERCZYK, J.; KULIŃSKI, M.; ŁABĘDA, K. The Usefulness of Pine Timber (*Pinus sylvestris* L.) for the Production of Structural Elements. Part II: Strength Properties of Glued Laminated Timber. **Materials**, v. 13, n. 18, p. 4029, 2020.

MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; TONDI, G. Exploring tannin extracts: Introduction to new bio-based materials. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 10, n. 1, 2019.

MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; FERREIRA, D. F., MAGALHÃES, W. L. E., BERTUOL, D. A.; GATTO, D. A.; PETUTSCHNIGG, A.; TONDI, G. Nanocellulose-tannin films: From trees to sustainable active packaging. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 143-151, 2018.

MISSIO, A. L.; TISCHER, B.; SANTOS, P. S.; CODEVILLA, C.; MENEZES, C. R.; BARIN, J. S.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; PETUTSCHNIGG, A.; TONDI, G. Analytical characterization of purified mimosa (*Acacia mearnsii*) industrial tannin extract: Single and sequential fractionation. **Separation and Purification Technology**, v. 186, p. 218-225, 2017.

MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; VIVIAN, M. A. Higroscopicidade da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* submetida a tratamento térmico. **CERNE**, Lavras, v. 19, n. 1, pág. 19-25, 2013.

MONTEIRO, J. M.; ALBUQUERQUE, U. P. D.; ARAÚJO, E. D. L.; AMORIM, E. L. C. D. Taninos: uma abordagem da química à ecologia. **Química Nova**, v. 28, n. 5, p. 892-896, 2005.

MORSING, N. Densification of wood the influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain. **Technical University of Denmark**, 1998. 145 p.

MURARA JUNIOR, M. I.; ROCHA, M. P.; TRUGILHO, P. F. Estimativa do rendimento em madeira serrada de pinus para duas metodologias de desdobro. **Floresta e Ambiente**, v. 20, p. 556-563, 2013.

NAVI, P.; SANDBERG, D. **Thermo-hydro-mechanical wood processing**. CRC Press, 2012.

NCCLS - NATIONAL COMMITTEE FOR CLINICAL LABORATORY STANDARDS. Methods for Dilution Antimicrobial Susceptibility Tests for Bacteria That

Grow Aerobically; Approved Standard - Sixth Edition. NCCLS document M7-A6. p.19087-1898, USA, Pennsylvania, 2003.

NEYSES, B.; KARLSSON, O.; SANDBERG, D. The effect of ionic liquid and superbase pre-treatment on the spring-back, set-recovery and Brinell hardness of surface-densified Scots pine. **Holzforschung**, v. 74, n. 3, p. 303-312, 2019.

NGUYEN, T. T.; DAO, T. N.; AALETI, S.; VAN DE LINDT, J. W.; FRIDLEY, K. J. Seismic assessment of a three-story wood building with an integrated CLT-lightframe system using RTHS. **Engineering Structures**, v. 167, p. 695-704, 2018.

OGAWA, S.; YAZAKI, Y. Tannins from *Acacia mearnsii* De Wild. Bark: Tannin determination and biological activities. **Molecules**, v. 23, n. 4, p. 837, 2018.

OHARA, S.; SUZUKI, K.; OHIRA, T. Condensed tannins from *Acacia mearnsii* and their biological activities. **Journal of the Japan Wood Research Society (Japan)**, v. 40, p. 1363–1374, 1994.

OLAJUYIGBE, O. O.; AFOLAYAN, A. J. A comparative effect of the alcoholic and aqueous extracts of *Acacia mearnsii* De Wild on protein leakage, lipid leakage and ultrastructural changes in some selected bacterial strains as possible mechanisms of antibacterial action. **Journal of Pure and Applied Microbiology**, v. 8, n. 2, p. 1243-1257, 2014.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.

OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B. Biological Resistance of Two Reforestation Woods to Dry Wood Termites. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, 2019.

PELIT, H.; YALÇIN, M. Resistance of mechanically densified and thermally post-treated pine sapwood to wood decay fungi. **Journal of Wood Science**, v. 63, n. 5, p. 514–522, 2017.

PEPIN, S.; BLANCHET, P.; LANDRY, V. Characterization of the Diffusion of Organic Fungicides with Amine Oxides in White Pine and White Spruce. **BioResources**, v. 15, n. 1, p. 1026-1049, 2020.

PERTUZZATTI, A; MISSIO, A. L.; 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. **BioResources**, v. 13, n. 1, p. 1576–1590, 2018.

PIZZI, A. **Wood adhesives: chemistry and technology**. New York: Marcel Dekker, 1983. 364 p.

POLETTI, M.; ZATTERA, A. J.; SANTANA, R.M.C. Structural differences between wood species: evidence from chemical composition, FTIR spectroscopy, and thermogravimetric analysis. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 126, n. S1, p. E337-E344, 2012.

POONIA, P. K.; HOM, S. K.; SIHAG, K.; TRIPATHI, S. Effect of microwave treatment on longitudinal air permeability and preservative uptake characteristics of chir pine wood. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 18, n. 1, p. 125-132, 2016.

POUBEL, D. S.; GARCIA, R. A.; SANTOS, W. A.; OLIVEIRA, G. L.; BREU, H. S. Effect of the heat treatment on physical and chemical properties of *Pinus caribaea* wood. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 391-398, 2013.

POZO, C.; DÍAZ-VISURRAGA, J.; CONTRERAS, D.; FREER, J.; RODRÍGUEZ, J. Characterization of temporal biodegradation of radiata pine by *Gloeophyllum trabeum* through principal component analysis-based two-dimensional correlation FT-IR spectroscopy. **Journal of the Chilean Chemical Society**, v. 61, n. 2, p. 2878-2883, 2016.

PRIGIONE, V.; SPINA, F.; TIGINI, V.; GIOVANDO, S.; VARESE, G. C. Biotransformation of industrial tannins by filamentous fungi. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 102, n. 24, p. 10361-10375, 2018.

PU, Y.; HU, F.; HUANG, F.; DAVISON, B. H.; RAGAUSKAS, A. J. Assessing the molecular structure basis for biomass recalcitrance during dilute acid and hydrothermal pretreatments. **Biotechnology for biofuels**, v. 6, n.1, 15 p., 2013.

RICCI, A.; PARPINELLO, G. P.; OLEJAR, K. J.; KILMARTIN, P. A.; VERSARI, A. Attenuated Total Reflection Mid-Infrared (ATR-MIR) spectroscopy and chemometrics for the identification and classification of commercial tannins. **Applied Spectroscopy**, v. 69, n. 11, p. 1243-1250, 2015.

ROSZYK, E.; MANIA, P.; IWAŃSKA, E.; KUSIAK, W.; BRODA, M. Mechanical Performance of Scots Pine Wood from Northwestern Poland—A Case Study. **BioResources**, v. 15, n. 3, p. 6781-6794, 2020.

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**, v. 8, n.1, p. 64-88, 2013.

SANDBERG, D.; KUTNAR, A.; MANTANIS, G. Wood modification technologies - A review. **IForest**, v. 10, n. 6, p. 895–908, 2017.

SANTOS, C.; VARGAS, A.; FRONZA, N.; DOS SANTOS, J. H. Z. Structural, textural and morphological characteristics of tannins from *Acacia mearnsii* encapsulated using sol-gel methods: Applications as antimicrobial agents. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 151, p. 26-33, 2017.

SCHNABEL, T.; MUSSO, M.; TONDI, G. Univariate and multivariate analysis of tannin-impregnated wood species using vibrational spectroscopy. **Applied spectroscopy**, v. 68, n. 4, p. 488-494, 2014.

SCHULZ, H. R.; GALLIO, E.; ACOSTA, A. P.; BARBOSA, K. T.; GATTO, D. A. Efeito da furfurilação em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus elliottii*. **Matéria**, v. 24, n. 3, 2019.

SEPPERER, T.; TONDI, G.; PETUTSCHNIGG, A.; YOUNG, T. M.; STEINER, K. Mitigation of ammonia emissions from cattle manure slurry by tannins and tannin-based polymers. **Biomolecules**, v. 10, n. 4, p. 581, 2020.

SHARMA, V.; YADAV, J.; KUMAR, R.; TESAROVA, D.; EKIELSKI, A.; MISHRA, P. K. On the rapid and non-destructive approach for wood identification using ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods. **Vibrational Spectroscopy**, v. 110, p. 103097, 2020.

SILVA, C. M. S. **Pré-hidrólise e densificação termomecânica de madeira de pinus**. 2019. 67 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2019.

SILVA, C. M. S.; VITAL, B. R.; RODRIGUES, F. A.; ALMEIDA, Ê. W.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CÂNDIDO, W. L. Hydrothermal and organic-chemical treatments of eucalyptus biomass for industrial purposes. **Bioresource Technology**, v. 289, n. May, p. 121731, 2019.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J.T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna*, em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.2, p.233-239, 2003.

SILVEIRA, A. G.; SANTINI, E. J.; KULCZYNSKI, S. M.; TREVISAN, R.; WASTOWSKI, A. D.; GATTO, D. A. Tannic extract potential as natural wood preservative of *Acacia mearnsii*. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 4, p. 3031-3038, 2017.

SOMMERAUER, L.; THEVENON, M. F.; PETUTSCHNIGG, A.; TONDI, G. Effect of hardening parameters of wood preservatives based on tannin copolymers. **Holzforschung**, v. 73, n. 5, p. 457-467, 2019.

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**, v. 554, n. 7691, p. 224–228, 2018.

STALLBAUN, P. H.; BARAÚNA, E. E. P.; MONTEIRO, T. C.; VIEIRA, R. S.; SALES, N. D. L. P.; OLIVEIRA, L. S. Resistência natural da madeira de *Tachigali vulgaris* ao fungo xilófago *Postia placenta*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 459-463, 2016.

STAMM, A. J.; SEBORG, R. M.; MILLETT, M. A. **Heat-stabilized Compressed Wood (Staypak)**, Patent 2.453.679, 1948.

STANGERLIN, D. M.; COSTA, A. F.; GARLET, A.; PASTORE, T. C. M. Resistência natural da madeira de três espécies amazônicas submetidas ao ataque de fungos apodrecedores. **Ciência da Madeira**, v. 4, n. 1, p. 15-32, 2013.

STIRLING, R.; TEMIZ, A. Fungicides and insecticides used in wood preservation. In: **Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials**. American Chemical Society, p. 185-201, 2014.

TASCIOGLU, C.; YALCIN, M.; SEN, S.; AKCAY, C. Antifungal properties of some plant extracts used as wood preservatives. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 85, p. 23-28, 2013.

TASCIOGLU, C.; YALCIN, M.; TROYA, T.; SIVRIKAYA, H. Termiticidal properties of some wood and bark extracts used as wood preservatives. **BioResources**, v. 7, n. 3, p. 2960-2969, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **TAPPI UM 250: Acid-soluble Lignin in Wood and Pulp**. TAPPI Standard Method, Atlanta, 2000.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY- **TAPPI. T. 211 om-02**. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: Combustion at 525 °C. USA: TAPPI, 2006.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY- TAPPI. **Technical Divisions and Committees**. TAPPI test methods, Atlanta, 1996.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY-TAPPI. **T. 222 om-02: Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. TAPPI Test Methods, Atlanta, 2002.

TEIXEIRA, R. U. **Efeito da produtividade florestal e permeabilidade da madeira de eucalipto na velocidade de secagem**. 2015. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2015

TIRYAKI, S.; BARDAK, S.; AYDIN, A.; NEMLI, G. Analysis of volumetric swelling and shrinkage of heat-treated woods: Experimental and artificial neural network modeling approach. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 18, n. 3, p. 477-492, 2016.

TONDI, G.; SCHNABEL, T.; WIELAND, S.; PETUTSCHNIGG, A. Surface properties of tannin treated wood during natural and artificial weathering. **International Wood Products Journal**, v. 4, n. 3, p. 150-157, 2013b.

TONDI, G.; THÉVENON, M. F.; MIES, B.; STANDFEST, G.; PETUTSCHNIGG, A.; WIELAND, S. Impregnation of Scots pine and beech with tannin solutions: effect of viscosity

and wood anatomy in wood infiltration. **Wood science and technology**, v. 47, n. 3, p. 615-626, 2013a.

TONDI, G.; WIELAND, S.; LEMENAGER, N.; PETUTSCHNIGG, A.; PIZZI, A.; THEVENON, M. F. Efficacy of tannin in fixing boron in wood. **BioResources**, v. 7, n. 1, p. 1238-1252, 2012.

TRAORÉ, M.; KAAL, J.; CORTIZAS, A. M. Differentiation between pine woods according to species and growing location using FTIR-ATR. **Wood Science and Technology**, v. 52, n. 2, p. 487-504, 2018.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M. D.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação da estabilidade dimensional de espécies de pinus tropicais. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 398-406, 2013a.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Scientia Forestalis**. v.42, n. 101, p21-28, 2014.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Floresta**, v. 43, n. 3, p. 503-510, 2013b.

TRUGILHO, P. F.; AKIRA, F. M.; TARCÍSIO, J. L.; PEREIRA, D. C. Determinação do teor de taninos na casca de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 9, n. 2, p. 246-254, 2003.

ULKER, O.; IMIRZI, O.; BURDURLU, E. The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5581-5592, 2012.

UNSAI, O.; KARTAL, S. N.; CANDAN, Z.; ARANGO, R.; CLAUSEN, C. A.; GREEN, F. Preliminary investigation of biological resistance, water absorption and swelling of thermally compressed pine wood panels. **IRG/WP**; 08-40396. Stockholm, Sweden: IRG Secretariat, 2008.

VALENTE, B. M. D. R. T.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; DELLA LUCIA, R. M. Variabilidade radial e longitudinal das propriedades físicas e anatômicas da madeira de angico-vermelho. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 100, p. 485-496, 2013.

VASQUES, A. G.; NOGUEIRA, A. S.; KIRCHNER, F. F.; BERGER, R. Uma síntese da contribuição do gênero *Pinus* para o desenvolvimento sustentável no sul do Brasil. **Floresta**, v. 37, n.3, 2007.

VIDAURRE, G. B.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; ARANTES, M. D. C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.

VIVIAN, M. A.; GROSSKOPF, É. J.; NUNES, G. C.; ITAKO, A. T.; MODES, K. S. Qualidade e eficiência de produtos naturais no tratamento preservativo das madeiras de *Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus viminalis* e *Pinus taeda*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 1, p. 35-47, 2020.

VOLOKITIN, G. G.; SKRIPNIKOVA, N. K.; SINITSYN, V. A.; VOLOKITIN, O. G.; SHEKHOVTSOV, V. V.; VASCHENKO, S. P.; KUZ'MIN, V. I. Plasma treatment of wood. **Thermophysics and Aeromechanics**, v. 23, n. 1, p. 119-124, 2016.

WAN, G.; ZHANG, Q.; LI, M.; JIA, Z.; GUO, C.; LUO, B.; WANG, S.; MIN, D. How pseudo-lignin is generated during dilute sulfuric acid pretreatment. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 67, n. 36, p. 10116-10125, 2019.

WEILER, F. H.; GRASEL, F. S.; LOUREGA, R. V.; RAMOS, A. S.; FERRÃO, M. F. Simultaneous determination of sulfur, nitrogen and ash for vegetable tannins using ATR-FTIR spectroscopy and multivariate regression. **Microchemical Journal**, v. 149, p. 103994, 2019.

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**, v. 71, n. 4, p. 401-416, 2013.

YILDIZ, U. C.; TEMIZ, A.; GEZER, E. D.; YILDIZ, S. Effects of the wood preservatives on mechanical properties of yellow pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. **Building and Environment**, v. 39, n. 9, p. 1071-1075, 2004.

YINGPRASERT, W.; CHERDCHIM, B.; PEAKLIN, S. Effects of *Acacia mangium* bark extracts on dimensional stability, termite resistance, and fungal decay resistance of rubberwood. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-10, 2021.

YU, Y.; ZHANG, F.; ZHU, S.; LI, H. Effects of high-pressure treatment on poplar wood: Density profile, mechanical properties, strength potential index, and microstructure. **BioResources**, v. 12, n. 3, p. 6283-6297, 2017.

ZANETTI, M.; CESPRINI, E.; MARANGON, M.; SZCZUREK, A.; TONDI, G. Thermal valorization and elemental composition of industrial tannin extracts. **Fuel**, v. 289, p. 119907, 2021.

ZUCKER, William V. Tannins: does structure determine function? An ecological perspective. **The American Naturalist**, v. 121, n. 3, p. 335-365, 1983.