



MICHELLY CASAGRANDE STRAGLIOTTO

**DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA MADEIRA DE
Tectona grandis DE 15 ANOS PARA PRODUÇÃO DE PISO**

**LAVRAS - MG
2024**

MICHELLY CASAGRANDE STRAGLIOTTO

**DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA MADEIRA DE *Tectona grandis* DE 15
ANOS PARA PRODUÇÃO DE PISO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Orientador

Profa. Dra. Barbara Luísa Corradi Pereira
Coorientadora

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Stragliotto, Michelly Casagrande.

Densificação termomecânica da madeira de *Tectona grandis* de 15 anos para produção de piso / Michelly Casagrande Stragliotto. - 2023.

117 p. : il.

Orientador(a): José Reinaldo Moreira da Silva.

Coorientador(a): Bárbara Luísa Corradi Pereira, José Tarcísio Lima.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Termodensificação. 2. Compactação de madeira. 3. Modificação térmica. I. Silva, José Reinaldo Moreira da. II. Pereira, Bárbara Luísa Corradi. III. Lima, José Tarcísio. IV. Título.

MICHELLY CASAGRANDE STRAGLIOTTO

**DENSIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA MADEIRA DE *Tectona grandis* DE
15 ANOS PARA PRODUÇÃO DE PISO**

**THERMOMECHANICAL DENSIFICATION OF 15-YEAR-OLD *Tectona
grandis* WOOD FOR FLOORING PRODUCTION**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 13 de dezembro de 2023.

Dr. Aylson Costa Oliveira (UFMT)

Dra. Barbara Luísa Corradi Pereira (UFMT)

Dr. Paulo Fernando Trugilho (UFLA)

Dr. Raphael Nogueira Rezende (IFSM)

Documento assinado digitalmente
 JOSE REINALDO MOREIRA DA SILVA
Data: 01/04/2024 09:09:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Orientador

LAVRAS- MG

2024

AGRADECIMENTOS

À minha família, que sempre foi minha base sólida, expresso meu mais profundo agradecimento por todo o amor, apoio e compreensão ao longo dessa jornada desafiadora.

À Laura, minha namorada, agradeço por seu amor, carinho e sensibilidade por tornar os dias pesados mais leves e acolhedores e não me deixar desistir quando as inúmeras dificuldades surgiam.

Aos meus amigos Jefferson e Theonizi que mesmo de longe sempre me incentivam, partilham suas alegrias e tristezas.

A Dáfila, Aline e Luana por todo o apoio, carinho e amizade, vocês foram essenciais.

À família em Lavras Maria Angélica, Camila, José, Gabi, Laise, Yanka, Alba, Renato, João e Lau. Vocês tornaram meus dias felizes e menos mais árduos.

À Bárbara, pela coorientação, amizade, dedicação e apoio que foram fundamentais ao longo de toda minha jornada, desde a graduação até o doutorado. Obrigada por ser uma fonte constante de inspiração e suporte.

Ao Paulo Hein e Aylson, pelo apoio e palavras amigas nos momentos de desespero.

Ao professor José Benedito, por todo o auxílio no planejamento e na execução desse trabalho.

Aos técnicos Heber, Carlos e Lorrán, sempre prontos para ajudar. Em especial a Raísa que sempre me acolheu e deu forças quando precisei.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA pelos ensinamentos.

Aos professores José Reinaldo, José Tarcísio e Bárbara pela orientação e pelas contribuições com o trabalho e com minha formação. Agradeço igualmente à banca avaliadora pelas sugestões que enriqueceram o trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade de realizar este trabalho.

À Unidade de Painéis de Madeira-UEPAM/UFLA, ao Laboratório de Usinagem da Madeira-LUM/UFLA, ao Laboratório de Tecnologia da Madeira-LTM/UFMT, à Central Analítica do Laboratório de Pesquisas em Química de Produtos Naturais e Novas Metodologias Sintéticas em Química Orgânica- CALPQPN/UFMT e ao Laboratório de Propriedades da Madeira- LPM/UFV, pela contribuição nas análises e confecção dos corpos de prova.

À empresa Teak Resources Company-TRC pela doação do material disponibilizado para desenvolver esta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 00, pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelos recursos, subsídios, estruturas e equipamentos utilizados durante o desenvolvimento do doutorado.

A todos que acreditam que a ciência, a pesquisa e o ensino público são essenciais para a transformação da educação.

Muito obrigada!

"Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa. Por isso aprendemos sempre." (Paulo Freire)

RESUMO

A madeira de teca proveniente de plantios de rápido crescimento geralmente apresenta proporção elevada de madeira juvenil e alborno, que possuem características menos atrativas para a indústria como, por exemplo, coloração mais clara, maior instabilidade dimensional, menores valores de densidade e dureza. Isso, implica em sua não utilização para produtos de maior valor agregado, como os pisos. Nesse contexto, a densificação termomecânica pode ser alternativa de tratamento para melhorar algumas das propriedades da madeira juvenil e contribuir para sua maior utilização na indústria de pisos. Diante disso, objetivou-se avaliar o uso da madeira de *Tectona grandis* de 15 anos densificada termomecanicamente para a indústria de pisos. Foram utilizadas madeiras processadas de *T. grandis* procedente de plantio de 15 anos de idade, as quais foram densificadas termomecanicamente, em prensa termo-hidráulica em diferentes condições: temperaturas de 150°C e 170°C e taxas de densificação de 24% e 36,7%, além da madeira *in natura* (testemunha). Avaliou-se a razão de compactação, a perda de massa, o *spring back*, as alterações superficiais na cor, rugosidade, molhabilidade e densidade superficial. Também foram avaliadas a densidade aparente, a umidade da madeira após equilíbrio, a absorção de água, inchamento em espessura, o *set recovery*, as alterações dos constituintes químicos, a dureza Janka e os ensaios de simulação de pisos em serviço. Houve aumento da perda de massa conforme o aumento da temperatura, com valores iguais a 5,14% e 6,97% para as temperaturas de tratamento 150°C e 170°C, respectivamente. O *spring back* teve valor médio igual a 5,62%. A densificação termomecânica tornou a superfície da madeira mais hidrofóbica, mais escura e menos rugosa. A densitometria de raios-X permitiu verificar que a densidade superficial da madeira densificada apresentou maiores valores (máximo de 1,05 g.cm⁻³) que a região central do corpo de prova cujo valor médio foi de aproximadamente 0,60 g.cm⁻³. Por meio do FTIR verificou-se maior redução das ligações -OH e degradação das hemiceluloses na temperatura de 170°C. A densidade aparente da madeira aumentou de 0,59 g.cm⁻³ para 0,78 g.cm⁻³ para os tratamentos em que foi aplicada a taxa de densificação de 36,7% nas duas temperaturas. A umidade da madeira em equilíbrio reduziu de 11,01% para 4,87% para a madeira tratada a 170°C e 36,7% de taxa de densificação. Todos os tratamentos apresentaram maior absorção de água que a testemunha nos períodos de 48h e 72h. Para o inchamento em espessura todos os tratamentos apresentaram maiores valores que a testemunha devido à maior quantidade de lume celular disponível. O *set recovery* reduziu com o aumento da taxa de densificação, com valores iguais a 38,20% e 12,52% para as taxas de densificação de 24% e 36,7%, respectivamente. A dureza Janka da madeira densificada variou de 82,36 MPa a 89,60 MPa, com aumento de até 141,18% em relação a testemunha. Houve melhora na resistência mecânica dos ensaios de simulação de pisos em serviço da madeira densificada termomecanicamente em relação a madeira *in natura*, para a queda da esfera de aço, endentação aplicada em pequenas áreas e carga rolante. Os pisos densificados termomecanicamente da madeira de teca pesquisada podem ser indicados para ambientes de tráfego moderado e intenso, enquanto o piso *in natura* seria indicado apenas para tráfego baixo. Concluiu-se que a aplicação da densificação termomecânica da madeira promoveu alterações positivas na qualidade da madeira utilizada para pisos sólidos, melhorando as propriedades superficiais, químicas, físicas e mecânicas da madeira de *T. grandis* de 15 anos de idade.

Palavras-chave: Termodensificação. Compactação da madeira. Modificação térmica. Madeira juvenil. Dureza.

ABSTRACT

Teak wood from fast-growing plantations generally has a high proportion of juvenile wood and sapwood, which have less attractive characteristics for the industry, such as lighter color, greater dimensional instability, lower density and hardness values. This means that they are not used for higher value-added products such as flooring. In this context, thermo-mechanical densification could be an alternative treatment to improve some of the properties of juvenile wood and contribute to its greater use in the flooring industry. The aim of this study was to evaluate the use of thermomechanically densified 15-year-old *Tectona grandis* wood for the flooring industry. Processed *T. grandis* wood from a 15-year-old plantation was used, which was thermomechanically densified in a thermo-hydraulic press under different conditions: temperatures of 150°C and 170°C and densification rates of 24.0% and 36.7%, as well as raw wood (control). The compaction ratio, mass loss, spring back, surface changes in color, roughness, wettability and surface density were evaluated. The apparent density, wood moisture after equilibrium, water absorption, swelling in thickness, set recovery, changes in chemical constituents, Janka hardness and in-service flooring simulation tests were also evaluated. There was an increase in mass loss as the temperature rose, with values equal to 5.14% and 6.97% for treatment temperatures of 150°C and 170°C, respectively. The spring back had an average value of 5.62%. Thermomechanical densification made the wood surface more hydrophobic, darker and less rough. X-ray densitometry showed that the surface density of densified wood was higher (maximum 1.05 g.cm⁻³) than the central region of the specimen, whose average value was approximately 0.60 g.cm⁻³. FTIR showed a greater reduction in -OH bonds and degradation of hemicelluloses at the temperature of 170°C. The apparent density of the wood increased from 0.59 g.cm⁻³ to an average of 0.78 g.cm⁻³ for the treatments in which the 36.7% densification rate was applied at both temperatures. Wood moisture at equilibrium fell from 11.01% to 4.87% for wood treated at 170°C and 36.7% densification rate. All treatments showed greater water absorption than the control at 48 and 72 hours. For thickness swelling, all the treatments showed higher values than the control due to the greater amount of cell lumen available. Set recovery decreased as the densification rate increased, with values equal to 38.20% and 12.52% for densification rates of 24.0% and 36.7%, respectively. The Janka hardness of the densified wood ranged from 82.36 MPa to 89.60 MPa, with an increase of up to 141.18% compared to the control. There was an improvement in the mechanical resistance of the thermomechanically densified wood in the in-service floor simulation tests compared to the raw wood, for the falling steel ball, indentation applied to small areas and rolling load. Thermomechanically densified floors of the researched Teak wood can be suitable for moderate and heavy traffic environments, while natural floors would be only suitable for low traffic. It was concluded that the application of thermomechanical densification of wood promoted positive changes in the quality of wood used for solid flooring, improving the surface, chemical, physical and mechanical properties of 15-year-old *T. grandis* wood.

Keywords: Thermodensification. Wood compaction. Thermal modification. Juvenile wood. Hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Prensa termo-hidráulica para realização dos ensaios de densificação termomecânica da madeira e medição da temperatura interna da madeira com termopar.	35
Figura 2- Fluxograma com resumo da metodologia e procedimentos realizados na pesquisa.	37
Figura 3 - Corpo de prova sob o gabarito para coleta dos valores de colorimetria CIElab por meio do colorímetro Nix Pro Color Sensor e aplicativo NIX Pro.....	40
Figura 4 – Esquema de redimensionamento e confecção do corpo de prova para a análise de densitometria de raios-x.....	41
Figura 5 - Coleta dos parâmetros de rugosidade por meio do Rugosímetro Surtronic 3+.	42
Figura 6 - Coleta dos valores de ângulo de contato e molhabilidade da madeira de teca por meio do equipamento goniômetro.	44
Figura 7 - Ensaio de dureza Janka com corpos de prova alocado do aparato de aço.....	47
Figura 8 – (A) Equipamento utilizado no ensaio de impacto da esfera de aço cadente e (B) medição dos valores das endentações com relógio comparador.	50
Figura 9 - (A) Equipamento utilizado no ensaio de endentação de cargas aplicadas em pequenas áreas e (B) medição dos valores de endentações com relógio comparador.....	51
Figura 10 – (A) Equipamento utilizado no ensaio de carga rolante e (B) medição dos valores de endentações com relógio comparador.	52
Figura 11 - Equipamento utilizado no ensaio de atrito estático e dinâmico.....	53
Figura 12 – Espectros de infravermelho por Transformada de Fourier da madeira de teca <i>in natura</i> (testemunha) e face e meio da madeira de teca densificada termomecanicamente.	58
Figura 13 - Parâmetros colorimétricos CIELAB da madeira de teca <i>in natura</i> (testemunha) e densificadas termomecanicamente.	61
Figura 14 - Imagens de raios-X e perfis densitométricos da madeira jovem de teca <i>in natura</i> (testemunha) e densificada termomecanicamente.	66
Figura 15 - Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rz e Rt da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	69
Figura 16 – Valores médios e desvio padrão do ângulo de contato e molhabilidade da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	71
Figura 17 – Valores médios e desvio-padrão de densidade aparente (U~12%) da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	74

Figura 18 - Valores médios e desvio-padrão da umidade de equilíbrio da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	76
Figura 19 - Valores médios e desvio-padrão de absorção de água nos períodos de 2h, 24h, 48h e 72h da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	78
Figura 20 - Valores médios e desvio-padrão do inchamento em espessura nos períodos de 2h, 24h, 48h e 72h da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	81
Figura 21 - Valores médios e desvio-padrão da Dureza Janka da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	84
Figura 22 - Equação ajustada e relação entre a depressão causada pela queda da esfera de aço e as alturas de queda para as madeiras de teca de 15 anos densificadas termomecanicamente e testemunha.	86
Figura 23 - Valores médios e desvio-padrão das endentações causadas por cargas aplicadas em pequenas áreas na madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	88
Figura 24 – Valores médios e desvio-padrão das endentações causadas no ensaio de carga rolante na madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	90
Figura 25 – Valores médios e desvio-padrão dos coeficientes de atrito estático e dinâmico da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos de densificação termomecânica da madeira.	36
Tabela 2 - Classificação da variação total da cor (ΔE^*) de madeiras.	41
Tabela 3 - Classificação da densidade da madeira.	45
Tabela 4 - Classificação da dureza Janka.	48
Tabela 5 - Classes de qualidade para os ensaios de simulação em serviço de pisos de madeira maciça.	48
Tabela 6 – Valores médios e desvio padrão de taxa de densificação real, razão de compactação, perda de massa e <i>spring back</i> da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente.	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	<i>Tectona grandis</i> L.f.....	18
3.2	Madeira juvenil.....	21
3.3	Pisos de madeira: características desejáveis e ensaios de simulação em serviço ..	24
3.4	Modificação térmica da madeira.....	28
3.5	Densificação termomecânica da madeira	29
4	MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1	Preparo e densificação termomecânica dos corpos de prova	33
4.2	Parâmetros do processo de densificação termomecânica da madeira	37
4.3	Espectroscopia de infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	38
4.4	Qualidade da superfície da madeira	39
4.4.1	Colorimetria.....	39
4.4.2	Densitometria de raios-X.....	41
4.4.3	Rugosidade.....	42
4.4.4	Ângulo de contato e molhabilidade	43
4.5	Ensaio Físicos.....	44
4.6	Dureza Janka	47
4.7	Ensaio de simulação de pisos em serviço.....	48
4.7.1	Ensaio de impacto da esfera de aço cadente	49
4.7.2	Ensaio de endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas.....	50
4.7.3	Ensaio de carga rolante	52
4.7.4	Ensaio de atrito	53
4.8	Análise estatística.....	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
5.1	Parâmetros do processo de densificação termomecânica da madeira de teca	55
5.2	Espectroscopia de infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	57
5.3	Qualidade da superfície da madeira	61
5.3.1	Colorimetria.....	61
5.3.2	Densitometria de raios-X.....	65
5.3.3	Rugosidade.....	68
5.3.4	Ângulo de contato e molhabilidade	71

5.4	Ensaio físico.....	73
5.5	Dureza Janka	84
5.6	Ensaio de simulação de pisos em serviço.....	85
5.6.1	Queda da esfera de aço cadente	85
5.6.2	Ensaio de endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas.....	88
5.6.3	Ensaio de carga rolante	89
5.6.4	Ensaio de atrito estático e dinâmico	92
6	CONCLUSÃO.....	94
	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS.....	96
	APÊNDICES	109

1 INTRODUÇÃO

A madeira é amplamente utilizada para pisos, apesar da existência de outros materiais como pisos cerâmicos e vinílicos. Isso pela madeira proporcionar alta resistência mecânica, elegância, conforto térmico e acústico aos espaços internos e externos de diversos ambientes. Além disso, a crescente procura por produtos ecológicos e sustentáveis coloca a madeira em destaque por ser um produto renovável. Os pisos de madeira apresentam grande importância econômica no segmento de Produtos de Maior Valor Agregado (PMVA) do setor industrial madeireiro. No ano de 2022, o mercado global de pisos de madeira movimentou valor de US\$ 47,8 bilhões, destacando-se a região Ásia-Pacífico, com maior contribuição da China e da Índia (Mordor Intelligence Research & Advisory, 2023). Além disso, conforme mencionado no mesmo relatório, os Estados Unidos, Alemanha, Reino Unido e França também ocupam posições de destaque como principais mercados para pisos de madeira.

Ao escolher madeiras para a produção de pisos, deve-se preferir madeiras com propriedades físicas e mecânicas adequadas a esse uso, como maior densidade (Tenório; Moya; Navarro-Mora, 2021) e dureza, menor umidade de equilíbrio higroscópico e instabilidade dimensional (Laskowska *et al.*, 2021), já que essas propriedades influenciam em sua resistência física, mecânica e biológica. Além disso, a qualidade dos pisos maciços também pode ser avaliada por meio de ensaios de simulação em serviço (ASTM, 2017). Esses ensaios permitem conhecer as características do material e prever seu comportamento em uso. Além disso, é possível estabelecer classes de qualidade para auxiliar na determinação do melhor tipo de tráfego suportado pelo piso.

Dentre as madeiras de alta qualidade utilizadas para a produção de pisos destacam-se as espécies tropicais amazônicas, assim como também a teca de florestas nativas que ocorrem no sul e sudeste asiático. Além das excelentes propriedades físicas, mecânicas e biológicas, a madeira de teca apresenta notáveis propriedades estéticas como o desenho, a coloração e a textura atrativa. Essas características tornaram a teca nativa uma das espécies de madeira tropical mais valorizadas internacionalmente (Kollert; Kleine, 2017), com valor de exportação de até US\$ 3.000,00 por metro cúbico de madeira serrada, conforme observado nas transações da Indonésia (ITTO, 2024).

Em virtude disso, a teca é a espécie de madeira tropical de alta qualidade mais plantada no mundo, estabelecida em aproximadamente 70 países (Kollert; Kleine, 2017). Acredita-se

que futuramente a oferta mundial de madeira de teca venha quase inteiramente de plantações de rápido crescimento com idade de 15 a 25 anos (ITTO, 2023b).

Nos países asiáticos é notória a importância da madeira de teca. A Índia o principal destino de exportações da teca plantada no Brasil na forma de toras *in natura* e serrados brutos (Takizawa *et al.*, 2022), com valor de comercialização Cost and Freight (Custo e Frete) do metro cúbico, respectivamente, iguais a US\$ 298,00 e US\$ 355,00 (ITTO, 2024). Entretanto, a madeira exportada possui qualidade superior à da madeira de teca de desbastes, que geralmente é comercializada no mercado interno.

Atualmente, um dos grandes desafios dos plantios de teca é a dificuldade para comercializar a madeira de menor valor, principalmente a madeira proveniente do desbaste (Takizawa *et al.*, 2022), já que a maior utilização e valorização da madeira para a produção de PMVA e se dá principalmente da madeira advinda de florestas nativas e plantações de crescimento lento maduras. Essa condição ocorre porque em plantios de rápido crescimento e de rotações de 20 a 25 anos os fustes possuem maior proporção de madeira juvenil (Darmawan *et al.*, 2015; Putro *et al.* 2020), menor relação entre cerne e alburno (Fernández-Sólis, 2018) e menores diâmetros (Moya; Band; Quesada, 2014; Rizanti *et al.* 2018; Reis; Oliveira; Santos, 2023).

Nesse contexto, a madeira de plantios de rápido crescimento apresenta características e propriedades distintas da teca proveniente de florestas nativas ou plantações antigas. Algumas dessas diferenças incluem a coloração menos atrativa (Thulasidas *et al.*, 2006; Moya; Tenorio, 2021) por ser mais clara e menos uniforme e por apresentar maior instabilidade dimensional, menor durabilidade natural (Rizanti *et al.* 2018), menores valores de densidade (Darmawan *et al.*, 2015) e dureza (Blanco-Flórez *et al.* (2014). Além disso, a madeira de teca de plantio jovem não é indicada para utilização para pisos em ambientes com tráfego intenso e moderado (Blanco-Florez *et al.*, 2015).

Diante disso, com o intuito de maximizar a rentabilidade dos plantios de crescimento rápido, é necessário agregar valor à madeira juvenil proveniente de desbastes na indústria de PMVA, como é o caso da fabricação de pisos. No entanto, para isso, torna-se necessário realizar tratamentos destinados a modificar as características indesejáveis desse material. Esses tratamentos visam conferir à madeira a qualidade adequada para sua utilização em pisos, e proporcionar aproveitamento mais eficaz e condizente com os padrões desejados.

Dentre os tratamentos que visam melhorar essas propriedades tem-se o tratamento de densificação termomecânica da madeira. Esse tratamento consiste em associar a aplicação de

altas temperaturas com pressão em prensa termo-hidráulica. O objetivo desse tratamento é melhorar as propriedades de densidade e dureza (Tenorio; Moya; Navarro-Mora, 2021), além de proporcionar alteração de cor, redução da rugosidade superficial (Bekhta *et al.*, 2014) e redução da molhabilidade (Pertuzzatti *et al.*, 2018). Outra característica da densificação termomecânica da madeira é que esse processo pode exigir menor consumo energético ao aumentar somente a densidade superficial da madeira, e reduzir a necessidade de revestimento de superfície no produto final (Laine; Rautkari; Hughes, 2013). Como resultado, a qualidade da superfície da madeira pode ser aprimorada.

A densificação termomecânica da madeira juvenil visando a melhoria de sua qualidade para utilização em pisos pode desempenhar importante papel na promoção da sustentabilidade. Uma vez que, o processo de densificação da madeira não utiliza de aditivos químicos que degradam o meio ambiente (Korkut *et al.*, 2008). Além disso, agregar valor à madeira de reflorestamento desempenha um papel crucial na preservação das florestas nativas de teca, as quais enfrentam declínio, ao diminuir significativamente a pressão gerada pela exploração ilegal de madeira.

Entretanto, informações sobre o efeito da densificação termomecânica na qualidade dos pisos são escassos. Pondera-se que esse tratamento pode ter efeito positivo na qualidade da madeira de teca proveniente de florestas de crescimento rápido, especialmente quando aplicados à fabricação de pisos maciços. É esperado que a madeira submetida ao processo de densificação termomecânica apresente aumento da dureza, bem como propriedades físicas e superficiais adequadas, contribuindo para o desempenho superior durante seu uso como pisos.

2 OBJETIVOS

Geral:

Contribuir com o conhecimento e a viabilidade técnica da aplicação da densificação termomecânica da madeira de *Tectona grandis* de 15 anos, visando a sua utilização para produção de pisos sólidos.

Específicos:

- a) Avaliar se o efeito da combinação das temperaturas de 150°C e 170°C com as taxas de densificação de 24% e 36,7% é eficiente para promover melhoria na qualidade da superfície, nas propriedades físicas, na dureza Janka e nos ensaios de simulação de pisos em serviço da madeira de teca de 15 anos em relação à madeira *in natura*;
- b) Verificar qual a melhor combinação de temperatura e taxa de densificação, a fim de aprimorar a qualidade da madeira de teca de 15 anos para aplicações em pisos;
- c) Orientar a indústria madeireira quanto ao ambiente mais adequado e tipo de tráfego para a utilização tanto da madeira de teca densificada termomecanicamente quanto da *in natura*.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 *Tectona grandis* L.f.

A teca (*Tectona grandis* L.f.) pertencente à Lamiaceae, da Ordem Lamiales (TROPICOS, 2022) e ocorre naturalmente em quatro países do Sul e Sudeste Asiático: Península Indiana, Mianmar, noroeste da República Democrática Popular do Laos e norte da Tailândia (Kaosa-Ard, 1981). A espécie também cresce amplamente em Java, onde é considerada introduzida, mas naturalizada ao longo de vários séculos (Verhaegen *et al.*, 2010).

A teca cresce e se adapta bem em amplas condições ambientais, embora sua distribuição natural seja caracterizada por um clima de monção com precipitação variando de 1 300 a 2 500 mm.ano⁻¹ e estação seca de 3 a 5 meses (Kaosa-Ard, 1981). Pode ser encontrada desde regiões extremamente secas com baixa média anual de precipitação pluviométrica (500 mm) até locais muito úmidos (5 000 mm) (Kaosa-Ard, 1981). As condições favoráveis para o crescimento da teca estão entre 22°C e 27°C, onde a temperatura máxima mensal é inferior a 40°C e a temperatura mínima mensal é superior a 13°C (Kaosa-Ard, 1981).

As florestas nativas de teca vêm sendo reduzidas devido à superexploração e ao desmatamento descontrolado na Índia e no sudeste da Ásia (Kollert; Kleine, 2017). Em Mianmar, a exploração legal e ilegal da madeira de teca, a expansão agrícola, a mudança do uso do solo e a mineração são os principais responsáveis pela diminuição das florestas nativas de teca (Appanah *et al.*, 2016). Na Índia, a degradação das florestas nativas de teca está vinculada à acelerada exploração da madeira para o uso local e pela pecuária extensiva (Kollert; Kleine, 2017). Na Tailândia, as florestas nativas de teca diminuíram devido ao crescimento econômico, a expansão agrícola, a invasão, a extração ilegal de madeira, a mudança do uso do solo, aos incêndios, dentre outros (Appanah *et al.*, 2016). Atualmente, todos os países que possuem florestas nativas de teca (Índia, Laos, Myanmar e Tailândia) proíbem a exportação de toras originárias dessas áreas (Takizawa *et al.*, 2022), com o objetivo de conservar e proteger as florestas nativas de teca que estão em declínio (Kollert; Kleine, 2017).

A madeira da teca é considerada uma das espécies de madeira nobre tropical mais valiosas do mundo (Takizawa *et al.*, 2022). É preferida quando o uso requer estruturas expostas ao tempo e é utilizada na construção naval de alto desempenho, laminados, madeira compensada, blocos, vigas, tábuas, molduras, painéis, componentes para móveis, portas maciças, portas embutidas, caixilhos de portas e janelas, esquadrias, janelas, persianas, objetos

esculpidos, artefatos domésticos e de cozinha (Thulasidas *et al.*, 2017). A teca também é muito utilizada na indústria de pisos, tonéis, esculturas e demais usos nobres (Ugalde Arias, 2013). Tais aplicações necessitam que a madeira apresente alta estabilidade dimensional em diferentes condições climáticas, coloração atrativa e estável, além da resistência à ação de patógenos e intempéries (Kokutse *et al.*, 2006, Niamké *et al.*, 2021).

A teca é uma das espécies de madeira de folhosas de origem tropical mais importantes no mercado internacional como madeira de alta qualidade (Setiawan; Rachmawati; Tarno, 2018; Kollert; Kleine, 2017). A cubagem da madeira de teca, para a maioria dos exportadores, é efetuada na unidade Hoppus, cerca de 77% do volume em m³. De acordo com o Tropical Timber Market Report de janeiro de 2024, o preço Cost and Freight (Custo e Frete) do metro cúbico da madeira em tora e madeira serrada de teca produzida no Brasil e importada pela Índia, foi igual a US\$ 298,00 e US\$ 355,00, respectivamente (ITTO, 2024).

A alta demanda da madeira de teca no mercado internacional, aliada a seu alto valor comercial e ao declínio da produção de florestas nativas vieram a impulsionar diversos programas para a plantação dessa espécie em vários países (Takizawa *et al.*, 2022) e atualmente suas plantações de rápido crescimento se destacam no mundo inteiro (Arévalo; Martí, 2020). A idade de rotação dos plantios de teca em sua área de distribuição natural varia entre 50 e 90 anos (Ball *et al.*, 1999). Por isso, têm sido estabelecidas plantações como espécie exótica para produção de madeira de qualidade superior em vários países fora da área de origem da espécie (Ball *et al.*, 1999).

Dentre as espécies de madeira tropical de alto valor a teca é a que mais tem sido plantada (Kollert; Kleine, 2017) e estudada no mundo (Mascarenhas *et al.*, 2021). A área mundial cultivada com teca tem aumentado consideravelmente, sendo, em 2017, 6,83 milhões de hectares, com 80% dessa área localizada na Ásia, 10% na África e 6% na América (Kollert; Kleine, 2017). A teca é plantada em aproximadamente 70 países tropicais em toda a Ásia tropical, África, América Latina e Oceania (Kollert; Kleine, 2017).

No Brasil, a área plantada é de aproximadamente 76.000 hectares (IBÁ, 2023), a maior parte está concentrada na região Centro-Oeste, principalmente no estado de Mato Grosso (FAMATO, 2013). Além disso, no Brasil tem sido plantada, em maior escala, em sistema de monocultivo (Reis; Oliveira; Santos, 2023). Uma considerável parte dos plantios de teca está associada a regiões com clima tropical quente e úmido (Kaosa-Ard, 1981), como é o caso dos estados de Mato Grosso e do Pará (Ugalde Arias, 2013).

A espécie foi introduzida no Brasil em 1971, no município de Cáceres, em Mato Grosso, em que as condições climáticas são semelhantes às dos países em que a teca é natural, no entanto, com solos de melhor fertilidade (Tsukamoto Filho *et al.*, 2003). Além do rápido crescimento em certas áreas do Brasil, a formação de fustes retilíneos tem estimulado o plantio da espécie em larga escala para a produção de madeira serrada para exportação (Leite *et al.*, 2011). O Brasil atualmente é considerado o principal produtor de teca plantada da América Latina, e vem atraindo atenção de produtores locais, assim como grandes grupos de investidores internacionais (Takizawa *et al.*, 2022).

A rotação das plantações brasileiras de rápido crescimento tem variado entre 18 e 25 anos, com predominância do corte final próximo aos 20 anos (Takizawa *et al.*, 2022). Ressalta-se que a reputação internacional da teca foi estabelecida devido à alta qualidade e durabilidade da madeira das florestas nativas. Já a teca da maior parte das florestas plantadas de rápido crescimento não possuem essa reputação no cenário internacional (Kollert; Kleine, 2017). Os produtos de madeira de teca das plantações brasileiras, principalmente provenientes da madeira de corte final, tem como principal destino a exportação para a Ásia, especialmente para a Índia, na forma de toras *in natura* e serrados brutos (Takizawa *et al.*, 2022). A madeira exportada possui qualidade superior a madeira de teca de desbastes, que geralmente é comercializada no mercado interno. Atualmente, um dos grandes desafios é a dificuldade para comercializar a madeira de teca de menor valor, principalmente a madeira proveniente do desbaste (Takizawa *et al.*, 2022), que possuem como característica menor relação cerne/alburno e menores diâmetros.

Outro ponto importante é que a qualidade da madeira de teca está principalmente ligada à madeira do cerne (Lemos *et al.*, 2019), uma vez que a alta durabilidade natural e alta estabilidade dimensional, são características ligadas à presença de algumas substâncias como o caucho, que é um tipo de látex responsável pela redução da absorção de água, e a tectoquinona, um conservante natural contido nas células desse tipo de madeira (Kokutse *et al.*, 2006).

As toras de teca de plantações de rápido crescimento de 20 a 25 anos de idade apresentam menores diâmetros que as toras de teca de florestas nativas antigas. Esse fato resulta em toras com menor percentual de cerne, já que o cerne aumenta com a idade e o diâmetro das toras (Moya *et al.*, 2014, Fernández-Solis *et al.*, 2018). Assim, devido aos menores diâmetros, a relação cerne/alburno de plantios jovens comparados a florestas nativas mais velhas ou a plantios de longa rotação é menor, o que favorece o maior contraste entre a coloração da madeira de cerne e alburno. Esse contraste para alguns mercados consumidores torna-se um

aspecto negativo, visto que as madeiras de teca nativas possuem maior uniformidade quanto a cor, acarretando preferência no mercado consumidor em relação à madeira de plantios brasileiros (Lopes *et al.*, 2014). Outro aspecto importante em relação à cor é que a madeira de teca de árvores de curta rotação possui coloração clara e ampla gama de variação de cores (Thulasidas *et al.*, 2006) comparadas a madeira de teca de melhor qualidade de florestas nativas de Myanmar que possui coloração dourada (Moya; Tenório *et al.*, 2021). Bhat (1999) classifica a madeira de teca em quatro categorias de cor para comercialização: castanho-amarelo-dourado típico, castanho-amarelado mais escuro, castanho-acinzentado e amarelo pálido. As três primeiras categorias (mais escuras) são resultantes de madeira de teca de florestas nativas, e a última categoria (mais clara) de madeiras de plantações.

Rizanti *et al.* (2018) ao avaliarem a madeira de teca de curta e longa rotação plantadas na Indonésia, verificaram que a madeira de teca de longa rotação apresenta maior porcentagem de cerne com maior quantidade de extrativos que a madeira de curta rotação, que é composta principalmente por alburno com grande quantidade de madeira juvenil. Os autores também notaram que a quantidade de tectoquinona na madeira de longa rotação era significativamente maior do que na madeira de curta rotação, onde a quantidade era praticamente inexistente. Esse extrativo afeta diretamente a durabilidade natural, estabilidade dimensional, sorção de água e a molhabilidade da madeira. Os autores também verificaram que a madeira de curta rotação apresentou menores valores de densidade e durabilidade natural mais baixa, o que pode restringir a utilização da madeira de curta rotação tanto em aplicações internas quanto externas.

Silva *et al.* (2023) ao avaliarem a madeira de teca de curta rotação com 5, 10, 15 e 20 anos de idade observaram variação de 16,3% a 60% na porcentagem de cerne para a madeira de 5 e 20 anos, respectivamente. Os autores também relataram que a madeira tornou-se mais escura e saturada com diminuição da predominância da cor amarela em relação vermelha com o aumento da idade. Além disso, verificaram que do total dos extrativos presentes na madeira a porcentagem de tectoquinona variou de 43,3% a 60,7% para as idades de 5 e 20 anos.

3.2 Madeira juvenil

O fuste das árvores pode ser dividido em duas regiões, de acordo com as propriedades estruturais da madeira: o lenho juvenil ou madeira juvenil, que é o xilema produzido nos primeiros anos de crescimento da árvore até certa idade cambial e o lenho adulto ou madeira adulta, que é o xilema produzido após o período de transição da madeira juvenil para a madeira

adulta (Panshin; de Zeeuw, 1980). Conforme ocorre o crescimento da árvore em altura e a copa se distancia da base, as células da parte inferior do fuste passam a sofrer menor influência do meristema apical. Isso ocasiona o amadurecimento do câmbio vascular e o início da formação do lenho adulto na árvore (Zobel; Van Buijtenen, 1989).

No lenho adulto, que está localizado nas proximidades da casca, as células possuem dimensões máximas e tamanhos relativamente constantes, padrão estrutural bem desenvolvido e comportamento físico estável. Apresenta características e propriedades considerados normais para a espécie (Jankowsky, 1979; Panshin; de Zeeuw, 1980; Zobel; Van Buijtenen, 1989). Já o lenho juvenil da árvore é a primeira madeira a ser formada nos anéis de crescimento próximo à medula e o seu diâmetro pode ser uniforme ou variável, estendendo-se da base até o topo, formando parte do alburno ou do cerne da árvore jovem (Zobel; Van Buijtenen, 1989). Anatomicamente, caracteriza-se por aumentos progressivos no tamanho das células, além de alterações em sua forma, estrutura e distribuição nos anéis de crescimento sucessivos, que refletem nas propriedades da madeira (Panshin; de Zeeuw 1980; Evans; Senft; Green., 2000; Vidaurre *et al.*, 2011).

Em reflorestamento de crescimento rápido, especialmente em árvores com menores fustes, decorrentes dos primeiros desbastes ou até mesmo de plantações com ciclo de corte rápido, a proporção de lenho juvenil é maior que de árvores de florestas naturais (Zobel; Buijtenen, 1989; Vidaurre *et al.*, 2011). Devido a transição gradual entre as células da madeira juvenil e adulta, existe grande dificuldade em conseguir estimar a idade exata de formação de madeira adulta (Jankowsky, 1979) O comprimento das fibras é a variável mais frequentemente utilizada para definir o limite entre esses dois tipos de lenho (Leonello, Palma, Ballarin, 2008; Gatto *et al.*, 2008; Souza *et al.*, 2017). A madeira juvenil apresenta fibras com menor comprimento, largura e espessura da parede, além de menor diâmetro dos vasos (Soares *et al.*, 2019), densidade (Soares; Lima; Silva, 2016) e resistência mecânica (Lourençon *et al.*, 2014). Outra característica anatômica observada é que o ângulo microfibrilar da camada S_2 é maior na madeira juvenil (Souza *et al.*, 2017).

É bem conhecido que as características da madeira juvenil contribuem para as propriedades indesejáveis da madeira (Darmawan *et al.*, 2015). Portanto, compreender as diferenças entre as propriedades do lenho juvenil e do lenho adulto é importante para a utilização de madeira processada mecanicamente (Vidaurre *et al.*, 2011). Isso se deve ao fato de que o lenho juvenil influencia no processo de transformação da madeira, pois afeta suas

propriedades tecnológicas, ocasionando maior instabilidade dimensional e baixa resistência mecânica (Müller *et al.*, 2014).

Estudos comprovam que a madeira juvenil de teca apresenta menor diâmetro de vasos, anéis de crescimento mais largos, fibras com menor comprimento, maior ângulo microfibrilar (Bhat; Pryia; Rugmini; 2001), menor densidade (Darmawan *et al.* 2015), estabilidade dimensional e resistência biológica (Rizanti *et al.*, 2018).

Trabalhos apontam que a idade de transição da madeira juvenil para a madeira adulta de teca é variável. Em estudo realizado por Bhat, Pryia e Rugmini (2001), em diferentes condições de crescimento os autores perceberam que essa idade de transição ocorre por volta dos 15 a 20 anos de idade. Curvo *et al.* (2024) avaliando a madeira de teca de rápido crescimento de 5, 10, 15 e 20 anos observou que em todas as idades avaliadas, a madeira foi composta em sua maior parte por lenho juvenil e apenas as madeiras de 15 e 20 anos apresentaram cerne com lenho adulto. Os últimos autores observaram lenho de transição a partir do 11º ano. Putro *et al.* (2020) observaram que as árvores de teca com menos de 20 anos apresentam 80% a 100% de madeira juvenil. Avaliando plantios de teca de curta e longa rotação em Java, Darmawan *et al.*, (2015) observaram que toda a madeira produzida na altura do peito em plantios de 10 anos era juvenil e em plantios de 40 anos de idade a quantidade de madeira juvenil reduziu para 65%. A porcentagem de cerne produzida aos 10 anos e 40 anos de idade foram, respectivamente, iguais a 40% e 80%. Os autores também relataram que o valor de densidade aos 10 anos foi de $0,486 \text{ g.cm}^{-3}$ e de $0,670 \text{ g.cm}^{-3}$ aos 40 anos de idade.

Ainda nesse contexto Motta (2011), Blanco-Flórez *et al.* (2014) e Albuês *et al.* (2024), ao avaliarem a dureza Janka da madeira de teca jovem de 13 a 15 anos, encontraram valores médios inferiores a 50 MPa. Silva *et al.* (2021) encontraram valor médio de dureza Janka para a teca de 17 anos igual a 58,66 MPa. Benedetti (2018) comparou os valores de dureza Janka entre madeiras de teca jovem e outras espécies de madeira tropical utilizadas para a confecção de pisos maciços. O autor observou que a dureza Janka da madeira de teca foi em média 78%, 75% e 68% menor que as madeiras de Cumaru, Ipê e Jatobá, respectivamente. Albuês *et al.* (2024) classificou a madeira de teca de 15 anos como moderadamente macia, conforme Forest Laboratory Products - FPL-0171 (FLP, 1973) e indicou o uso para a construção civil (portas e janelas), painéis e móveis, no entanto não recomendou a utilização para pisos.

A teca é uma espécie em que o regime de manejo com desbastes é fundamental, com intuito de produzir toras com maiores diâmetros (Medeiros *et al.*, 2017) e maior porcentagem de cerne, para a produção de madeira serrada. Normalmente, a madeira resultante dos desbastes

é utilizada em produtos de menor valor agregado por consequência da maior proporção de lenho juvenil (Paes *et al.*, 2015). Isso reflete em usos como escoras para construção civil, estacas, moirões e produção de energia nas formas de lenha, carvão (Figueiredo; Oliveira; Scolforo, 2005) e biocombustíveis (Arévalo; Martí, 2020). Ainda podem tornar-se resíduo do processo e serem abandonadas nos povoamentos, onde são biodeterioradas (PAES *et al.*, 2015). A menor agregação de valor aos subprodutos provenientes da madeira juvenil não inviabiliza os povoamentos desbastados, mas aproveitar melhor essa matéria-prima pode tornar o plantio mais rentável (Paes *et al.*, 2015).

3.3 Pisos de madeira: características desejáveis e ensaios de simulação em serviço

A madeira apresenta grande diversidade de usos devido a suas características mecânicas, cor e textura (Andrade; Galina; Jankowsky, 2015). Além disso, apresenta características estéticas excelentes para a decoração de interiores (Zhuang *et al.*, 2022). Ela é amplamente utilizada na construção civil, especialmente na confecção de produtos de maior valor agregado, como os pisos.

A heterogeneidade da madeira, confere a ela variações em sua composição química, estrutura anatômica e propriedades físicas e mecânicas. A variação dessas características ocorre entre espécies, dentro da mesma espécie e até no mesmo indivíduo (Andrade; Galina; Jankowsky, 2015). Essa heterogeneidade na composição influencia na qualidade da madeira para utilização em pisos maciços.

Ao selecionar espécies apropriadas para a fabricação de pisos, devem ser consideradas, principalmente, as propriedades físicas e mecânicas da madeira, como densidade (Tenório; Moya; Navarro-Mora, 2021), estabilidade dimensional e dureza (Laskowska *et al.*, 2021), além da porcentagem de cerne. Além disso, as propriedades da superfície da madeira, principalmente do ponto de vista do consumidor, são as mais consideradas no momento da escolha da madeira para pisos, pois afetam a estética do material (Ayata *et al.*, 2017).

A densidade representa a quantidade de massa disponível em determinado volume de madeira e torna-se importante por estar relacionada com as propriedades mecânicas (Machado *et al.*, 2014; Van Duong; Hasegawa; Matsumura, 2019; Duarte *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2021) e a durabilidade da madeira (Stallbaun *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2019b). A densidade da madeira pode ser classificada em muito leve ($0,200 - 0,300 \text{ g.cm}^{-3}$), leve ($< 0,500 \text{ g.cm}^{-3}$),

moderada ($0,500 - 0,750 \text{ g.cm}^{-3}$), pesadas ($0,750 - 1,000 \text{ g.c.m}^{-3}$) e muito pesadas ($> 1,000 \text{ g.cm}^{-3}$), conforme Csanády, Magoss e Tolvaj (2015).

A utilização para pisos exige maior resistência do material, por isso, as madeiras pesadas são indicadas para o uso em pisos maciços. No entanto, atualmente madeiras de densidade média também vêm sendo utilizadas (Andrade; Galina; Jankowsky, 2015), devido principalmente à escassez de madeiras com densidade elevada.

A dureza é importante em materiais utilizados para pisos (Hirata; Ohta; Honma, 2001; Acuña *et al.*, 2020), pois superfícies mais duras são menos susceptíveis a deformações permanentes quando aplicadas cargas sob o piso (Sydor; Pinkowski; Jasińska, 2020). Arquitetos geralmente preferem madeiras tropicais devido às suas altas densidades (Fang *et al.*, 2012). Isso se deve a alta correlação positiva entre a densidade e as propriedades mecânicas da madeira, que resulta em maiores valores de dureza (Marchesan *et al.*, 2020). Devido a essa correlação, ao escolher o tipo de madeira é indicado dar preferência a pisos de madeiras mais densas, pois essas são mais resistentes (Blanco-Flórez *et al.*, 2015). Além disso, a dureza também apresenta correlação com resistência à compressão, flexão, cisalhamento e rigidez (Andrade; Galina; Jankowsky, 2015). As associações profissionais, como a National Wood Flooring Association (NWFA) e os fabricantes de pisos classificam as espécies de madeira por sua dureza Janka (Fang *et al.*, 2012).

Além da densidade e da dureza, a estabilidade dimensional é também uma característica importante quando se tem interesse em aplicar a madeira para piso em locais com variações muito significativas de temperatura e umidade. As contrações e os inchamentos lineares e volumétricos da madeira podem acarretar no descaixe das peças acima da linha do contrapiso, podendo a madeira se soltar, no caso do inchamento, e revelar frestas, no caso das contrações (Benedetti, 2018).

De maneira geral, durante a produção de pisos e móveis é desejável maior quantidade de madeira de cerne que madeira de alburno. Essa preferência é em decorrência da madeira de cerne apresentar melhores características estéticas e de durabilidade que a madeira de alburno, como é o caso da coloração mais escura e maior durabilidade natural devido aos extrativos presentes nesse tipo de madeira (Brocco *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2023). A textura e a cor da madeira trazem sensação de conforto, o que a torna um produto excelente para decoração de interiores (Navarro; Perez, 2019). Geralmente, espécies tropicais que apresentam coloração escura são mais valorizadas e preferidas para a utilização em pisos, móveis e decoração de residências, iates de luxo, aeronaves e veículos ferroviários (Passauer *et al.*, 2015). A cor da

madeira é uma característica estética importante e influencia diretamente na determinação do preço do produto (Mononen; Alvila; Pakkanen, 2002).

Durante sua utilização os pisos de madeira podem sofrer danos decorrentes de quedas e do arraste de objetos, além de serem suscetíveis a riscos e ao desgaste causado pelo tráfego de pessoas. Esses fatores podem impactar tanto a aparência quanto o desempenho desses pisos (Blanco-Flórez *et al.*, 2015). Os ensaios de simulação em serviço de pisos maciços são utilizados para prever o comportamento de pisos de madeira em uso (ASTM, 2017). A norma ASTM D2394-17 (ASTM, 2017) tem sido utilizada para avaliar esse tipo de ensaio em pisos de madeira maciça de espécies conhecidas e potenciais.

A norma ASTM D2394-17 (ASTM, 2017) descreve os procedimentos necessários para determinar diferentes esforços mecânicos dos pisos submetidos ao uso. Isso abrange a determinação da resistência a cargas concentradas, a avaliação do impacto de esfera de aço, a determinação dos coeficientes de atrito estático e dinâmico das superfícies dos pisos, avaliação da endentação provocada por cargas aplicadas em pequenas áreas e a resistência à carga rolante. O documento também descreve métodos para avaliar a resistência à abrasão e o umedecimento da superfície.

O ensaio de impacto da esfera de aço cadente simula o impacto de pequenos objetos sobre o piso de madeira, conforme indicado pela ASTM D2394-17 (ASTM, 2017). Do mesmo modo, a norma descreve que a endentação por cargas aplicadas em pequenas áreas, simula o desgaste ocasionado, por exemplo, pelo pisoteio de sapatos de saltos de menor área de contato. Além disso, o ensaio de resistência à carga rolante simula o dano ocasionado na superfície do piso quando caixas, pianos, aparelhos eletrodomésticos ou outros objetos pesados são arrastados (ASTM, 2017).

Os coeficientes de atrito estático ou dinâmico simulam o atrito ocasionado pelo tráfego de pessoas sobre o piso de madeira, ou seja, a facilidade ou a dificuldade de deslizar o solado de sapato na superfície do piso, de acordo com a ASTM D2394-17 (ASTM, 2017). Esse ensaio fornece medidas do quanto é escorregadio o piso de madeira. Ainda conforme a norma, a abrasividade simula a ação abrasiva do pé em contato com o piso ao caminhar. O ensaio de umedecimento da superfície simula como o piso se comporta ao ser molhado, seja por ser lavado ou acidentalmente devido à chuva através de uma janela aberta, algum derramamento ou outro motivo (ASTM, 2017).

Na literatura é possível encontrar resultados desses ensaios para algumas espécies. No ensaio de resistência à carga rolante, ao comparar resultados de trabalhos distintos avaliando a

mesma espécie ou até mesmo espécies diferentes é possível perceber que o aumento da densidade da madeira resulta na redução das depressões causadas no ensaio (Padilha *et al.*, 2006; Santos; Lima; Silva., 2010; Martins *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2019a; Costa *et al.*, 2021). Oliveira *et al.* (2019a) ao avaliarem espécies tropicais encontraram depressões após 50 viagens, variando de 0,105 a 0,458 mm para as espécies *Tabebuia impetiginosa* (Mart. ex D.C.) Standl. e *Mimosa scabrella* Benth, que possuíam densidades de 1,067 g.cm⁻³ e 0,621 g.cm⁻³, respectivamente. Costa *et al.* (2021) ao avaliarem espécies tropicais nativas observaram forte correlação negativa (-0,93) entre a densidade básica e a depressão causada pelo ensaio de carga rolante.

Martins *et al.* (2013) ao avaliarem ensaios da esfera de aço cadente nas espécies *Corymbia maculata* Hook, *Eucalyptus microcorys* F. Muell e *Eucalyptus clöziana* F. Muell, observaram que não há diferença estatística entre as mesmas. Mesmo assim, os autores encontraram menor valor de depressão para a madeira de *C. maculata* que apresentou maior densidade e maior valor de depressão para a madeira de *E. clöziana* que apresentou menor densidade, entre as espécies avaliadas. Oliveira *et al.* (2019a) e Costa *et al.* (2021), observaram relação inversa entre a endentação do ensaio da esfera de aço cadente e densidade da madeira. Blanco-Flórez *et al.* (2015) e Costa *et al.* (2021) constataram que para todas as espécies avaliadas, quanto maior a altura da liberação da esfera de aço, maior foi a depressão causada no piso, como já esperado.

Martins *et al.* (2013), avaliando as madeiras de *E. clöziana*, *C. maculata* e *Eucalyptus microcorys*, observaram valores médios de endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas após 100 viagens iguais a 0,023, 0,043 e 0,050 mm, respectivamente. Oliveira *et al.* (2019a) ao avaliarem espécies *Handroanthus* spp. e *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd não observaram depressões após 100 viagens e associaram esse resultado a elevada densidade dessas madeiras, que resultam em maiores forças e dureza, refletindo na resistência à carga aplicada. Os autores ainda indicaram que essas madeiras possuem potencial para utilização em locais de tráfego intenso, tais como restaurantes, centros comerciais e bancos. Marchesan *et al.* (2020) ao avaliarem a madeira de *Hovenia dulcis* Thunberg com 100% de cerne obtiveram valores médios de depressão inferiores à composição de cerne e alburno, para 50 e 100 viagens. Oliveira *et al.* (2019a) definiram três classes de qualidade para os ensaios de simulação em serviço de pisos de madeira maciça, sendo elas baixa intermediária e alta.

Na literatura apenas o trabalho de Blanco-Flórez *et al.* (2015) avaliou a qualidade da madeira de teca jovem em ensaios de simulação em serviço de pisos maciços. De acordo com

a classificação proposta por Oliveira *et al.* (2019) os valores encontrados por Blanco-Flórez *et al.* (2015), com exceção do ensaio de atrito dinâmico que apresentou qualidade intermediária, classificam a madeira jovem de teca como de baixa qualidade para utilização em pisos.

3.4 Modificação térmica da madeira

Os tratamentos térmicos da madeira também são conhecidos como retificação térmica, termoretificação, tratamento com calor ou modificação térmica (Batista, 2019). Esse tratamento permite melhorar algumas propriedades da madeira, como a redução higroscopicidade e da umidade de equilíbrio da madeira (Giebeler, 1983), assim como minimizar a instabilidade dimensional e aumentar sua durabilidade natural (Hill, 2007). Isso ocorre principalmente pela degradação das hemiceluloses, ruptura dos grupos hidroxílicos livres da região amorfa da celulose e a reticulação dos polímeros que compõem a madeira (Weiland; Guyonnet, 2003).

Ainda, outra vantagem que a madeira tratada termicamente apresenta é a alteração na sua cor original. Essa alteração pode resultar na obtenção de coloração uniforme entre cerne e alburno (Lopes *et al.*, 2014), bem como no escurecimento de madeiras claras (Garcia *et al.*, 2014). Isso ocorre porque a madeira torna-se mais escura dependendo da temperatura, tempo e ambiente do tratamento. Outra característica importante é que esse tratamento é considerado ecologicamente sustentável, pois não necessita de aditivos químicos que degradam o meio ambiente (Korkut *et al.*, 2008).

A modificação térmica da madeira vem sendo muito estudada pois permite através da aplicação de calor melhorar a qualidade da madeira, alterar a estrutura química da sua parede celular (Hill, 2007). O processo pode ser realizado utilizando aquecimento controlado a temperaturas na faixa de 150°C a 240°C (Grinins *et al.*, 2016), em diferentes ambientes, tais como água, vapor de água, nitrogênio, óleo vegetal e metais derretidos (Batista, 2019).

Quando a madeira é submetida a elevadas temperaturas, ocorrem algumas transformações nos seus constituintes químicos, como a oxidação e decomposição dos extrativos, migração ou remoção de compostos extrativos para as superfícies da madeira, aumento relativo do teor de lignina devido à degradação das hemiceluloses, entre outros (Delucis *et al.*, 2014; Lengowski *et al.*, 2018). Essas transformações ocasionam mudanças favoráveis a diversas aplicações da madeira.

Gašparík *et al.* (2019) avaliaram o efeito do tratamento térmico (160°C, 180°C e 210°C), na cor e nas propriedades químicas da madeira de teca. Os autores observaram que o valor da coordenada L* diminuiu 46,1% em comparação com a da madeira não tratada. A coordenada vermelho-verde (a^*) não foi afetada pelo tratamento térmico, embora seu valor tenha diminuído ligeiramente com o aumento da temperatura. A coordenada amarelo-azul (b^*) também diminuiu com o aumento da temperatura do tratamento térmico. Houve ligeiro aumento dos valores das três coordenadas (L*, a^* e b^*) com o tratamento a 180°C. Os extrativos, a celulose e o teor percentual de lignina aumentaram com o aumento da temperatura do tratamento, enquanto o teor de hemiceluloses diminuiu em 67,7%, em comparação com a madeira não tratada.

Ao avaliar a modificação térmica da madeira de teca de curta rotação nas temperaturas 180°C, 200°C, e 220°C Martha *et al.* (2021a) observaram maior perda de massa e melhora na estabilidade dimensional, rugosidade e molhabilidade conforme o aumento da temperatura do tratamento. Os autores ainda observaram que o tratamento térmico ocasionou degradação da hemicelulose e aumento da α -celulose e do teor de lignina. Além de relatarem que os valores de Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) diminuíram após o tratamento.

Ao avaliar a molhabilidade superficial da madeira de cerne e alburno de teca tratada termicamente a 180°C e 200°C, Lopes, Garcia e Nascimento (2018) observaram que houve redução, principalmente no tratamento a 200°C, e que a madeira de cerne apresentou menor valor de molhabilidade que o alburno, mesmo após tratamento térmico.

O tratamento térmico pode ocasionar redução das propriedades mecânicas da madeira (Esteves; Pereira, 2009) e assim, comprometer sua utilização para fins estruturais, quando realizado em condições extremas de temperatura e tempo (Kačíková *et al.*, 2020). Avaliando a madeira de teca de 25 anos, Lengowski *et al.* (2021) verificaram que o tratamento térmico a 160°C proporcionou redução de 42,40% da umidade de equilíbrio, 30,50% da contração volumétrica, 43,70% da contração tangencial e 2,50% da anisotropia da madeira. Os autores não verificaram redução nos valores de MOE para flexão estática e na dureza radial entre a madeira tratada termicamente a *in natura*. No entanto, os autores também observaram redução de aproximadamente 50% nos valores de MOR, dureza longitudinal e tangencial da madeira tratada em relação à madeira sem tratamento. A redução da dureza resultante da modificação térmica pode ser atenuada pela densificação da madeira.

3.5 Densificação termomecânica da madeira

A densidade, devido à sua correlação positiva com a dureza, é uma importante propriedade para a escolha dos pisos de madeira. Além disso, é a característica mais utilizada para estimar as propriedades físicas e mecânicas da madeira, assim como sua qualidade tecnológica (Mania *et al.*, 2020). Dessa maneira, muitas tentativas têm sido realizadas para desenvolver um processo adequado para o aumentar a densidade da madeira e possivelmente melhorar a dureza desse material (Rautkari *et al.*, 2013). Dentre os mais diversos métodos utilizados com essa finalidade a densificação termomecânica é o método mais simples (Tenorio; Moya; Navarro-Mora, 2021).

A densificação termomecânica é um processo que causa modificação na microestrutura celular da madeira, por meio da utilização de calor e pressão (Kadivar *et al.*, 2020), através da redução dos espaços vazios das células de madeira, chamados lumes (Navi; Heger, 2004). Pode ser realizada em prensa quente através do controle das condições de prensagem e da umidade da madeira (Rautkari *et al.*, 2011). E tem como objetivo aumentar a densidade do material, por intermédio da redução seu volume (Kadivar *et al.*, 2020). A faixa de temperatura normalmente utilizada é entre 140°C e 240°C. O processo de densificação é influenciado por vários fatores, tais como temperatura, espécie, a orientação dos anéis anuais de crescimento, taxa de compactação e pós-tratamento (Namari *et al.*, 2021).

Durante o processo de densificação, a compressão excede o limite elástico da madeira podendo causar colapso das células e reorganização dos espaços vazios (Kadivar *et al.*, 2020). Esse processo permite modificar a madeira de espécies que apresentam baixa densidade a fim de torná-las análogas às espécies que possuem madeiras mais densas, e até mesmo com outros materiais (Kariz *et al.*, 2017), sendo um processo vantajoso para expandir o uso de tais espécies de madeira (Sandberg; Haller; Navi, 2013; Sadatnezhad *et al.*, 2017). Uma característica importante desse processo é que não utiliza aditivos químicos para aumentar a densidade da madeira e melhorar suas propriedades mecânicas (Korkut *et al.*, 2008).

É conhecido que a dureza tende a aumentar com o aumento da densidade superficial durante o processo de densificação termomecânica da madeira (Laine; Rautkari; Hughes, 2013) e para algumas aplicações como em pisos, onde se tem interesse em materiais com alta dureza, o processo de densificação pode trazer benefícios (Laine *et al.*, 2016), visto que é interessante aumentar a dureza, preservando a espessura do piso para resistir à flexão (Rautkari *et al.*, 2013).

Em aplicações em que é desejável manter a baixa densidade aparente da madeira, porém, melhorar as propriedades superficiais, a estratégia de aumentar a densidade da superfície da madeira com o intuito de aumentar a dureza superficial apresenta vantagens sobre a

modificação do material como um todo (Rautkari *et al.*, 2010). Além do mais, esse processo pode exigir menor consumo energético ao aumentar somente a densidade superficial da madeira, e reduzir a necessidade de revestimento de superfície no produto final (Laine; Rautkari; Hughes, 2013).

A densificação da madeira é um processo que requer temperaturas superiores à transição vítrea dos componentes da parede celular, permitindo que essas sejam comprimidas sem a ocorrência de rupturas (Laine *et al.*, 2013). Apesar da densificação termomecânica melhorar as propriedades mecânicas da madeira comprimida, essa compressão é instável, e a madeira pode recuperar sua forma original mesmo após grandes deformações, principalmente quando exposta em condições de alta umidade e temperatura (Navi; Heger, 2004; Sadatnezhad *et al.*, 2017). Esse fenômeno de retorno às dimensões iniciais é a principal desvantagem do processo de densificação.

Ao expor a madeira densificada a fontes de umidade, há dois tipos de inchamento, um reversível, devido à natureza higroscópica da madeira, e outro irreversível, resultado do parcial ou total retorno da madeira densificada às suas dimensões originais (Laine *et al.*, 2013). Quando esse retorno ocorre imediatamente após a abertura da prensa é conhecido como *spring back* e quando o retorno ocorre após a exposição da madeira a ambientes de alta umidade relativa ou de ciclos de imersão/secagem, é conhecido como *set recovery* (Rautkari *et al.*, 2010).

Srivaro *et al.* (2021) avaliaram a densificação termomecânica da madeira maciça de coqueiro de baixa e de média densidade, sob taxas de compactação de 25%, 40%, 55%, e 70%, com pressão de 19,6 MPa e temperatura de 140°C durante 15 min. A densificação permitiu melhorar a resistência à flexão, módulo de elasticidade, resistência à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras. Os autores observaram que a madeira de baixa densidade permitiu maior taxa de densificação sem distorção na forma do corpo de prova. A estabilidade dimensional diminuiu com o aumento da taxa de compactação independentemente da densidade original da madeira.

Ao avaliarem a densificação de madeira maciça de *Pinus sylvestris* L. em prensa aquecida por 60 min, Unsal e Candan (2008) observaram que ao aumentar a temperatura de 120°C a 150°C e/ou a pressão de 5 a 7 MPa, a dureza Janka e a densidade aumentaram. Pelit, Sönmez e Budakçi (2015) avaliaram o efeito da densificação termomecânica e pós-tratamento térmico nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, observaram que a densidade aumentou juntamente com o aumento da taxa de compactação e que a maior densidade foi observada para a densificação de menor temperatura. Em relação às propriedades mecânicas,

ocorreu aumento em função da taxa de densificação. Conforme o aumento da temperatura do pós-tratamento térmico a resistência mecânica da madeira diminuiu.

Pertuzzatti *et al.* (2018) ao avaliarem a densificação em *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, observaram que houve melhora na densidade e nas propriedades mecânicas para as duas espécies quando foram realizados tratamentos de densificação em temperatura de 150°C. No entanto, exposições de 60 min, foram preferidas para *P. elliottii*, enquanto para *E. grandis* o menor tempo de exposição, 30 min, obteve melhores resultados. Os autores também observaram que todos os processos com temperaturas mais altas ou períodos de exposição mais longos resultaram em densificação semelhante, mas com propriedades mecânicas reduzidas devido ao aumento da degradação química e estrutural. Também observaram que as madeiras densificadas apresentaram maiores valores de ângulo de contato aparentes em comparação ao tratamento controle, demonstrando aumento considerável da hidrofobicidade da madeira. Os autores concluíram que o processo de densificação, permite que essas espécies de madeira menos valiosas sejam usadas em aplicações como pisos e decks.

Em estudo realizado por Kariz *et al.* (2017), a madeira de *Picea abies* L. Karst foi tratada termicamente a 170°C, 190°C, 210°C e 230°C e posteriormente a superfície foi densificada a temperatura de 150°C, em três taxas de compactação. Os autores observaram maior *spring back* nas amostras submetidas ao tratamento térmico em temperaturas mais elevadas e menores valores de *spring back* com decréscimo da temperatura do tratamento térmico. O maior *set recovery* foi observado nas amostras não tratadas termicamente, e os menores conforme o decréscimo da temperatura do tratamento térmico. Também observaram que a densificação da superfície aumentou a dureza e a resistência à flexão da madeira. Além disso, a densificação superficial aumentou a densidade da madeira nos primeiros milímetros abaixo da superfície.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas 18 árvores de *Tectona grandis* L.f. da região central de um plantio florestal. Essas árvores possuíam 15 anos de idade, com diâmetro à altura do peito (DAP) variando de 32 a 38 cm. O plantio estava localizado na região de Cáceres, Centro-Sul do estado de Mato Grosso (Brasil), pertencente à empresa Teak Resources Company (TRC). A região encontra-se a uma altitude de 123 metros em relação ao nível do mar. Segundo Köppen e Geiger o clima é classificado como Aw e possui temperatura média de 27°C, com precipitação anual de 1377 mm, com período seco entre os meses de maio a setembro (ZEPNER *et al.*, 2020).

Inicialmente, o espaçamento adotado no plantio foi de 3 x 3 m (1111 árvores ha⁻¹). Durante o ciclo de rotação o plantio foi submetido a quatro processos de desbaste seletivo: i) aos quatro anos com intensidade 50% e densidade pós desbaste de 555 árvores ha⁻¹; ii) aos seis anos com intensidade de 40% e densidade pós desbaste 333 árvores ha⁻¹; iii) aos 10 anos com intensidade de desbaste de 30% e densidade pós desbaste de 233 árvores ha⁻¹; iv) aos 15 anos de idade com intensidade de desbaste de 30% e densidade pós desbaste de 160 árvores ha⁻¹. Também foram realizadas ao longo desses anos, cinco desramas.

A madeira utilizada nesse estudo foi a proveniente do último desbaste. De cada árvore, selecionou-se a primeira tora comercial, de 2,0 m de comprimento. As toras foram desdobradas e posteriormente secas ao ar livre. Foram produzidas tábuas com dimensões de 1000 x 150 x 30 mm (comprimento x largura x espessura) e caibros com dimensões de 1000 x 50 x 50 mm (comprimento x largura x espessura). O material serrado não apresentava defeitos como rachaduras e nós e, em sua maioria, possuía maior proporção de madeira de cerne.

4.1 Preparo e densificação termomecânica dos corpos de prova

O preparo dos corpos de prova e os ensaios de densificação termomecânica foram realizados, respectivamente, no Laboratório de Usinagem da Madeira e na Unidade Experimental de Painéis de Madeira, ambos alocados na Universidade Federal de Lavras.

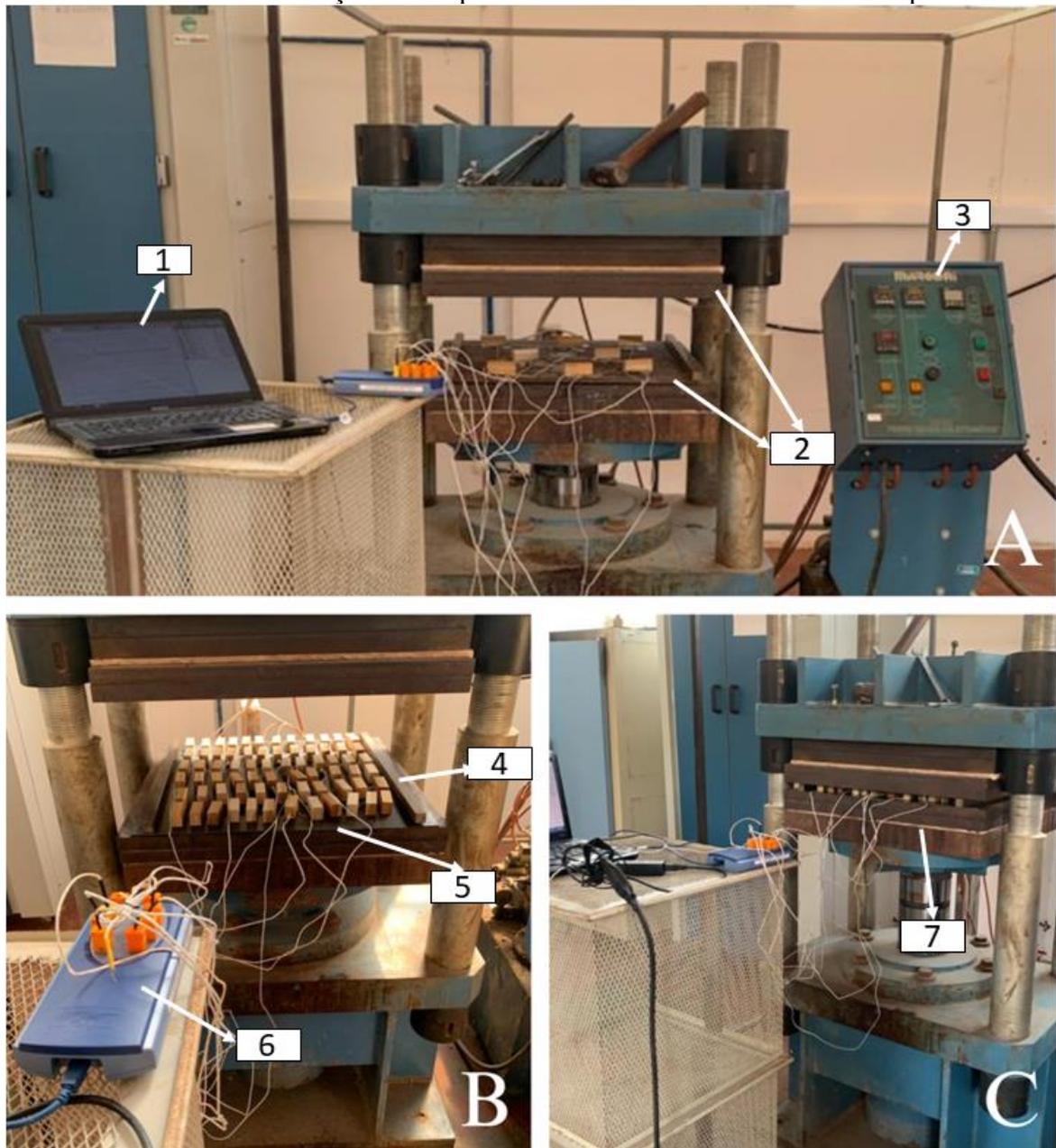
A partir das tábuas, foram confeccionados corpos de prova de diferentes dimensões conforme os ensaios realizados. Para os ensaios de taxa de densificação, colorimetria, rugosidade, densidade aparente e ensaios de simulação de pisos em serviço os corpos de prova foram produzidos nas dimensões de 240 x 120 mm (comprimento x largura). Para a perda de massa, *spring back*, umidade de equilíbrio da madeira, absorção de água, inchamento em

espessura, *set recovery*, dureza Janka, ângulo de contato, molhabilidade, FTIR e densitometria de raios-X foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 60 x 20 mm (comprimento x largura). A espessura dos corpos de prova variou conforme a taxa de densificação alvo aplicada e testemunha (*in natura*). Para obter as taxas de densificação alvo 36,7%, 24% e testemunha os corpos de prova foram confeccionados nas espessuras de 30 mm, 25 mm e 19 mm, respectivamente. Os corpos de prova com espessuras de 30 mm e 25 mm após a aplicação da densificação termomecânica da madeira tiveram como espessura alvo 19 mm.

Posteriormente à confecção, todos os corpos de provas foram acondicionados em câmara climática com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$, até a estabilização de sua massa.

Após a massa estabilizada, foram realizados os tratamentos de densificação termomecânica da madeira em sistema aberto, em que há contato com o oxigênio. Para isso, foi utilizada a prensa termo-hidráulica automática de modelo MA98 – Marconi (Piracicaba, Brasil) com carga e temperatura máxima de, respectivamente, 300 toneladas e 300°C , equipada por dois pratos aquecidos por resistência elétrica. Com o auxílio de um termopar tipo K, acoplado ao termostato foi possível acompanhar a temperatura interna de oito corpos de prova por tratamento durante a densificação termomecânica da madeira (FIGURA 1). Para isso foi realizado um furo de, aproximadamente, 3 mm de diâmetro e 30 mm de profundidade na metade da espessura do corpo de prova, onde o sensor do termopar foi inserido. As medidas de temperatura foram coletadas com o auxílio do software Data Logger PicoLog 6, conectado ao microcomputador, com leituras a cada 30 segundos.

Figura 1 - Prensa termo-hidráulica para realização dos ensaios de densificação termomecânica da madeira e medição da temperatura interna da madeira com termopar.



Legenda: A - Prensa termo-hidráulica aberta com corpos de prova acoplados ao termopar tipo K e microcomputador. B - Visão ampliada da madeira conectada ao termopar e espaçadores metálicos de espessura. C - Prensa termo-hidráulica após fechamento para densificação termomecânica da madeira. 1 - Microcomputador com software Logger PicoLog 6; 2 - Pratos aquecidos da prensa termo hidráulica abertos. 3 - Setup da prensa termo-hidráulica; 4 - Espaçador metálico de 19 mm; 5 - Corpos de prova acoplados ao termopar tipo K; 6 - Data Logger; 7 - Prensa termo-hidráulica fechada para início do processo de densificação termomecânica da madeira

Fonte: Da autora (2023).

A densificação termomecânica foi realizada no sentido perpendicular às fibras, na direção da espessura do corpo de prova. Foram avaliados a testemunha (madeira *in natura*) e

quatro tipos de densificação termomecânica, conforme descritos na Tabela 1. Para os tratamentos densificados termomecanicamente, as variáveis avaliadas temperaturas, de 150°C e de 170°C, e taxas de densificação de 24 e 36,7%, foram definidas inicialmente em pré-testes realizados no material. A espessura alvo de 19 mm foi controlada por espaçadores metálicos.

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos de densificação termomecânica da madeira.

Variáveis	Tratamentos				
	Testemunha	T150-1	T150-2	T170-1	T170-2
Temperatura (°C)	Ambiente	150	150	170	170
Taxa de densificação alvo (%)	-	24	36,7	24	36,7

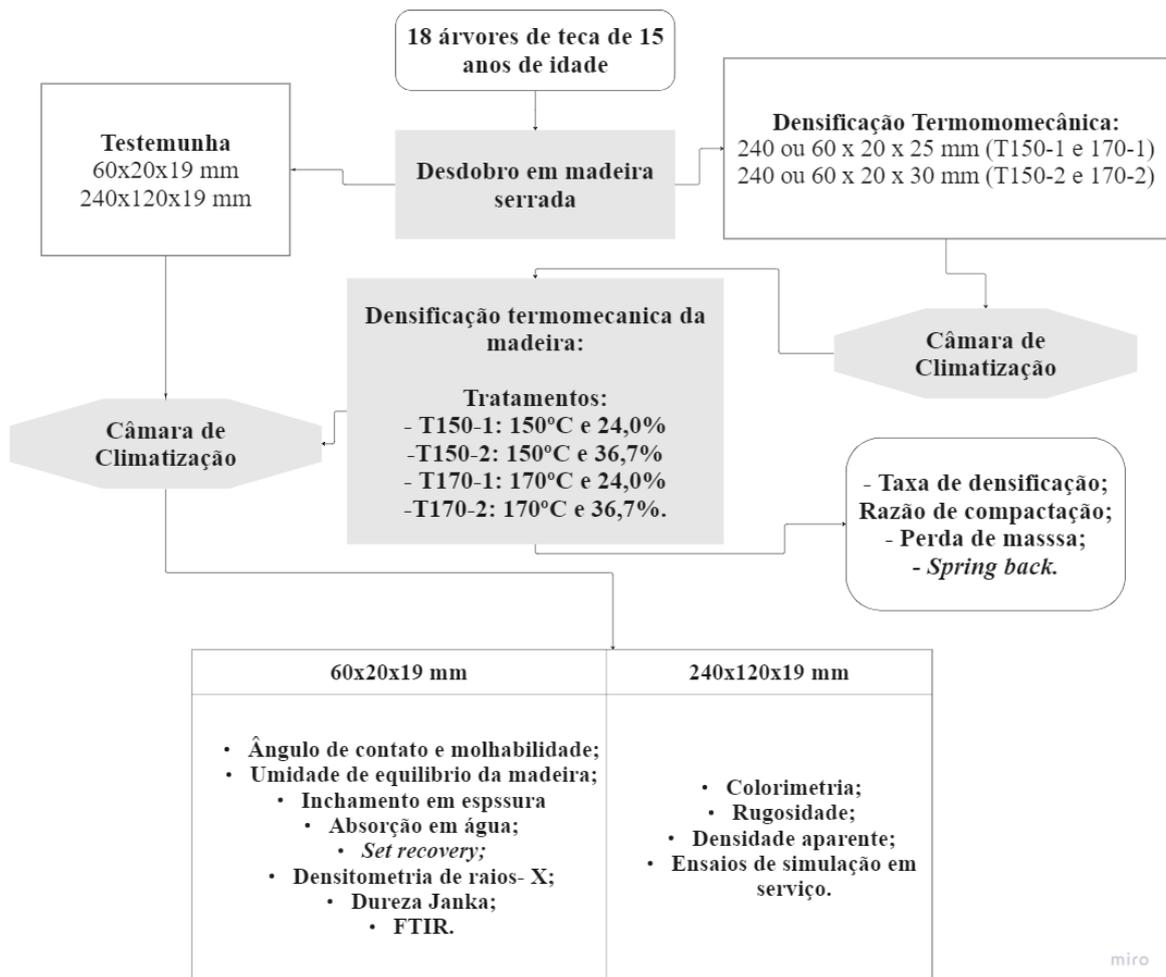
Fonte: Da autora (2023).

A metodologia utilizada durante a densificação termomecânica da madeira foi semelhante à de Carvalho *et al.* (2021).

Após os pratos da prensa atingirem a temperatura determinada, de 150°C ou de 170°C, a madeira foi introduzida entre eles e a prensa foi fechada. A pressão exercida pela prensa na madeira foi de $5,3 \pm 0,03$ MPa. Com a condição almejada de temperatura e pressão alcançada, a prensa permaneceu ligada por 30 minutos. Após esse período, as resistências dos pratos da prensa foram desligadas e a pressão foi reduzida com rampa de declínio de $0,5 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$, até alcançar 0,5 MPa, que permaneceu até a temperatura dos pratos da prensa atingir $75 \pm 2^\circ\text{C}$. Essa etapa final atuou como pós-tratamento, aliviando a pressão de vapor e liberação das tensões internas presentes no material.

Para a avaliação do processo de densificação termomecânica da madeira foram realizadas medições da massa e das dimensões dos corpos de prova antes e imediatamente após a densificação, por meio de balança digital com precisão de 0,01 g e paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, respectivamente. Em seguida, o material foi novamente acondicionado em câmara climática ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa do ar) até a estabilização de sua massa e realizadas medições da massa e das dimensões dos corpos de prova para posteriormente avaliar os demais ensaios e as propriedades da madeira densificada termomecanicamente.

Figura 2- Fluxograma com resumo da metodologia e procedimentos realizados na pesquisa.



Fonte: Da autora (2023).

4.2 Parâmetros do processo de densificação termomecânica da madeira

O processo de densificação termomecânica foi avaliado somente para as madeiras de teca densificadas termomecanicamente. Foram avaliadas a razão de compactação, a perda de massa e o *Spring back*. Esses foram analisados imediatamente após a madeira ser retirada da prensa termo-hidráulica. Para avaliação da taxa de densificação, razão de compactação e perda de massa (PM) e) foram utilizados 20 corpos de prova para cada tratamento. Já para a avaliação do *Spring back* (Sb) foram utilizados 10 corpos de prova por tratamento.

A razão de compactação (RC) e a perda de massa (PM) foram calculadas conforme as Equações 1 e 2 respectivamente:

$$RC = \frac{\rho_f}{\rho_i} \quad (1)$$

Em que:

RC= Razão de compactação;

ρ_i = Densidade inicial antes da densificação (g/cm³);

ρ_f = Densidade final após densificação (g/cm³).

$$PM = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} * 100 \quad (2)$$

Em que:

PM = perda de massa após o tratamento (%);

M_i = massa antes da densificação na condição de equilíbrio (20±2°C de temperatura e 65±5% de umidade relativa do ar) (g);

M_f = massa imediatamente após densificação (g).

O *Spring back* foi calculado conforme a Equação 3 (KARIZ *et al.*, 2017) e representa o quanto o corpo de prova retornou da espessura desejada à espessura obtida, após retirada da prensa termo-hidráulica.

$$Sb(\%) = \frac{E_f - E_a}{E_i - E_a} * 100 \quad (3)$$

Em que:

S_b = *Spring back*

E_f = Espessura obtida após densificação (mm);

E_a = Espessura alvo da densificação (mm);

E_i = Espessura inicial antes da densificação na condição de equilíbrio (20±2°C de temperatura e 65±5% de umidade relativa do ar) (mm).

4.3 Espectroscopia de infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Para a avaliação da influência da densificação termomecânica na degradação e alteração dos constituintes químicos da madeira de teca utilizou-se a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). As alterações na estrutura dos constituintes químicos da madeira foram avaliadas através das alterações da absorbância das bandas espectrais, identificando grupos funcionais adicionados ou removidos com a aplicação da densificação

termomecânica em relação à madeira *in natura*. Para esse ensaio foi utilizado um corpo de prova por tratamento.

Os corpos de prova densificados termomecanicamente foram seccionados com auxílio de um formão em dois grupos: 1) material moído das faces em contato com os pratos da prensa termo-hidráulica (5 mm de espessura de cada face); 2) material moído da camada interna do corpo de prova, que não entrou em contato direto com a prensa termo-hidráulica (10 mm de espessura). Esses grupos e a testemunha foram moídos em moinho de martelo e posteriormente em moinho de facas, individualmente. Em seguida, as serragens foram classificadas entre as peneiras de 40 e 60 mesh. As frações retidas na peneira de 60 mesh foram utilizadas para a análise.

As análises por FTIR foram realizadas num espectrofotômetro Shimadzu IRAffinity-1 de modelo IRAffinity-1. O espectro infravermelho foi obtido usando o método de Reflectância Total Atenuada (ATR), acessório modelo AC-2098. O suporte do sistema foi devidamente limpo com álcool isopropílico para evitar possíveis contaminações. Após, foi realizada a aquisição do background. Posteriormente, a amostra foi colocada diretamente no suporte ATR observando o limite máximo de 1 mg de amostra sólida.

Após procedimento de preparo da amostra, realizou-se a aquisição dos espectros de FTIR usando o software IRSolution (Versão: 1.50). O material proveniente dos corpos de prova foram escaneados na faixa espectral de 550 a 4.000 cm^{-1} , com 50 varreduras e resolução de 4 cm^{-1} . Foi utilizada a medida de transmitância, apodização do tipo Happ_Genzel e gain (1).

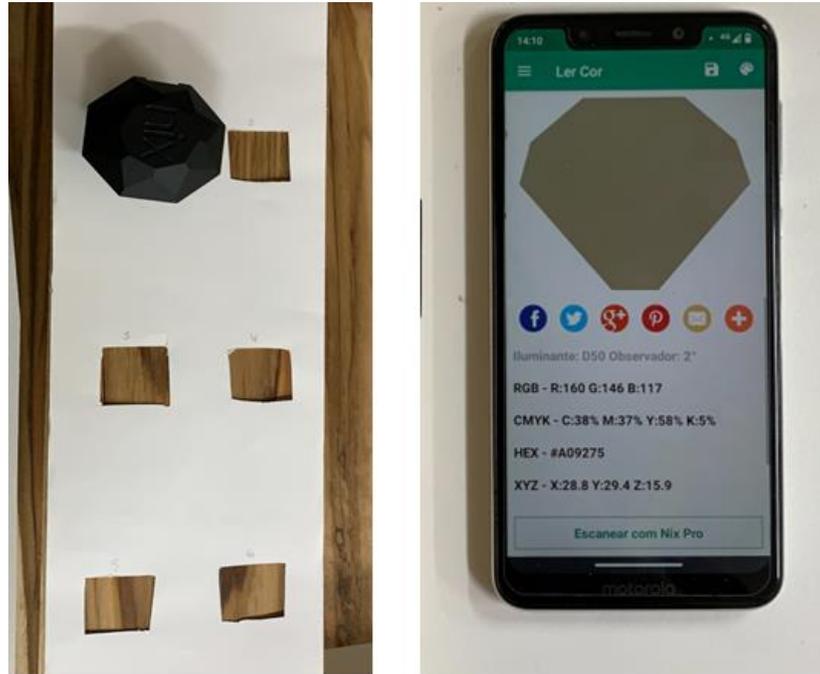
4.4 Qualidade da superfície da madeira

4.4.1 Colorimetria

Para a análise da colorimetria foram utilizados 28 corpos de prova por tratamento. As leituras foram realizadas nas faces em contato direto com os pratos da prensa termo-hidráulica.

Para realizar leituras antes e após os tratamentos de densificação termomecânica nos mesmos pontos de medição foi utilizado um gabarito em posições pré-determinadas, com seis recortes de 4 cm^2 sob o corpo de prova, conforme Figura 3. Assim, foram coletadas duas leituras a 25%, 50% e 75% do comprimento corpo de prova de 240 mm.

Figura 3 - Corpo de prova sob o gabarito para coleta dos valores de colorimetria CIElab por meio do colorímetro Nix Pro Color Sensor e aplicativo NIX Pro.



Fonte: Da autora (2023).

Foi utilizado o colorímetro Nix Sensor – Nix Pro Color Sensor (Hamilton, Canadá), com fonte iluminadora possuindo 2 LEDs de alto CRI projetados especificamente para reprodução de cores, iluminante D50 e ângulo de 2°, em temperatura ambiente. O colorímetro foi utilizado juntamente com o aplicativo NIX Pro, em que os valores de cor CIElab foram armazenados (FIGURA 2). Foram obtidos os parâmetros colorimétricos L (luminosidade), a^* (coordenada cromática verde-vermelho) e b^* (coordenada cromática azul-amarelo), C^* (saturação) e h° (ângulo de tinta) baseados no sistema CIElab (Comissão International de L'Eclairage). A variação total de cor (ΔE^*) foi calculada seguindo a norma ASTM D2244-23 por meio da Equação 4 e classificada de acordo com Hikita *et al.* (2001) por meio da Tabela 2.

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

Em que:

ΔE^* = variação total da cor;

ΔL = variação da luminosidade entre o corpo de prova densificado termomecanicamente e *in natura*;

Δa e Δb = variação das coordenadas cromáticas entre o corpo de prova densificado termomecanicamente e *in natura*.

Tabela 2 - Classificação da variação total da cor (ΔE^*) de madeiras.

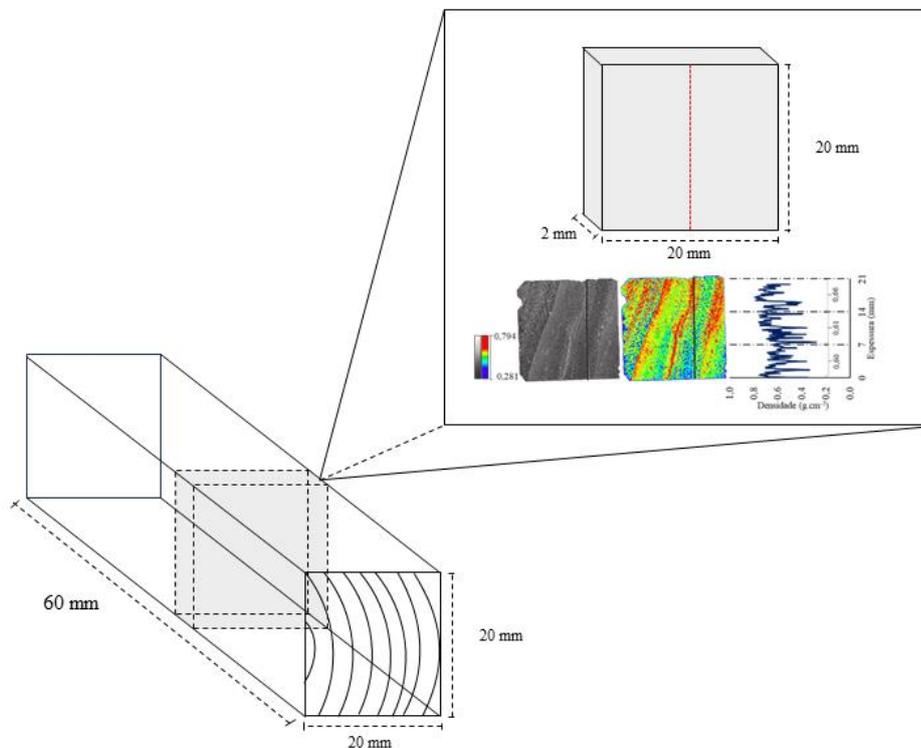
Varição da cor (ΔE^*)	Classificação
0,0 – 0,5	Desprezível
0,5 – 1,5	Ligeiramente perceptível
1,5 – 3,0	Notável
3,0 – 6,0	Apreciável
6,0 – 12,0	Muito apreciável

Fonte: Hikita *et al.* (2001).

4.4.2 Densitometria de raios-X

O perfil da densidade da madeira de teca *in natura* e densificada termomecanicamente foi determinado usando a densitometria de raios-X. Para cada tratamento e testemunha foram avaliados três corpos de prova com dimensões iniciais de 20 x 20 x 60 mm. Posteriormente, as amostras foram cortadas utilizando uma serra circular dupla paralela, resultando em dimensões finais de 20 x 20 x 2 mm (FIGURA 4).

Figura 4 – Esquema de redimensionamento e confecção do corpo de prova para a análise de densitometria de raios-x.



Fonte: Da autora (2023).

As amostras foram levadas a uma sala climatizada (20°C e 65% de umidade relativa do ar) até estabilização da massa. A seguir, eles foram alocados no compartimento protegido do equipamento de raios-X digital Faxitron LX-60, juntamente com uma escala de calibração de acetato de celulose, para leituras automáticas (26 kV, 19 s).

Os perfis de densidade aparente foram obtidos com imagens digitais em escala de cinza, analisadas no software ImageJ. Esse procedimento permitiu determinar valores de densidade aparente, a cada 50 µm. Esses valores de densidade, posteriormente, foram transferidos para planilha digital e confeccionados gráficos com o perfil de densidade aparente em função da espessura do corpo de prova inicial (20 mm). A seguir, as imagens em escala cinza foram convertidas para escala Rainbow, no software Adobe Photoshop®, que possui a cor azul representando áreas de menor densidade e o vermelho indicando áreas de maior densidade.

4.4.3 Rugosidade

Para avaliar a rugosidade foram utilizados 15 corpos de prova por tratamento. As leituras foram realizadas na face dos corpos de prova em contato direto com os pratos da prensa termo-hidráulica e nos corpos de prova *in natura*. Para realizar leituras foi utilizado gabarito em posições pré-determinadas, com seis marcações, com dimensões de 2 x 2 mm, sob o corpo de prova, conforme Figura 5. Assim, foram coletadas duas leituras na direção tangencial a 25%, 50% e 75% do comprimento do corpo de prova de 240 mm.

Figura 5 - Coleta dos parâmetros de rugosidade por meio do Rugosímetro Surtronic 3+.



Fonte: Da autora (2023).

A qualidade da superfície dos pisos densificados termomecanicamente e testemunha foram avaliadas por meio dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rz e Rt (rugosidade média, quadrática, de profundidade média e total, respectivamente), de acordo com a norma NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), obtidos pelo rugosímetro de arraste Taylor Hobson - Surtronic 3+ (Leicester, Reino Unido), como visualizado na Figura 5.

O parâmetro Ra representa a média aritmética dos desvios dos perfis em relação à linha média. O parâmetro Rq representa a raiz quadrada da média da soma dos quadrados dos valores de Ra. O parâmetro Rt corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento total de avaliação. O parâmetro Rz é a média de todos os valores de Rt, entre todas as partes mensuradas da superfície.

As leituras foram efetuadas com deslocamento da agulha do rugosímetro na direção paralela às fibras, com “*cut-off*” 0,80 mm utilizando o filtro gaussiano, comprimento da medição de 4,0 mm e amplitude de 100 μm .

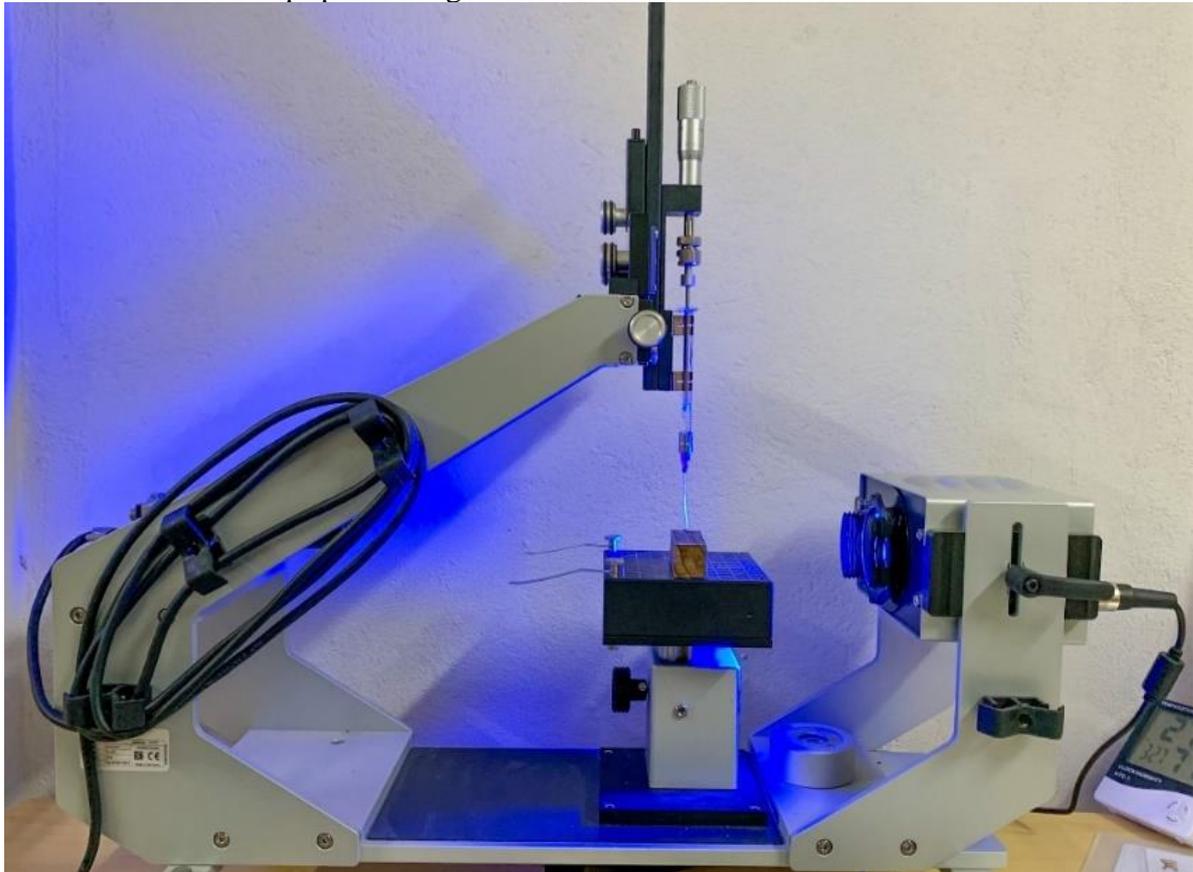
4.4.4 Ângulo de contato e molhabilidade

Para verificar quão hidrofóbica tornou-se a superfície da madeira foi realizada as análises de ângulo de contato e molhabilidade da madeira de teca densificada termomecanicamente e testemunha por meio do goniômetro Kruss DSA10 (Hamburgo, Alemanha), conforme visualizado na Figura 6.

Foram coletadas leituras do ângulo de contato e molhabilidade em cinco corpos de prova por tratamento. As leituras foram realizadas em triplicata em regiões distintas do corpo de prova.

Para ambas as análises aplicou-se uma gota d'água deionizada na superfície da madeira. Em seguida, capturou-se a imagem da gota por meio de câmera e sistema de análise de imagem, *Advance Software* (Hamburgo, Alemanha). Posteriormente, foi determinado o ângulo de contato médio entre a gota e a superfície da madeira à temperatura ambiente (25°C). Os valores dos ângulos formados foram obtidos em ambos os lados da gota e calculados no período de 60 segundos. Para o ângulo de contato com a água, foi calculada a média dos ângulos no primeiro segundo de contato entre a gota e o corpo de prova. Para o cálculo de molhabilidade, foi considerado o valor do ângulo de contato médio em 5 e 60 segundos, conforme o método da ASTM D724-99 (ASTM, 2003), de acordo com a Equação 5:

Figura 6 - Coleta dos valores de ângulo de contato e molhabilidade da madeira de teca por meio do equipamento goniômetro.



Fonte: Da autora (2023).

$$\text{Molhabilidade} \left(\frac{^\circ}{s} \right) = \frac{A-a}{55} \quad (5)$$

Em que:

A = valor médio do ângulo de contato em 5 segundos;

a = valor médio do ângulo de contato em 60 segundos;

55 = tempo, em segundos, entre uma medição e outra.

4.5 Ensaio Físicos

Para avaliação da densidade aparente na umidade de equilíbrio da madeira (pap) foram utilizados 20 corpos de prova por tratamento. Para umidade de equilíbrio da madeira (UEM), absorção em água (AA), inchamento em espessura (IE) e *Set recovery* foram utilizados 9 corpos de prova por tratamento.

Foi determinada a densidade aparente na umidade de equilíbrio da madeira antes e após os tratamentos de densificação termomecânica. Para isso, foram utilizados corpos de prova na condição de equilíbrio ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de umidade relativa do ar). A norma utilizada para a determinação desta propriedade foi a ASTM D 2395-14 (ASTM, 2014), calculada conforme Equação 6.

$$\rho_{\text{ap}} (\%) = \frac{M_e}{V_e} \times 100 \quad (6)$$

Em que:

ρ_{ap} = densidade aparente na umidade em equilíbrio da madeira ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$);

M_e = massa do corpo de prova em equilíbrio ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de umidade relativa do ar) (g);

V_e = volume do corpo de prova em equilíbrio ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de umidade relativa do ar) (cm^{-3}).

A densidade aparente da madeira foi classificada (TABELA 3) de acordo com Csanády, Magoss e Tolvaj (2015).

Tabela 3 - Classificação da densidade da madeira.

Classificação	Densidade aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
Muito leve	0,200 – 0,300
Leve	Menor que 0,500
Moderada	0,500 a 0,750
Pesada	0,750 a 1,000
Muito Pesada	Maior que 1,000

Fonte: Csanády, Magoss e Tolvaj (2015).

Para determinar a umidade de equilíbrio da madeira os corpos de prova climatizados ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de umidade relativa do ar) foram levados à estufa de secagem com circulação forçada à temperatura de $103\pm 2^\circ\text{C}$, para a secagem da madeira a 0% de umidade. Posteriormente, foi determinada a massa seca, com auxílio de uma balança digital com precisão de 0,01 g. A UEM foi calculada conforme Equação 7.

$$\text{UEM}(\%) = \frac{(M_e - M_{0\%})}{M_{0\%}} \times 100 \quad (7)$$

Em que:

UEM = umidade de equilíbrio da madeira (%);

Me = massa do corpo de prova em equilíbrio ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de umidade relativa do ar) (g)

M_{0%} = massa do corpo-de-prova a 0% de umidade (g);

A Absorção em água em 2h, 24h, 48h e 72h e o IE em 2h, 24h, 48h e 72h, foi avaliada de acordo com a norma ASTM D 1037 (ASTM, 2020) e Equações 8 e 9.

$$AA(\%) = \frac{(M-M_0)}{M_0} \times 100 \quad (8)$$

Em que:

AA = Absorção em água após 2, 24, 48 e 72 horas de imersão em água (%);

M = Massa após 2, 24, 48 e 72 horas de imersão em água (g);

M₀ = Massa inicial do corpo de prova antes da imersão, em equilíbrio ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de umidade relativa do ar) (g)

$$IE(\%) = \frac{(E-E_0)}{E_0} \times 100 \quad (9)$$

Em que:

IE = inchamento em espessura após 2, 24, 48 e 72 horas de imersão em água (%);

E = espessura após 2, 24, 48 e 72 horas de imersão em água (mm);

E₀ = espessura inicial do corpo de prova antes da imersão, em equilíbrio ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de umidade relativa do ar) (mm).

O *Set recovery* (SR) foi calculado conforme Equação 10 (Kariz *et al.*, 2017; Laine *et al.*, 2016).

$$SR(\%) = \frac{(E-E_f)}{E_i-E_f} \times 100 \quad (10)$$

Em que:

SR = *Set recovery* (%);

E = espessura após 24 horas de imersão em água e secagem em estufa (mm);

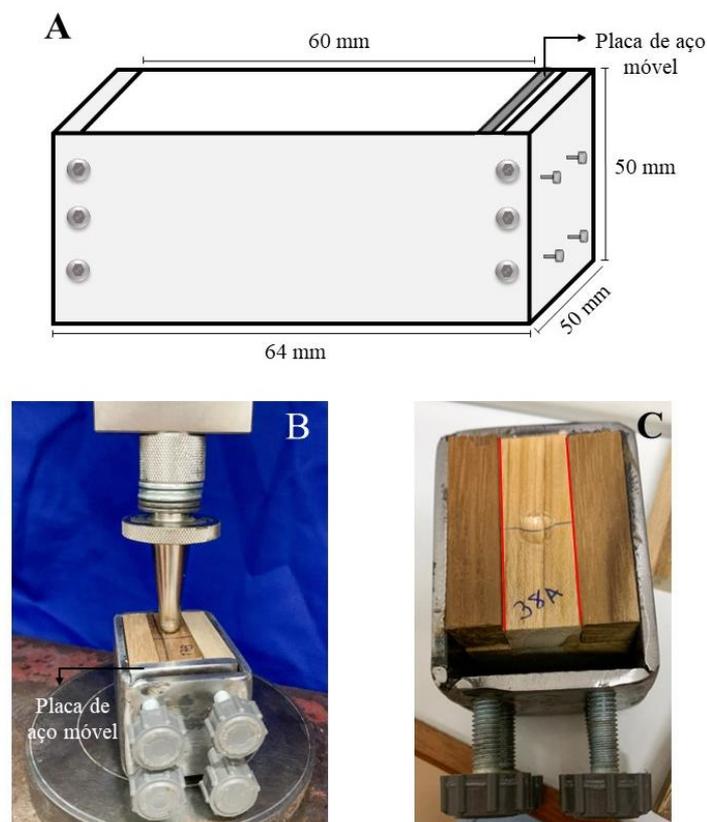
E_f = espessura obtida após densificação (mm);

E_i = espessura inicial do corpo de prova antes da densificação, em equilíbrio ($20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de umidade relativa do ar) (mm).

4.6 Dureza Janka

O teste de dureza Janka foi realizado conforme a norma British Standard BS 373:1957 (British Standard, 1957) em Máquina Universal de Ensaios EMIC- DL 30000 (São José dos Pinhais, Brasil) com capacidade de 30 toneladas e célula de carga de duas toneladas. Para cada tratamento foram avaliados 20 corpos de prova. Para esse ensaio escolheu-se a face radial dos corpos de prova, devido à menor influência dos lenhos inicial e tardio.

Figura 7 - Ensaio de dureza Janka com corpos de prova alocado do aparato de aço.



(A) Esquema do aparato de aço; (B) Ensaio de dureza Janka com corpo de prova acondicionado no aparato de aço; (C) Corpo de prova destacado entre linhas vermelhas após ensaio de dureza Janka em aparato de aço com a placa móvel retirada.

Fonte: Da autora (2023).

Para a utilização dos corpos de prova nas dimensões de 20 x 20 x 60 mm a norma indica apoiá-los sob outras peças de madeira para completar a dimensão de 50 x 50 x 60 mm (espessura x largura x comprimento). Assim, foi confeccionado um aparato de aço com as dimensões internas de 50 x 50 x 60 mm (espessura x largura x comprimento) para a acomodação dos corpos de prova utilizados (FIGURA 7).

A dureza Janka foi classificada conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação da dureza Janka.

Classificação	Dureza (kgf/cm ²)	Dureza (MPa)
Baixa	< 364	< 35,70
Média	364 a 802	35,70 a 78,65
Alta	> 802	> 78,65

Fonte: Andrade e Jankowsky (2015)

4.7 Ensaios de simulação de pisos em serviço

Foram realizados ensaios de simulação de pisos em serviço para a madeira de teca densificada termomecanicamente e testemunha. Utilizaram-se 21 corpos de prova por tratamento para os ensaios de endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas e arraste de carga rolante; 36 para o ensaio da esfera de aço cadente e 10 para os ensaios de atrito estático e dinâmico. As máquinas utilizadas para estes ensaios estão localizadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA). Os ensaios foram realizados de acordo a norma da ASTM D2394-17 (ASTM, 2017). Os corpos de prova tinham dimensões de 240 x 90 x 19 mm.

Os pisos foram classificados em classes de qualidade conforme classes de qualidade estabelecidas por Oliveira *et al.* (2019a) e Tabela 5.

Tabela 5 - Classes de qualidade para os ensaios de simulação em serviço de pisos de madeira maciça.

Ensaio	Classe de qualidade dos pisos		
	Alta	Intermediária	Baixa
Atrito estático e dinâmico (mm)	> 0,181	0,161 a 0,180	< 0,161
Endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas (mm)	< 0,005	0,006 a 0,030	> 0,031
Resistência à carga rolante (mm)	< 0,120	0,121 a 0,300	> 0,301
Esfera de aço cadente	< 0,180	0,181 a 0,300	> 0,301

Fonte: Oliveira *et al.* (2019a)

4.7.1 Ensaio de impacto da esfera de aço cadente

O equipamento utilizado para o ensaio de impacto da esfera de aço cadente é constituído por uma torre de 180 cm com 12 subdivisões ao longo da sua altura, um eletroímã acoplado a uma plataforma móvel que se deslocava verticalmente nas subdivisões de altura, uma unidade de impacto constituída por uma esfera de aço e uma base plana fixa para o apoio do corpo de prova suportar a queda da esfera, conforme visualizado na Figura 8a.

A esfera de aço, de 51 mm de diâmetro e massa de 535 g, foi fixada ao eletroímã, e posteriormente liberada em queda livre pela desativação do eletroímã. O ensaio consiste na liberação da esfera de aço em 12 diferentes alturas (15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 cm) em corpo de prova apoiado na base fixa. Uma folha de carbono foi alocada sobre o corpo de prova com o objetivo de realçar a área de impacto da esfera (endentação), para facilitar a visualização durante a medição da depressão, conforme recomendação da norma ASTM D 2394-17 (ASTM, 2017).

Foram utilizados 36 corpos de prova por tratamento, sendo três para cada altura. Em cada corpo de prova foram realizadas três repetições de impacto na mesma altura de queda, totalizando 108 repetições por tratamento.

Para realizar as medições das endentações foram realizadas cinco leituras, sendo quatro externamente e uma internamente à endentação, com auxílio do relógio comparador (0,01 mm), conforme Figura 8b.

A endentação média foi determinada conforme a Equação 11.

$$E = Le - Li \quad (11)$$

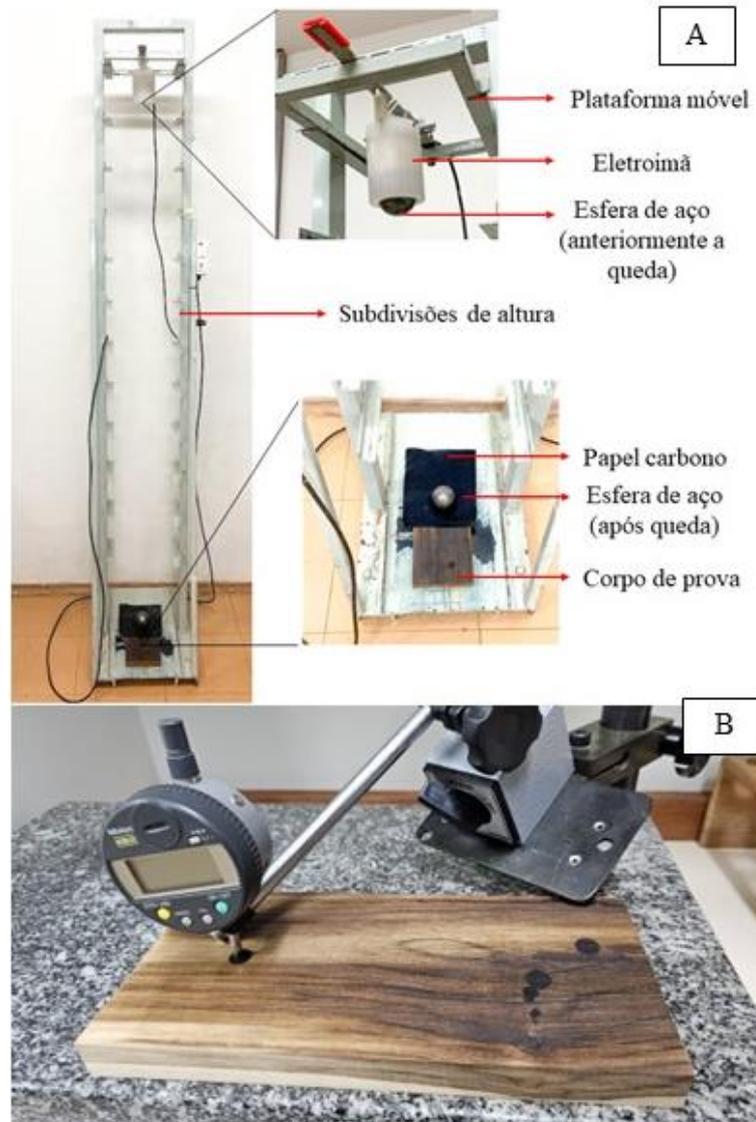
em que:

E = depressão causada pelo impacto da esfera de aço cadente (mm);

Le = média aritmética das leituras externas (mm); e

Li = leitura interna no ponto central da depressão (mm).

Figura 8 – (A) Equipamento utilizado no ensaio de impacto da esfera de aço cadente e (B) medição dos valores das endentações com relógio comparador.



Fonte: Da autora (2023).

4.7.2 Ensaio de endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas

O equipamento utilizado para este ensaio possui uma base de ferro e um rolo móvel dentado de 235 x 150 mm (comprimento x diâmetro), conforme Figura 9a. O rolo móvel possui 225 dentes de aproximadamente 5 mm de diâmetro, distribuídos uniformemente de modo a ter nove dentes simultaneamente apoiados sobre o corpo de prova, os quais exerceram carga distribuída de 890 N. A carga foi movimentada por motor elétrico à velocidade de deslocamento de $0,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Figura 9 - (A) Equipamento utilizado no ensaio de endentação de cargas aplicadas em pequenas áreas e (B) medição dos valores de endentações com relógio comparador.



Fonte: Da autora (2023).

As medições das depressões foram realizadas após 100 viagens do rolo dentado sob a superfície dos corpos de prova. O ensaio consiste na avaliação da depressão causada na madeira pela endentação. Foi medida a profundidade de três endentações centrais por corpo de prova. Para as medições das endentações foram realizadas cinco leituras, sendo quatro externamente e uma internamente à endentação, com o auxílio do relógio comparador (0,01 mm), conforme Figura 9b.

A endentação média foi determinada conforme a Equação 12.

$$E = Le - Li \quad (12)$$

em que

E = depressão causada pelo impacto da esfera de aço cadente (mm);

Le = média aritmética das leituras externas (mm); e

Li = leitura interna no ponto central da depressão (mm).

4.7.3 Ensaio de carga rolante

A máquina de ensaio possui base de ferro de 1750 x 400 mm, conforme visualizado na Figura 10a. Os corpos de prova foram alocados nessa base com ângulo de 45° entre o eixo axial da madeira e o sentido de deslocamento da carga. A máquina possui uma célula de carga de 890 N que transfere a força para o corpo de prova, com auxílio de uma roldana móvel. A velocidade de deslocamento da carga é de 0,06 m.s⁻¹, controlada por motor elétrico. A intensidade da depressão gerada pela passagem da carga foi medida após os intervalos de 10, 25 e 50 viagens.

Figura 10 – (A) Equipamento utilizado no ensaio de carga rolante e (B) medição dos valores de endentações com relógio comparador.



Fonte: Da autora (2023).

Para realizar as medições das endentações foram realizadas nove medições na região central da depressão, sendo três leituras internas e seis externas, com auxílio de um relógio comparador (0,01 mm), conforme observado na Figura 10b.

A depressão média foi determinada pela equação 13.

$$E = Le - Li \quad (13)$$

em que

E = depressão causada pelo impacto da esfera de aço cadente (mm);

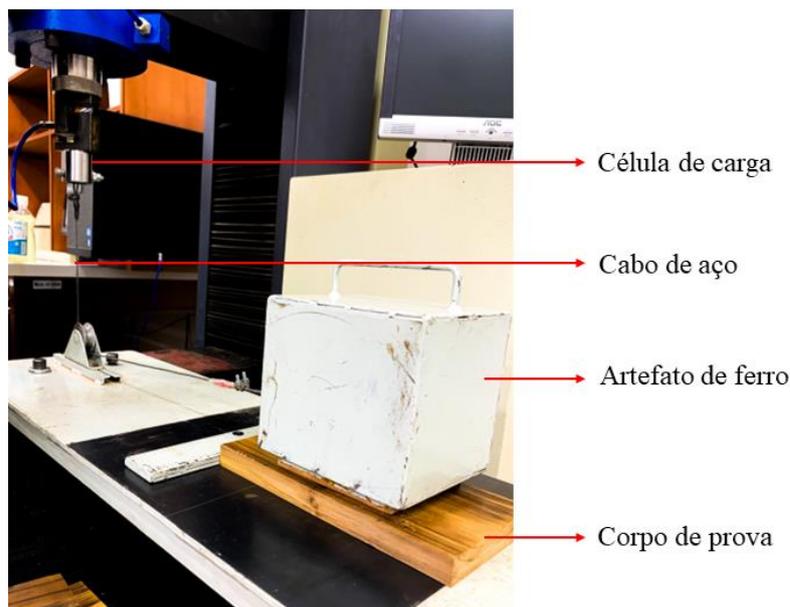
Le= média aritmética das leituras externas (mm); e

Li = leitura interna no ponto central da depressão (mm).

4.7.4 Ensaio de atrito

O ensaio para a obtenção dos coeficientes de atrito estático e dinâmico foi realizado na Máquina Universal de Ensaios (EMIC - DL 30.000). Também foram utilizados uma mesa horizontal e um artefato de ferro em formato de paralelepípedo de 11,5 kg. Esse artefato foi conectado por cabo de aço, à célula de carga com capacidade de 5000 N. A base do artefato possui a superfície inferior revestida por couro de sola de sapato, que foi lixada, a fim de uniformizar a superfície (FIGURA 11).

Figura 11 - Equipamento utilizado no ensaio de atrito estático e dinâmico.



Fonte: Da autora (2023).

O equipamento registra a força necessária para movimentação do artefato de ferro sobre os corpos de prova, com velocidade de $1,7 \text{ mm min}^{-1}$ (atrito estático), e a força média para mantê-lo em movimento, na velocidade de 51 mm min^{-1} (atrito dinâmico). Os cálculos dos coeficientes de atrito estático e dinâmico foram obtidos utilizando as razões entre a força máxima e média, respectivamente, e a massa do artefato.

4.8 Análise estatística

Os dados foram organizados conforme o delineamento inteiramente casualizado (DIC) simples, com quatro tratamentos de densificação termomecânica mais a testemunha. A quantidade de repetições nos tratamentos foi conforme o ensaio avaliado. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$), para avaliar a normalidade dos resíduos, e de Bartlett ($p > 0,05$), para testar a homogeneidade das variâncias. Posteriormente, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para comparação múltipla das médias dos tratamentos avaliados foi utilizado o teste de Dunnett ($p < 0,05$) com o intuito de comparar a testemunha com os tratamentos de densificação termomecânica.

Para a comparar apenas os tratamentos de densificação termomecânica da madeira foi também utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) disposto em esquema fatorial 2×2 , com temperatura (2 níveis: 150, 170°C) e taxa de densificação (2 níveis: 24% e 36,7%), sem a utilização do tratamento testemunha (*in natura*). O intuito dessa análise é verificar o efeito isolado de cada um dos fatores e a interação entre eles. Quando estabelecidas as diferenças significativas ($p < 0,05$), realizou-se o desdobramento dos dados.

O software estatístico utilizado para a análise dos dados foi o RStudio (Posit Team, 2023). O pacote DescTools para o teste de Dunnett e o pacote Expdes.pt foi utilizado para a análise fatorial.

No ensaio da esfera de aço cadente foi realizada a análise de regressão com os pares de valores da endentação produzida e da altura de queda da esfera de aço, obtendo-se o ajuste da equação de primeiro grau para cada tratamento avaliado e testemunha. A partir dessa equação, foi possível calcular o índice de endentação para a altura de 180 cm, indicada como índice de qualidade segundo a norma ASTM D 2394-17 (ASTM, 2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Parâmetros do processo de densificação termomecânica da madeira de teca

Para todos os tratamentos de densificação termomecânica, a madeira não atingiu a taxa de densificação alvo (24% e 36,7%). As taxas de densificação obtidas foram de 22,29%, 31,32%, 22,09% e 31,98% para os tratamentos T150-1, T150-2, T170-1 e T170-2, respectivamente. Essa menor densificação obtida ocorreu porque a madeira após ser retirada da condição de prensagem tende a retornar parcialmente a espessura inicial, anterior à densificação, o que é conhecido como *spring back*.

Os valores médios e o desvio padrão da razão de compactação, perda de massa e *spring back* da madeira de teca densificada termomecanicamente estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores médios e desvio padrão de taxa de densificação real, razão de compactação, perda de massa e *spring back* da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente.

Tratamento	Razão de Compactação (%)	Perda de massa (%)	<i>Spring back</i> (%)
T150-1	1,19 ^(0,03)	5,35 ^(1,80)	6,45 ^(1,18)
T150-2	1,32 ^(0,06)	4,92 ^(1,21)	5,37 ^(1,93)
T170-1	1,17 ^(0,04)	6,86 ^(1,22)	5,43 ^(3,23)
T170-2	1,30 ^(0,05)	7,08 ^(1,24)	5,25 ^(2,24)

Em que: (...) Desvio Padrão.

Fonte: Da autora (2023).

Por meio da Análise de Variância Fatorial (Apêndice A) foi observado que não houve interação significativa entre os fatores temperatura e taxa de densificação para a razão de compactação. No entanto, o efeito da taxa de densificação foi significativo e os valores médios foram iguais a 1,18 e 1,31 para as taxas de densificação de 24% e 36,7%. A maior razão de compactação foi observada nos tratamentos cuja taxa de densificação era mais alta, fato esperado, uma vez que nessa condição os corpos de prova tinham espessura inicial de 30mm, enquanto aqueles dos tratamentos para a densificação alvo de 24% tinham espessura inicial de 25mm, em que a espessura independentemente do tratamento foi reduzida para 19 mm. Isso explica a diferença na razão de compactação observada.

Os tratamentos de densificação termomecânica promoveram perda de massa na madeira de teca, que variou de 4,92% a 7,08% (Tabela 6). Não houve interação significativa entre os fatores temperatura e taxa de densificação da madeira para a perda de massa (Apêndice A). Contudo, é importante destacar que o fator independente temperatura foi significativo, com

valores iguais a 5,14% e 6,97% para os tratamentos realizados a 150°C e a 170°C, respectivamente. A maior perda de massa observada para os corpos de prova densificados termomecanicamente a 170°C é resultante da maior eliminação da água de adesão e de constituição com o aumento da temperatura (Schaffer, 1973), da redução do teor de extrativos voláteis da madeira (Lopes, Garcia Souza, 2018) e da maior degradação das hemiceluloses (BRITO *et al.*, 2023), que começa a diminuir acima de 120°C (Schaffer, 1973) e se intensifica com o aumento da temperatura (Pertuzzatti *et al.*, 2018). No entanto, os valores de perda de massa não foram altos porque, possivelmente, a perda de massa observada não está associada à degradação térmica da celulose e da lignina, uma vez que a maior degradação térmica da celulose ocorre na faixa de temperatura de 315 - 400°C (Yang *et al.*, 2007) e que apesar da lignina apresentar início da sua degradação térmica a 160°C, sua degradação ocorre mais lentamente e em menor intensidade comparada as hemiceluloses (Yang *et al.*, 2007; Gašparík *et al.*, 2019; Lengowski *et al.*, 2021).

Não houve interação significativa entre os fatores temperatura e taxa de densificação da madeira de teca para o *spring back* (Apêndice A), assim como também, não houve significância para os fatores avaliados independentemente. O *spring back* médio entre os tratamentos apresentou valor igual a 5,62%, com desvio padrão igual a 2,90%. O valor observado para todos os tratamentos foi baixo, demonstrando que o pós-tratamento (esfriamento dos pratos da prensa até 75°C e aplicação de pressão 0,5 MPa) foi capaz de reduzir esse efeito.

Era esperado maior *spring back* para a maior taxa de densificação e menor *spring back* para a maior temperatura de tratamento. Isso porque em maiores taxas de densificação, maior tensão interna é gerada no processo de densificação (Blomberg; Persson; Bexell, 2006; Kutnar; Kamke; Sernek. 2009). Além disso, quando a madeira é tratada em menores temperaturas, devido ao comportamento viscoelástico dos polímeros, pode ocasionar plasticização insuficiente da lignina e isso pode dificultar a sua densificação (Arruda, 2012). No entanto esses resultados não ocorreram provavelmente por associação de dois motivos. O primeiro pode estar relacionado com o tempo de densificação na temperatura e pressão alvo (30 min) ter sido o mesmo para todos os tratamentos e que esse tempo tenha sido eficaz para permitir a quebra das ligações covalentes (hemiceluloses e lignina) e das ligações de hidrogênio (hemiceluloses e celulose) permitindo que a tensão interna tenha sido amenizada (Laine *et al.*, 2013). O segundo motivo está relacionado ao pós-tratamento aplicado (esfriamento dos pratos da prensa até 75°C e aplicação de pressão 0,5 MPa) de maneira uniforme em todas as condições de prensagem. Este pós-tratamento conseguiu superar o efeito do retorno elástico da madeira densificada, pois

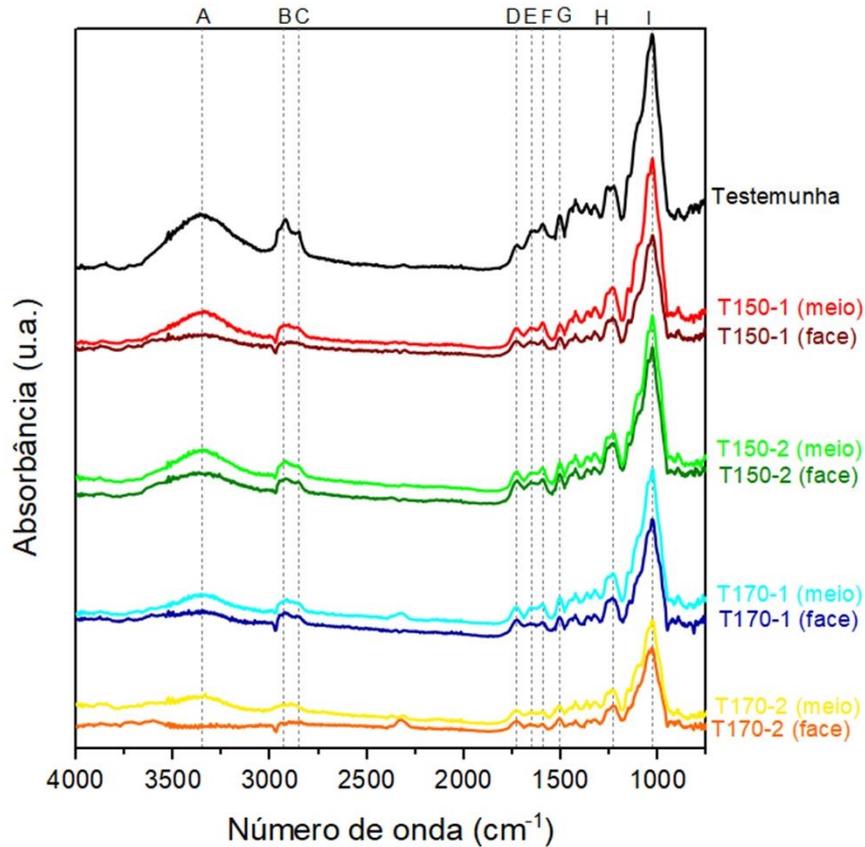
possibilitou que a madeira alcançasse uma temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea da lignina. Isso permitiu a reestruturação das ligações de van der Waals da lignina, possibilitando novo arranjo da matriz celular mais rígido (Laine *et al.*, 2013).

Os menores valores de *spring back* observados são importantes para a utilização da madeira para pisos por resultarem em maior estabilidade dimensional da madeira densificada (Tenório; Moya; Navarro-Mora, 2021). O *spring back* médio da madeira de teca densificada termomecanicamente foi menor que os observados por Tenorio e Moya (2020) ao avaliarem as madeiras de *Alnus acuminata* (5,47% - 9,24%), *Vochysia ferruginea* (11,04% - 18,88%) e *Vochysia guatemalensis* (11,69% - 16,67%) e maiores em trabalhos que avaliaram a densificação apenas da superfície da madeira de *Betula pendula* Roth (<3%) estudada por Laskowska (2017) e da madeira de *Populus* sp. (<2%) avaliada por Xu e Tang (2012). Ainda, o *spring back* foi similar ao da madeira de *Alnus acuminata* (5,61%) e maior que os observados para *Vochysia ferruginea* (3,62%) e *Vochysia guatemalensis* (3,76%) estudadas por Tenorio, Moya, Navarro-Mora (2021) com completa densificação.

5.2 Espectroscopia de infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de FTIR foi realizada para a madeira de teca *in natura* (testemunha) e densificada termomecanicamente, as quais foram separadas em dois grupos: madeira da face e do meio do corpo de prova (Figura 12).

Figura 12 – Espectros de infravermelho por Transformada de Fourier da madeira de teca *in natura* (testemunha) e face e meio da madeira de teca densificada termomecanicamente.



Em que: A – 3350 cm^{-1} ; B – 2930 cm^{-1} ; C – 2850 cm^{-1} ; D – 1730 cm^{-1} ; E – 1650 cm^{-1} ; F – 1600 cm^{-1} ; G – 1510 cm^{-1} ; H – 1230 cm^{-1} ; I – 1030 cm^{-1}

Fonte: Autora (2023)

É possível perceber por meio da comparação da intensidade dos picos de absorvância dos tratamentos e da testemunha, que todas as madeiras densificadas termomecanicamente apresentaram alterações químicas após a aplicação da densificação da madeira, principalmente no intervalo entre de 3500 a 750 cm^{-1} .

Foram identificadas várias regiões em que houve redução da intensidade dos picos de absorvância, ao comparar a madeira *in natura* (testemunha) e a madeira densificada termomecanicamente, correspondendo à ν O-H (3350 cm^{-1}), ν C-H (2930 a 2850 cm^{-1}), ν C=O (1730 cm^{-1} , 1650 cm^{-1} e 1510 cm^{-1}), C-O (e 1230 cm^{-1}), ν C-O e C-C (1030 cm^{-1}). As maiores alterações dos picos de absorvância entre os tratamentos e a testemunha ocorreram para madeira da face e do meio do tratamento T170-2 e para a madeira da face dos tratamentos T150-1 e T170-1.

O número de onda de 3350 cm^{-1} (Figura 12 – pico A) está principalmente relacionado às vibrações de estiramento das ligações O-H dos grupos hidroxila (álcoois e água) dos polissacarídeos da madeira (Martha *et al.*, 2021b; Bahanawan *et al.*, 2023), usualmente associados à água de adesão. Com a aplicação da densificação termomecânica a intensidade de absorbância desse pico reduziu em todos os tratamentos, com destaque para a face em relação à camada interna dos corpos de prova. Essa redução dos grupos OH em relação a testemunha é explicada pela degradação térmica ocasionada pela temperatura de tratamento da densificação termomecânica da madeira. Ainda foi observado que na maior temperatura (170°C) ocorreu maior redução do pico de absorbância.

O número de onda 2930 cm^{-1} (Figura 12 – pico B) está associado principalmente a vibração assimétrica $-\text{CH}_2$ (Csanády; Magoss; Tolvaj, 2015; Esteves *et al.*, 2013) em grupos metil e metileno em lignina, celulose e hemiceluloses (Moosavinejad *et al.* 2019). Enquanto 2850 cm^{-1} (Figura 12 – pico C) representa o estiramento simétrico de $-\text{CH}_2$ (Csanády; Magoss; Tolvaj, 2015; Esteves *et al.*, 2013). Houve redução desses picos para todos os tratamentos, no entanto, com maior redução observada para o tratamento T170-2 por ser o mais drástico.

A comprimento de onda 1730 cm^{-1} (Figura 12 – pico D) é atribuída às vibrações de alongamento de $\text{C}=\text{O}$ não conjugadas dos grupos carbonila em hemiceluloses (aldeído, ácido carboxílico e cetona). Bahanawan *et al.* (2023) observaram maior absorbância no pico entre $1734\text{-}1727\text{ cm}^{-1}$ para a madeira de teca que para as madeiras de sungkai (*Peronema canescens* Jack.), sengon (*Falcataria moluccana* (Miq.) Barneby & J.W. Grimes), atribuindo o pico aos hidratos de carbono (aldeído, ácido carboxílico e cetona). Além disso, Peng *et al.* (2022) relataram que o pico 1730 cm^{-1} é afetado pela desacetilação e degradação das hemiceluloses e pela formação de aldeídos na lignina durante reações térmicas. A menor absorbância verificada na madeira densificada termomecanicamente para todos os tratamentos nesse número de onda indica a redução das hemiceluloses, com possível degradação inicial da lignina que, apesar de apresentar maior estabilidade térmica que as hemiceluloses, inicia sua degradação em temperatura mais baixa.

O número de onda 1650 (Figura 12 – pico E) está associado com as vibrações $\text{C}=\text{O}$ conjugadas (Moosavinejad *et al.*, 2019). Lopes, Garcia e Souza (2018) atribuíram o pico de 1640 cm^{-1} à conjugação de $\text{C}=\text{O}$ em quinonas, relatando que o pico de intensidade diminuiu com o aumento da temperatura de tratamento. Nesse trabalho, foi verificado que a intensidade do pico sofreu redução com a aplicação de temperatura, com maior intensidade verificada para o tratamento T170-2. Isso sugere degradação térmica dos extrativos do grupo das quinonas.

Dentre os extrativos que possuem quinonas, na madeira de teca destaca-se a tectoquinona (Da Silva *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2023)

O pico entre 1604 a 1594 cm^{-1} representa às vibrações esqueléticas aromáticas ao estiramento de C-O da lignina siringil, enquanto o pico próximo a 1510 cm^{-1} (Figura 12 – pico G) representa às vibrações esqueléticas aromáticas da lignina guaiacil (Csanády, Magoss, Tolvaj, 2015). Foi observada diminuição no pico de intensidade em 1600 cm^{-1} (Figura 12 – pico F) que é atribuído ao estiramento C=C de anéis aromáticos. Esse pico também pode ser utilizado para avaliar a intensidade de pico dos extrativos de madeira (Lopes; Garcia; Souza, 2018). Houve apenas leve redução na intensidade de absorbância nessas bandas, que está relacionada estabilidade térmica das estruturas aromáticas da lignina (Zhang *et al.*, 2018).

O pico próximo à 1240-1230 (Figura 12 – pico H) está associado às vibrações de estiramento nas ligações C–O da lignina e xilanas (Fu *et al.*, 2019). A redução das xilanas, que é um tipo de hemicelulose, está associada à redução da umidade de equilíbrio da madeira e aumento hidrofobicidade. Maior redução desse pico (1230 cm^{-1}) foi verificada para o tratamento T170-2 (camada interna e face) em relação à madeira *in natura*. Atribui-se esse resultado à degradação das hemiceluloses, que se intensifica com o aumento da temperatura de tratamento térmico. Bahanawan *et al.* (2023) observaram maior intensidade no pico 1235 cm^{-1} para a madeira de teca que para as madeiras de sungkai (*Peronema canescens* Jack.), sengon (*Falcataria moluccana* (Miq.) Barneby & J.W. Grimes), atribuindo o pico à ligação C-O da lignina guaiacil.

O pico 1030 cm^{-1} está associado ao estiramento de C–O e C–C na celulose e hemiceluloses (Csanády; Magoss; Tolvaj, 2015). Foi verificado que a intensidade desse pico sofreu redução com o aumento da temperatura, com maior intensidade verificada para o tratamento T170-2 (Figura 12 - pico I). Em todos os tratamentos, os corpos de prova da face apresentaram menores picos de absorbância comparadas ao meio do corpo de prova. Fu *et al.* (2019) também atribuíram esse pico a degradação da holocelulose com o tratamento térmico.

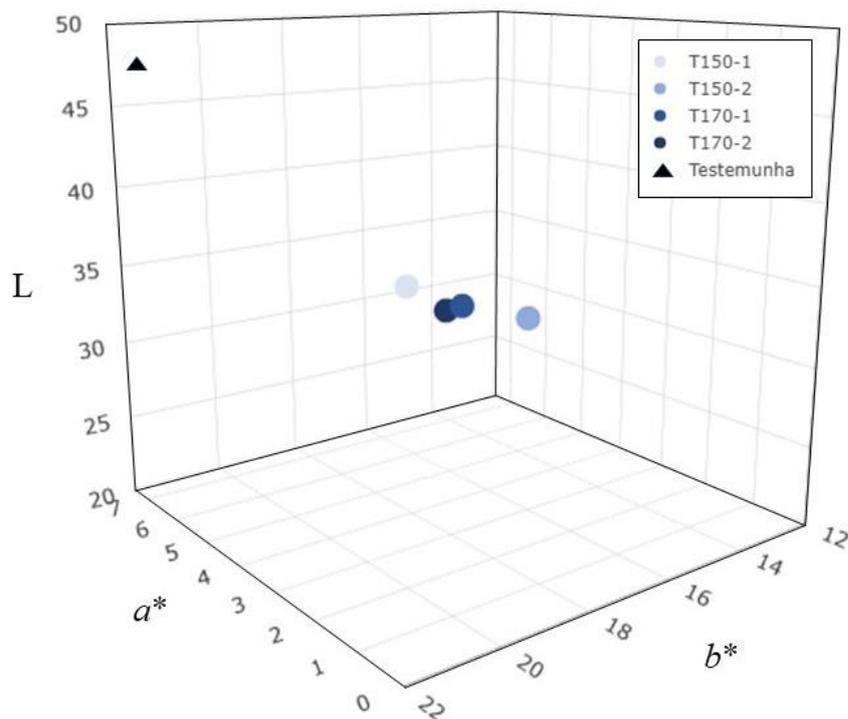
De maneira geral, houve redução dos picos de intensidade de absorbância com a aplicação dos tratamentos de densificação da madeira, destacando-se o pico A- 3350 cm^{-1} e o pico I- 1030 cm^{-1} . Maiores alterações químicas foram observadas para a face dos corpos de prova, pois essa região esteve em contato direto com os pratos aquecidos da prensa termo-hidráulica, ocasionando maior degradação dos componentes químicos. A aplicação de temperatura ocasionou redução dos grupos hidrofílicos da madeira (A- 3350 cm^{-1}) e como resultado causou a redução da umidade de equilíbrio e a molhabilidade.

5.3 Qualidade da superfície da madeira

5.3.1 Colorimetria

Os parâmetros colorimétricos médios L , a^* e b^* foram representados graficamente na Figura 13. Observa-se distinção entre as madeiras densificadas termomecanicamente e a madeira de teca *in natura*, já que se mostram mais distantes graficamente da testemunha. No que diz respeito às madeiras densificadas termomecanicamente, os tratamentos T170-1 e T170-2, aparecem graficamente mais próximos entre si, indicando similaridade da cor, enquanto as madeiras dos tratamentos T150-1 e T150-2 mais distantes.

Figura 13 - Parâmetros colorimétricos CIELAB da madeira de teca *in natura* (testemunha) e densificadas termomecanicamente.



L – luminosidade; a^* - coordenada cromática verde-vermelho; b^* coordenada cromática azul-amarelo.

Fonte: Da autora (2023).

Observa-se na Tabela 7 que houve redução e diferença significativa pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$) nos valores das variáveis cromáticas luminosidade (L), coordenada cromática verde-vermelho (a^*), coordenada cromática azul-amarelo (b^*), saturação (C^*) e ângulo de

tonalidade (h°) devido à aplicação da densificação termomecânica da madeira, em comparação à testemunha.

Tabela 7 – Valores médios e desvio padrão dos parâmetros colorimétricos do sistema CIEL*a*b* luminosidade (L), coordenada cromática verde-vermelho (a^*), coordenada cromática azul-amarelo (b^*), saturação (C^*) e ângulo de tonalidade (h°).

Tratamento	L	a^*	b^*	C^*	h°
T150-1	32,82* (3,32)	5,50* aA (0,40)	16,66* aA (1,44)	17,55* aA (1,43)	71,57* (1,49)
T150-2	29,93* (6,09)	4,78* aB (1,46)	14,00* aB (4,45)	14,82* aB (4,64)	71,64* (3,21)
T170-1	30,82* (3,96)	5,45* aA (0,72)	15,19* aA (2,44)	16,15* aA (2,51)	70,06* (1,54)
T170-2	30,42* (5,89)	5,67* bA (1,29)	15,42* aA (A4,05)	16,45* aA (4,19)	69,95* (3,20)
Testemunha	47,75 (2,98)	7,05 (1,24)	21,68 (1,92)	22,82 (2,14)	72,09 (2,09)

Em que: *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha; médias com letras iguais minúsculas não possuem diferença estatística para temperatura na mesma taxa de densificação e médias com letras iguais maiúsculas não possuem diferença estatística para taxa de densificação na mesma temperatura ($p < 0,05$), (...) Desvio Padrão.

Fonte: Da autora (2023).

Para luminosidade, não houve efeito significativo entre a interação dos fatores temperatura e taxa de densificação para os pisos densificados termomecanicamente, assim como também não houve significância quando os fatores foram avaliados independentemente (APÊNDICE B). O valor médio de L dos tratamentos foi igual a 31. De maneira geral, o valor de luminosidade sofreu redução de 35% em relação a testemunha. A diminuição da luminosidade na madeira de teca com a aplicação de tratamentos térmicos foi também confirmada por Cuccui *et al.* (2017), Gašparík *et al.* (2019) e Lengowski *et al.* (2021). A redução da luminosidade está relacionada com a degradação das hemiceluloses e com a variação do conteúdo de extrativos na madeira de acordo com Cademartori *et al.* (2013b), e conforme confirmado na análise de FTIR (Figura 12).

O tratamento de densificação termomecânica possibilitou a redução do valor de L e consequente escurecimento da madeira (Tabela 7). Conforme Lopes *et al.* (2014), o escurecimento da madeira promovido pela modificação térmica é um método promissor para a obtenção de produtos de maior valor agregado. Além disso, de acordo com Costa *et al.* (2021), pisos de tons mais escuros têm o efeito de diminuir a sensação de espaço onde são aplicados, conferindo maior aconchego ao ambiente, tornando-os uma escolha recomendada para espaços como quartos, salas de estar, escritórios ou áreas com pouca mobília.

Conforme Tabela 7 é possível verificar a maior influência do pigmento amarelo e pequena presença do pigmento vermelho, visto que os valores de b^* foram maiores que os

valores de a^* . Com a aplicação do tratamento de densificação termomecânica, de forma geral, houve redução de aproximadamente 25% do valor de a^* e de 30% do valor de b^* em relação à testemunha. Houve interação do fator taxa de densificação com o fator temperatura para a^* , b^* e C^* (Apêndice B).

Para a coordenada cromática a^* , houve interação da temperatura com a taxa de densificação de 36,7% em que houve aumento de 18,62% com o aumento da temperatura (150°C-170°C). Também foi verificada interação entre a taxa de densificação com a temperatura a 150°C, em que houve redução de 13,09% dos valores de a^* , com o aumento da densificação (24%-36,7%). Além da interação dos fatores analisados, observou-se que a temperatura avaliada isoladamente para a coordenada cromática a^* também apresentou diferença estatística significativa (Apêndice B), com valores de 5,14 e 5,56 para as temperaturas de 150°C e 170°C, respectivamente.

Para a coordenada cromática b^* foi verificada interação entre a taxa de densificação com a temperatura a 150°C, em que houve redução de aproximadamente 16% dos valores de a^* , com o aumento da densificação (24%-36,7%). De acordo com Cademartori *et al.* (2013a), a redução de b^* , confirma o aspecto de perda da tonalidade amarela que é característica de madeiras que foram submetidas a tratamentos térmicos. Pincelli *et al.* (2012) argumentam que a coloração amarela está ligada à existência de cromóforos nos extrativos. Essa relação é confirmada pela redução de b^* (Tabela 7) e pela degradação dos extrativos (Figura 12) após o tratamento de densificação termomecânica.

As madeiras tratadas e da testemunha apresentaram baixa saturação (C), uma vez que os valores foram inferiores a 30 (Tabela 7), indicando concentração mais elevada de cinza na composição da cor (Camargos; Gonzalez, 2001). A redução dos valores de a^* e b^* com a aplicação dos tratamentos de densificação termomecânica em relação a madeira *in natura* resultou em menor C^* da madeira tratada, já que esse parâmetro é calculado em função das coordenadas a^* e b^* . Para C^* foi observado efeito significativo da interação entre a taxa de densificação e a temperatura a 150°C, em que houve redução aproximadamente 16% da saturação com o aumento da densificação (24% -36,7%).

Para o ângulo de tinta (h°), não houve efeito significativo da interação entre os fatores taxa de densificação e temperatura, no entanto houve significância do fator temperatura (Apêndice B), em que os valores médios para 150°C e 170°C foram, respectivamente, iguais a 71,61° e 70,01°. O ângulo de tinta (h°) superior a 45° confirma a influência predominante do pigmento amarelo tanto na testemunha quanto nas madeiras densificadas termomecanicamente,

aproximando-se mais do eixo b^* que do eixo a^* . A redução do ângulo de tinta sugere a homogeneização da cor da madeira após o tratamento (Pincelli *et al.*, 2012).

Tabela 8 – Valores médios e desvio padrão da variação da cor da madeira (ΔE) e representação visual madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.

Tratamento	T150-1	T150-2	T170-1	T170-2	Testemunha
ΔE	16,85 (5,38)	18,80 (5,49)	19,46 (4,85)	20,78 (4,83)	-
Cor da madeira					

Em que: (...) = Desvio Padrão.

Fonte: Da autora (2023).

Não houve interação dos fatores temperatura e taxa de densificação para a variação da cor (Apêndice B). No entanto, foi observada significância do fator temperatura, em que os valores médios para 150°C e 170°C foram, respectivamente, iguais a 17,82 e 20,12 (Tabela 8). O aumento de 12,90% na variação da cor ao ocasionado pelo aumento da temperatura (150°C – 170°C) está relacionado a maior degradação dos extrativos e das hemiceluloses, além da formação de produtos oxidativos (Lopes *et al.* 2014).

A madeira de teca densificada termomecanicamente apresentou coloração mais próxima ao castanho-amarelado escuro, como pode ser observado na Tabela 8, aproximando-se da coloração observada para a madeira de teca de florestas nativas conforme classificação de Bhat (1999). A importância de escurecer a cor da madeira de teca proveniente de plantios de rápido crescimento para se assemelhar à madeira de teca de florestas nativas deve-se principalmente a maior valorização pelo mercado consumidor (Kollert; Kleine, 2017) e a maior atratividade estética (Carvalho *et al.*, 2021) que a madeira nativa de teca possui. Assim, à medida que a coloração castanho escuro se torna mais comum nas madeiras de plantações, os preços da madeira tendem a aumentar (Moya *et al.* 2013), permitindo que a madeira de teca densificada termomecanicamente possa alcançar maiores valores de mercado.

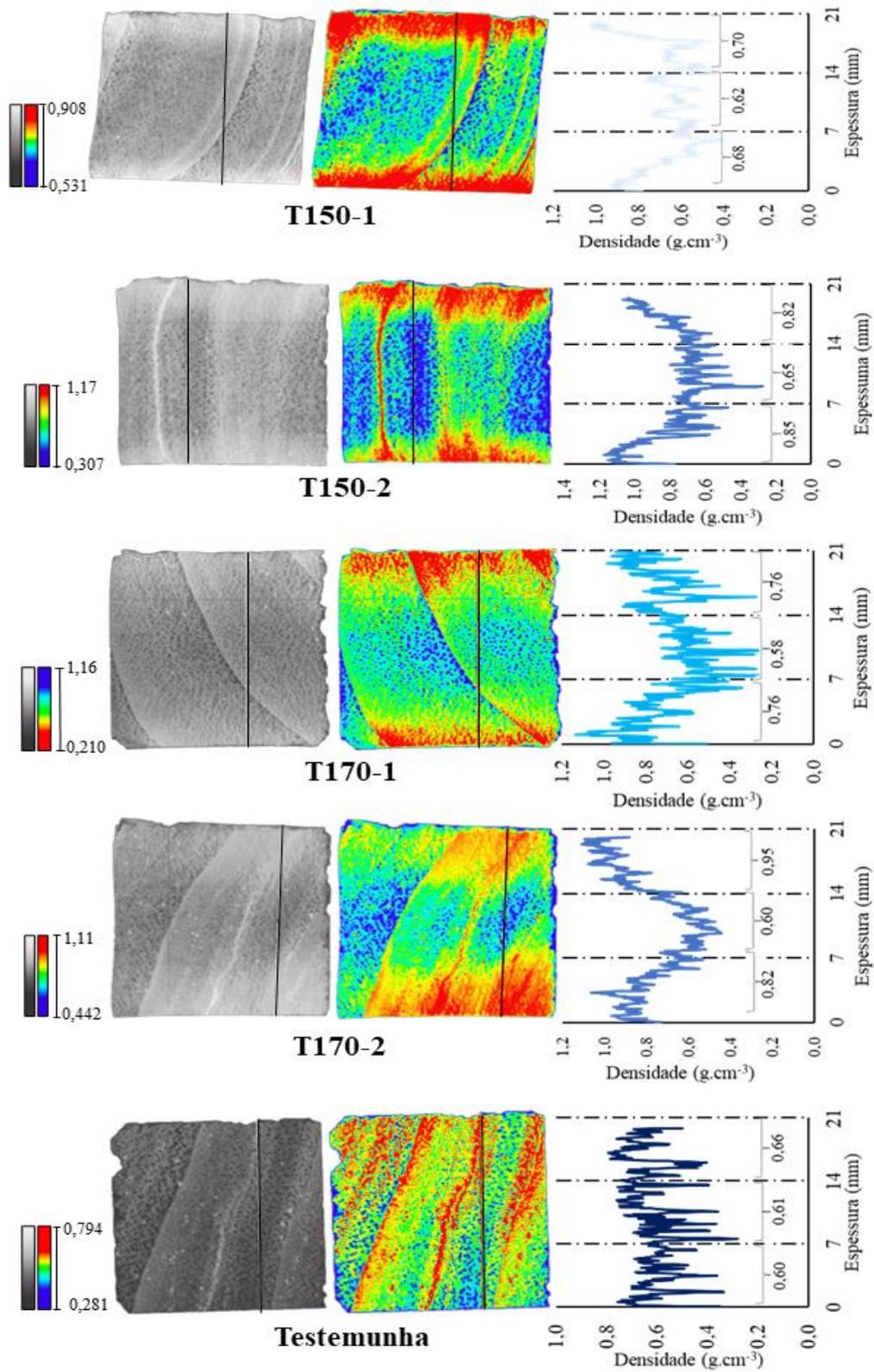
A variação de cor de todos os tratamentos foi considerada muito apreciável de acordo com classificação de Hikita *et al.* (2001). Além disso, o escurecimento da madeira de teca

promovido pela densificação termomecânica pode possibilitar maior valor agregado a madeira de plantações, especialmente por essa coloração ser associada a madeiras tropicais amazônicas. Uma vez que, espécies tropicais que apresentam coloração escura são mais valorizadas e preferidas para a utilização em pisos, móveis e decoração de residências, iates de luxo, aeronaves e veículos ferroviários (Passauer *et al.*, 2015).

5.3.2 Densitometria de raios-X

Na Figura 14 estão apresentadas as imagens em escala de tons cinza e escala rainbow dos perfis de densidade obtidos da madeira de teca densificada termomecanicamente e *in natura*. Na representação em escala de cinza, observam-se variações da tonalidade que vão de cinza escuro a cinza claro. Essas variações correspondem a diferentes valores de densidade, sendo as áreas de tonalidade mais claras associadas a maiores densidades, enquanto as áreas mais escuras indicam menores densidades. De maneira análoga, na representação em escala rainbow as tonalidades de vermelho indicam maiores valores de densidade, enquanto tonalidades azuladas estão relacionadas a menores densidades.

Figura 14 - Imagens de raios-X e perfis densitométricos da madeira jovem de teca *in natura* (testemunha) e densificada termomecanicamente.



Legenda: Linha preta destacada representa a região onde foi realizada a leitura de microdensidade.
Fonte: Da autora (2023).

Houve aumento da densidade superficial da madeira para todos os tratamentos de densificação termomecânica em relação à testemunha, cuja densidade média foi igual a $0,623 \text{ g.cm}^{-3}$. A madeira de teca *in natura* apresenta estrutura anatômica com anel e semi-anel porosos, juntamente com anéis de crescimento anuais distintos, devido principalmente ao tamanho dos poros (Gaitan-Alvarez; Moya; Berrocal, 2019). Essa estrutura da madeira de teca favorece a distinção dos anéis de crescimento por meio da densitometria de raios-X (Nocetti *et al.* 2011; Gaitan-Alvarez; Moya; Berrocal, 2019). As regiões com maior densidade da madeira *in natura* estão associadas ao lenho tardio dos anéis de crescimento, conforme verificado nas imagens em escala cinza e rainbow.

Quanto às madeiras submetidas à densificação termomecânica, os valores médios de densidade para os tratamentos T150-1, T150-2, T170-1 e T170-2 foram, respectivamente, $0,670 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,790 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,700 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,790 \text{ g.cm}^{-3}$. Observou-se que o aumento da densidade ocorreu predominantemente na superfície dos corpos de prova em comparação com a região central. Nas primeiras camadas (3 mm) da superfície da madeira nos tratamentos T150-1, T150-2, T170-1 e T170-2, as densidades médias atingiram valores de $0,871 \text{ g.cm}^{-3}$, $1,05 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,866 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,957 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente, enquanto a parte central teve valores médios iguais a $0,620 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,650 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,58 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,600 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente.

Esse aumento da densidade observado na superfície dos corpos de prova, está associado à pressão exercida pelos pratos aquecidos da prensa termo-hidráulica durante o tratamento de densificação termomecânica. Esse fato pode causar possível aumento na resistência mecânica da madeira, principalmente na dureza superficial. Além disso, essa maior densidade permite a utilização da madeira para a produção de móveis, pisos e usos de construção (Ulker *et al.* 2012; Pertuzzatti *et al.* 2018).

Para os corpos de prova densificados termomecanicamente é importante destacar que, nesses 3 mm superficiais, foi notada maior densidade na superfície dos corpos de prova que passaram por taxa de densificação de 36,7%, com valores médios classificados como de densidade pesada (T170-2) a muito pesada (T150-2) (Csanády; Magoss; Tolvaj, 2015). No entanto, a densidade superficial da madeira dos tratamentos densificados a 24% de taxa de densificação apesar da menor, também foram considerados como de densidade pesada.

A técnica de avaliação do perfil de densidade por meio da densitometria de raios-X demonstrou eficácia na análise da madeira densificada termomecanicamente. Essa avaliação é importante para verificar o aumento da densidade nos primeiros milímetros abaixo da superfície da madeira em comparação com o centro dos corpos de prova, considerando a relevância da

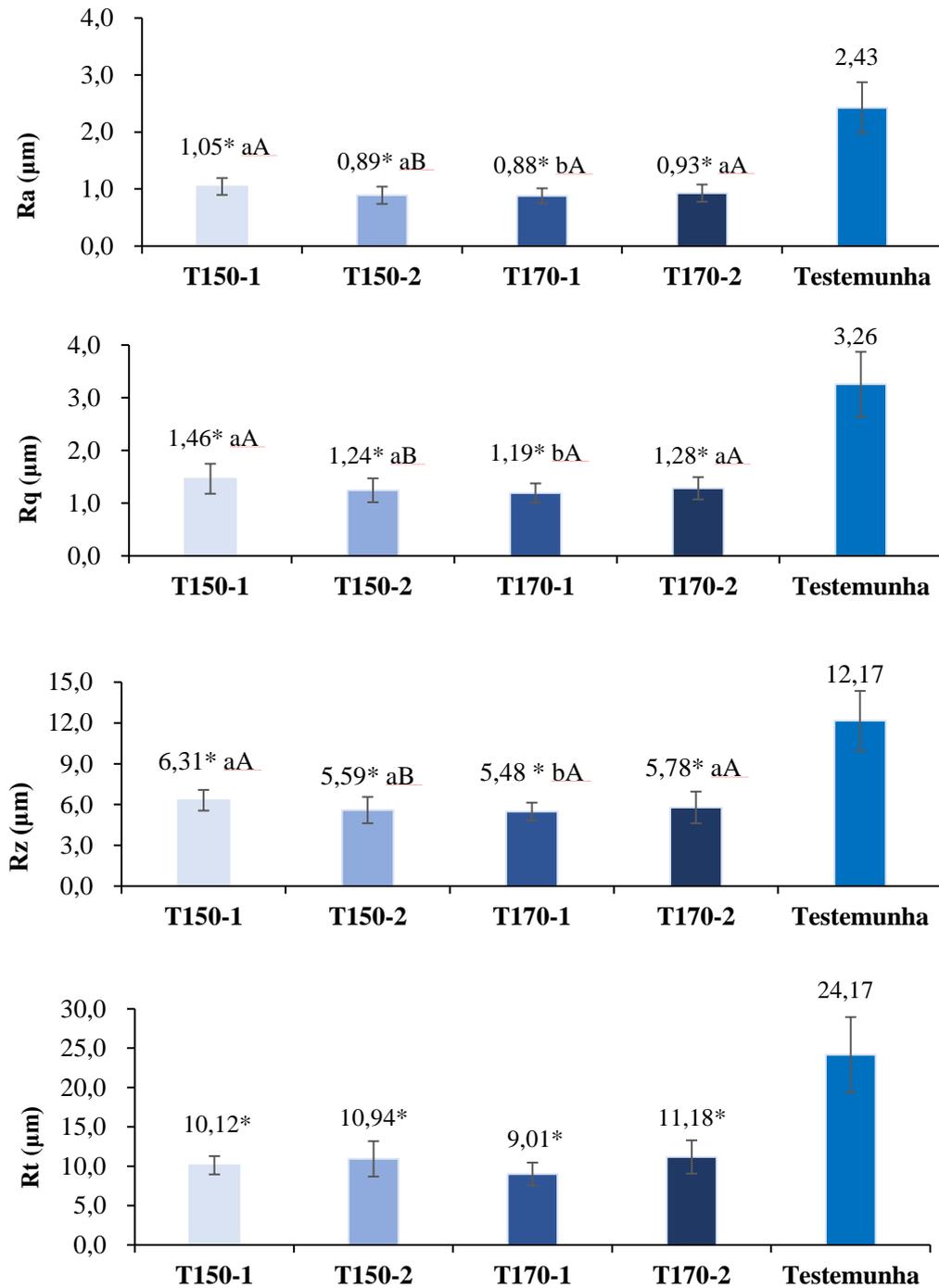
região superficial na maioria das aplicações da madeira em PMVA. Já que nas aplicações em que é desejável manter a baixa densidade aparente da madeira, porém, melhorar as propriedades superficiais, a estratégia de aumentar a densidade da superfície da madeira com o intuito de aumentar a dureza superficial apresenta vantagens sobre a modificação do material como um todo (Rautkari *et al.*, 2010). Além disso, ao compreender e analisar a variação da densidade através do perfil da madeira densificada, torna-se possível otimizar o processo de produção desse material e prever seu desempenho em diferentes aplicações, garantindo uma utilização mais eficiente às necessidades específicas em cada uso.

5.3.3 Rugosidade

Os valores médios e desvio-padrão de rugosidade da madeira de teca densificada termomecanicamente e da testemunha estão apresentados na Figura 15.

Todos os tratamentos apresentaram valores médios menores que a testemunha pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$), que indicam superfície menos rugosa e mais uniforme. Isso ocorre porque o tratamento de densificação termomecânica reduz as irregularidades nos elementos celulares da superfície da madeira, tornando-a mais uniforme e regular. Essa característica é particularmente benéfica em aplicações onde a qualidade da superfície é crucial. Essa redução da rugosidade com a aplicação dos tratamentos termomecânicos permite ampliar a utilização da madeira de teca de 15 anos para a produção de pisos. Além de reduzir a perda de material em máquinas de acabamento (Korkut; Guller, 2008).

Figura 15 - Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rz e Rt da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.



Em que: Ra é a rugosidade média; Rq é a rugosidade quadrática; Rz é a rugosidade de profundidade média; Rt rugosidade de profundidade total; *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha; médias com letras iguais minúsculas não possuem diferença estatística para temperatura na mesma taxa de densificação e médias com letras iguais maiúsculas não possuem diferença estatística para taxa de densificação na mesma temperatura ($p < 0,05$).

Fonte: Da autora (2023).

Todos os parâmetros de rugosidade se mostraram sensíveis para detectar a rugosidade da madeira avaliada. No entanto, cabe ressaltar que a rugosidade Ra é o parâmetro mais utilizado para madeiras (Gural; Irle, 2017) por representar os desvios em relação à média e não estar sujeito a picos e vales isolados que não representam o perfil de avaliação (Carpinetti *et al.*, 1996). O parâmetro Rq, assim como o Ra, também indica a amplitude média das irregularidades da superfície. Entretanto, é mais sensível a picos e vales e é indicado principalmente em superfície em que o parâmetro Ra não seja adequado (Carpinetti *et al.*, 1996). Além disso, os parâmetros Ra e Rq não sofrem influência de arranhões e ruídos de medição, diferentemente dos parâmetros Rt e Rz (Olympus, 2023). Os parâmetros Rt e Rz ao considerarem a maior distância entre os picos e vales podem ser sensíveis à estrutura anatômica porosa da madeira.

Os valores de rugosidade Ra, Rz e Rt da madeira *in natura* (Figura 15) corroboram com os valores encontrados para a madeira de teca de 13 anos avaliada por Blanco-Flórez *et al.* (2015). A redução mais expressiva em relação à testemunha foi observada para o tratamento T170-1, em que os parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rq reduziram aproximadamente 60%.

Por meio da ANOVA (APÊNDICE C) foi observado que as interações entre os fatores temperatura e taxa de densificação foram significativas ($p < 0,05$) para os parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rq. O tratamento térmico nas duas temperaturas, 150°C e 170°C, promoveu alterações nos valores de rugosidade, e isso também foi constatado por Budhe *et al.* (2020) avaliando a madeira de teca em tratamento térmico de 150°C por 2h. O fator temperatura na taxa de densificação de 24%, ocasionou redução de 15,38%, 13,15% e 18,49%, nos parâmetros Ra, Rz e Rq respectivamente, com o aumento da temperatura (150°C-170°C), conforme verificado na Figura 15.

A influência da taxa de densificação nos parâmetros Ra, Rz e Rq ocorreu apenas na temperatura de 150°C. Essa redução foi de 14,42%, 11,41% e 15,07% para os parâmetros Ra, Rz e Rq, respectivamente, quando houve aumento da taxa de densificação de (24%-36%). O efeito da densificação tornou a superfície da madeira mais regular, corroborando com Bekhta *et al.* (2014). Isso acontece principalmente devido ao esmagamento das estruturas da madeira como as fibras, raios e vasos, ocasionando menor irregularidade na superfície da peça.

Não houve interação significativa entre os fatores temperatura e taxa de densificação para o parâmetro de rugosidade Rt. No entanto, para esse parâmetro foi verificada significância da taxa de densificação. Vale ressaltar que para a taxa de densificação de 24% e 36,7%, independentemente da temperatura, os valores de rugosidade Rt obtidos foram respectivamente

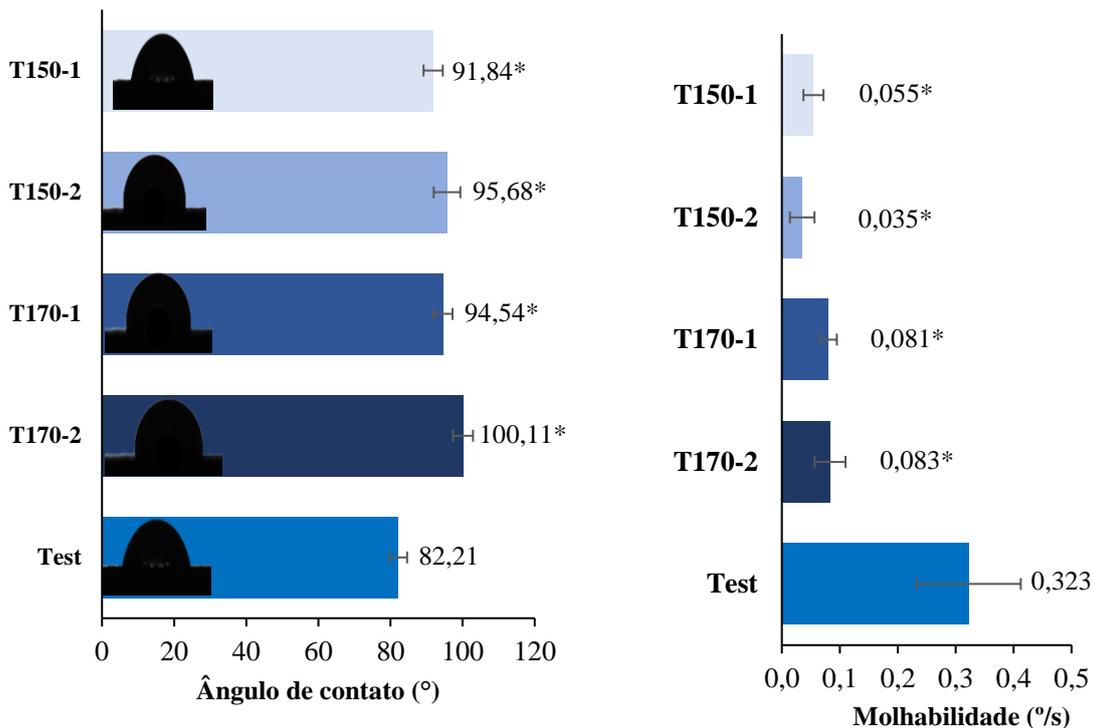
iguais a 9,57 μm e 11,06 μm . Esse resultado representa aumento de 15,57% da rugosidade com a elevação da taxa de densificação.

Com base na redução de mais de 50% dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rz e Rt em todos os tratamentos, é possível assumir que a densificação termomecânica da madeira em todas as combinações de temperatura e taxa de densificação avaliadas foi eficaz para reduzir a rugosidade e tornar a superfície da madeira mais homogênea. Essa redução da rugosidade permite obter melhor qualidade da madeira para utilização em PMVA como os pisos maciços.

5.3.4 Ângulo de contato e molhabilidade

Os valores médios e o desvio padrão do ângulo de contato e da molhabilidade da madeira de teca densificada termomecanicamente e da testemunha estão mostrados na Figura 16.

Figura 16 – Valores médios e desvio padrão do ângulo de contato e molhabilidade da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.



Em que: * diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha; Test significa testemunha.

Fonte: Da autora (2023).

O ângulo de contato é inversamente proporcional a molhabilidade. De maneira geral, ângulo de contato inferior a 90° sinaliza uma superfície mais hidrofílica, indicando maior afinidade com a água, enquanto aquelas com ângulos de contato superiores a 90° são tidas como hidrofóbicas, sugerindo menor afinidade com a água. Menor ângulo de contato ($82,21^\circ$) e a maior molhabilidade ($0,323 \text{ }^\circ/\text{s}$) foram verificados para a testemunha, enquanto os tratamentos de densificação termomecânica resultaram em ângulos de contato mais elevados e valores de molhabilidade mais baixos (Figura 16). A maior hidrofobicidade verificada para a madeira *in natura* (testemunha) é explicada pelas características hidrofílicas da madeira em seu estado natural, sem modificação dos constituintes químicos (Figura 12) e das propriedades físicas (Figura 14).

Todos os tratamentos apresentaram resultados superiores a testemunha pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$) para o ângulo de contato e para a molhabilidade. Esse resultado sinaliza que a superfície das madeiras densificadas termomecanicamente tornaram-se mais hidrofóbicas com a aplicação do tratamento, já que apresentaram ângulo de contato superiores a 90° e baixos valores de molhabilidade. A maior hidrofobicidade da superfície da madeira densificada termomecanicamente representa menor absorção ou espalhamento da água, proporcionando efeito impermeabilizante à superfície da madeira.

Devido à madeira ser um material com características higroscópicas, superfícies que apresentam maiores valores de ângulo de contato e menor molhabilidade tornam-se essenciais. Isso deve-se ao fato que a redução da higroscopicidade contribui para a proteção da madeira da umidade e de danos ocasionados pelo contato com a água, como inchamentos e deformações nas dimensões do piso. A maior hidrofobicidade promovida em razão da densificação termomecânica está relacionada com as alterações químicas e físicas da madeira ocasionadas durante o tratamento.

Não houve interação significativa dos fatores temperatura e taxa de densificação para o ângulo de contato e molhabilidade (Apêndice D). No entanto, o fator independente temperatura apresentou efeito significativo apenas para o ângulo de contato. Houve aumento do ângulo de contato da madeira densificada termomecanicamente com o aumento da temperatura de 150°C para 170°C , cujos valores foram, respectivamente, iguais a $93,76^\circ$ e $97,32^\circ$. Esse resultado pode estar associado com a redução dos grupos hidroxílicos (Figura 12), a migração dos extrativos hidrofóbicos para a superfície da madeira (Lengowski *et al.*, 2018), a reorientação molecular dos compostos (Santos; Del Menezzi; Souza, 2012) e a plasticização da lignina (Hakkou *et al.*, 2005), que se intensifica com a aplicação de temperaturas mais elevadas.

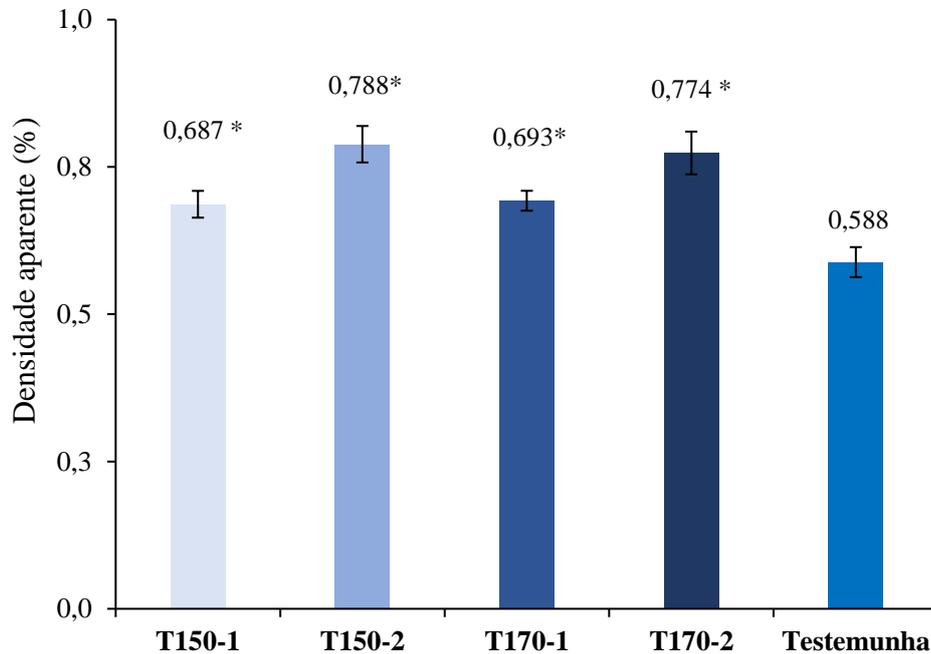
Também houve aumento do ângulo de contato da madeira densificada termomecanicamente conforme aumento da taxa de densificação. Os valores de ângulo de contato para as taxas de densificação de 24% e 36,7% foram, respectivamente, iguais a 93,19° e 97,89°. Esse aumento pode estar relacionado com as modificações físicas ocasionadas durante a densificação da madeira, em que a maior taxa de densificação tenha proporcionado maior fechamento dos microporos da madeira e isso tenha contribuído para tornar a superfície mais hidrofóbica (Santos; Del Menezzi; Souza, 2012).

Houve aumento da molhabilidade conforme o aumento da temperatura de tratamento. Os valores médios de molhabilidade para as temperaturas de 150°C e 170°C foram, respectivamente, iguais a 0,045 %s e 0,082 %s. A molhabilidade das madeiras submetidas ao tratamento de 170°C foi o dobro daquelas tratadas a 150°C. Esse resultado é contrário ao que era esperado, já que a molhabilidade geralmente é inversamente proporcional ao ângulo de contato e o maior ângulo de contato foi observado para a maior temperatura de tratamento (170°C). Apesar desse aumento na molhabilidade, ao compará-lo com a madeira *in natura*, nota-se redução de 75% nos valores, destacando a eficácia do tratamento de densificação termomecânica em reduzir o espalhamento e a absorção da água sob a superfície da madeira.

5.4 Ensaio físicos

Os valores médios e desvio-padrão da densidade aparente na umidade de equilíbrio da madeira de teca densificada termomecanicamente e da testemunha estão apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Valores médios e desvio-padrão de densidade aparente (U~12%) da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.



Em que: *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha.
Fonte: Da autora (2023).

Os menores valores de densidade aparente foram observados para a testemunha, cujo valor médio foi igual a $0,588 \text{ g.cm}^{-3}$, classificada como de densidade moderada de acordo com Csanády, Magoss e Tolvaj (2015). Esta densidade está situada no intervalo de estudos realizados em madeiras de teca provenientes de plantações de rápido crescimento no Brasil, com idades entre 13 e 25 anos, variando de $0,540 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,590 \text{ g.cm}^{-3}$ (Blanco-Flórez *et al.*, 2014; Mascarenhas *et al.*, 2021; Brito *et al.*, 2023).

A madeira de teca de todos os tratamentos termomecânicos apresentou valores médios de densidade aparente superiores à testemunha pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$) (Figura 17). A densidade variou de $0,687 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,788 \text{ g.cm}^{-3}$ para os tratamentos densificados termomecanicamente, valores próximos ao encontrado para madeira de teca de plantios de longa rotação e de florestas naturais, que apresentam maior aceitação e valor de mercado. Os valores encontrados foram superiores aos observados em uma floresta não manejada de 50-70 anos de idade no Timor-Leste, cujo valor de densidade variou de $0,555 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,674 \text{ g.cm}^{-3}$ (Miranda; Sousa; Pereira, 2011) e de plantações de 40 anos de idade em Java, cujo valor foi de $0,664 \text{ g.cm}^{-3}$ (Rizanti *et al.*, 2018).

A densidade média da teca densificada termomecanicamente a 36% de taxa de densificação (T150-2 e T170-2) foi similar a madeira de teca de 67-70 anos de idade, cujo valor foi de 0,779 g.cm³ e superior aos plantios de 11-16 e 40-45 anos de idade, com valores de densidade, respectivamente, iguais a 0,647 g.cm⁻³ e 0,728 g.cm⁻³, observados por Kokutse *et al.*, (2004) em plantações no Togo. Contudo, a madeira densificada a 24% de taxa de densificação (T150-1 e T170-1) apresentou densidade inferior aos plantios de 40-45 e 67-70 anos de idade e superior aos plantios de 11-16 anos de idade (Kokutse *et al.*, 2004).

Os maiores valores de densidade observados para a madeira densificada termomecanicamente (Figura 17) podem ser explicados pela diminuição do volume de espaços vazios da madeira com a densificação e ao aumento da quantidade de parede celular por volume (Ülker *et al.*, 2012; Pelit; Budakçi; Sönmez, 2018). Esses maiores valores observados após o tratamento de densificação termomecânica da madeira são importantes em utilizações como pisos de madeira já que madeiras mais densas estão geralmente associadas a maiores valores de dureza e são mais resistentes a danos ocasionados durante o uso.

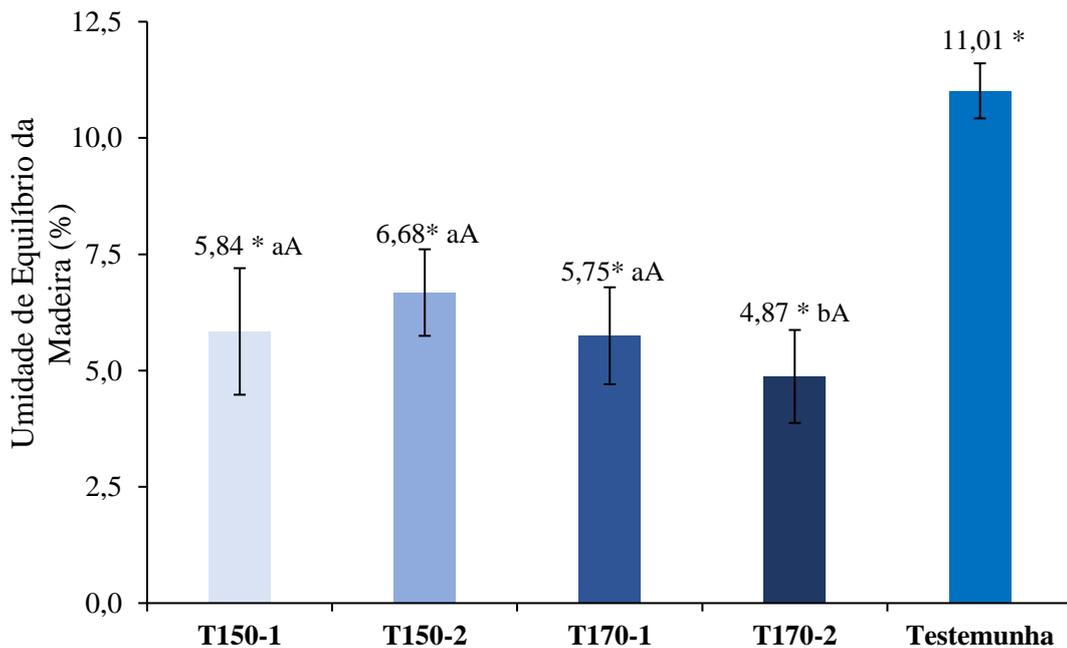
Não houve interação significativa dos fatores temperatura e taxa de densificação para a densidade aparente (Apêndice E). No entanto, o fator independente taxa de densificação apresentou efeito significativo ($p < 0,05$), em que os valores de densidade aparente para as taxas de densificação de 24% e 36,7%, foram respectivamente iguais a 0,690 g.cm⁻³ e 0,781 g.cm⁻³. Para os tratamentos com densificação de 36,7%, a madeira alcançou valores de densidade classificados como madeiras pesadas (Csanády; Magoss; Tolvaj, 2015), estando na mesma classe de densidade de espécies tropicais convencionais para a utilização de pisos como cumaru, ipê, jatobá, muiracatiara (Costa *et al.*, 2021) e sucupira (Oliveira *et al.*, 2019a). Ainda que, os tratamentos de menor densificação (24%) tenham permanecido na classe de densidade moderada (0,500 – 0,750 g.cm⁻³), a densidade dos corpos de prova após densificação aumentou 17%, alcançando o limite superior da referida classe.

O fator temperatura não apresentou significância na análise de variância (Apêndice E) para a densidade aparente. Esse resultado pode estar associado à pequena diferença da perda de massa (Tabela 6) observada entre os tratamentos submetidos às duas diferentes temperaturas, não ter sido suficiente para contribuir com a redução da densidade nas madeiras tratadas a 170°C. Do ponto de vista da aplicação da madeira em pisos, isso é vantajoso, pois tratamentos térmicos em temperaturas mais elevadas podem resultar em redução das propriedades higroscópicas da madeira, sem ocasionar a redução da densidade. Dessa maneira é possível escolher qual das duas temperaturas de tratamento apresenta resultados superiores para outras

propriedades. Ou ainda, do ponto de vista econômico é preferível realizar o tratamento na temperatura mais baixa, 150°C, ocasionando menor gasto energético.

Os valores médios e desvio-padrão da umidade de equilíbrio da madeira de teca densificada termomecânica e da testemunha estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Valores médios e desvio-padrão da umidade de equilíbrio da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecânica e testemunha.



Em que: *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha; médias com letras iguais minúsculas não possuem diferença estatística para temperatura na mesma taxa de densificação e médias com letras iguais maiúsculas não possuem diferença estatística para taxa de densificação na mesma temperatura ($p < 0,05$).

Fonte: Da autora (2023).

A umidade de equilíbrio da madeira de teca *in natura* foi de 11,01% (Figura 18). O desvio-padrão foi maior para os tratamentos de densificação termomecânica que para a testemunha. Isso pode estar relacionado à não uniformidade da degradação dos grupos OH entre os corpos de prova. No entanto, mesmo considerando os valores de desvio-padrão a umidade de equilíbrio da madeira densificada termomecânica foi inferior a testemunha.

Todos os tratamentos de densificação termomecânica apresentaram menores valores médios para a umidade de equilíbrio da madeira em comparação com a testemunha, conforme evidenciado pelo teste de Dunnett a 5% de significância. A redução da umidade de equilíbrio promovida pela densificação termomecânica da madeira verificada para os quatro tratamentos variou de 4,33 a 6,14 pontos percentuais em relação a testemunha. No contexto da utilização de

madeira para pisos, os valores reduzidos de umidade para as madeiras densificadas termomecanicamente possibilita melhoria desse material para essa finalidade.

A redução da higroscopicidade das madeiras densificadas termomecanicamente pode ter ocorrido porque a temperatura dos tratamentos foi superior a 140°C, temperatura a qual iniciam as reações de desidratação por decorrência da perda da água de constituição, ocasionando redução dos grupos hidroxílicos (Hill, 2007). Esse fenômeno também pode ser confirmado pelo FTIR, em que houve redução da intensidade de absorvância do pico de $3\ 350\ \text{cm}^{-1}$ (Figura 12 – pico A). Kocafe *et al.* (2008) e Navi e Sandberg (2012) explicaram que isso pode resultar na minimização da relação entre as moléculas de água e os grupos hidroxílicos da madeira ocasionando menor adsorção de água pela parede celular. Além disso, pode ocasionar migração dos extrativos menos voláteis para a superfície da madeira (Hill, 2007), que no caso da teca em sua maioria possuem características hidrofóbicas devido ao alto teor de lipídios específicos (Thulasidas; Baillères, 2017).

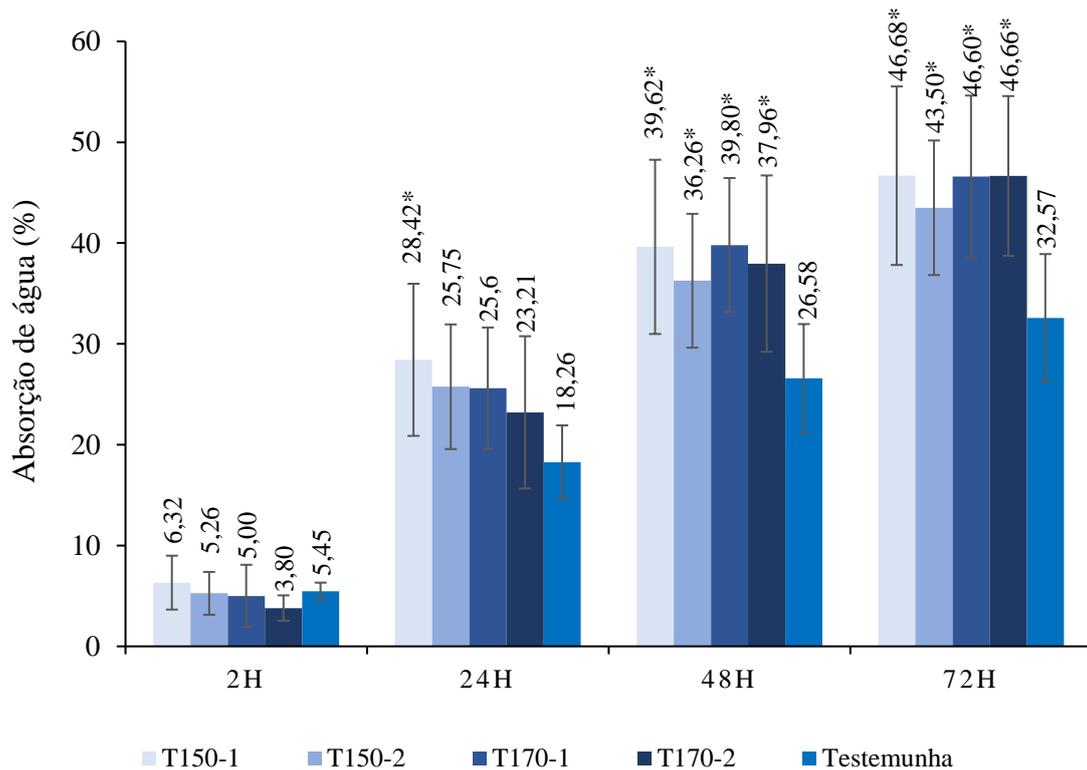
Entre os tratamentos avaliados, o tratamento T150-2 apresentou as maiores médias com valor igual a 6,68%; no entanto esse tratamento também foi estatisticamente diferente da testemunha. A redução da umidade de equilíbrio com a aplicação dos tratamentos densificação termomecânica da madeira é importante para melhorar a utilização da madeira em ambientes com elevada umidade relativa do ar. Isso ocorre porque, conforme apontado por Qing *et al.* (2017) a maior higroscopicidade da madeira pode restringir seu uso em algumas aplicações, resultando em redução em sua vida útil e valorização.

Houve interação do fator taxa de densificação com o fator temperatura para a umidade de equilíbrio da madeira (Apêndice E). Conforme verificado na Figura 18, houve influência da temperatura na umidade de equilíbrio da madeira densificada termomecanicamente quando em conjunto com taxa de densificação de 36,7%, em que houve decréscimo de 1,81 pontos percentuais com o aumento da temperatura (150-170°C).

Além da interação do fator taxa de densificação com o fator temperatura para umidade de equilíbrio da madeira, também houve efeito significativo para o fator temperatura avaliado independentemente. Constatou-se redução da umidade de equilíbrio da madeira conforme aumento da temperatura de tratamento. Os valores médios a 150°C e 170°C foram iguais a 6,26 e 5,31%, respectivamente. Os menores valores de umidade de equilíbrio observados para os tratamentos a 170°C podem estar relacionados com a maior degradação térmica das hemiceluloses (Figura 12), que assume maior importância à medida que a temperatura aumenta (Hill, 2007) e intensificação da degradação acima dos 200°C (Cavinato; Poletto, 2021).

Os valores médios e desvio-padrão de absorção em água da madeira de teca densificada termomecânicamente e da testemunha estão apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Valores médios e desvio-padrão de absorção de água nos períodos de 2h, 24h, 48h e 72h da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecânicamente e testemunha.



Em que: *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha.
Fonte: Da autora (2023).

A absorção de água, após longos períodos de submersão, demonstrou ser maior nos corpos de prova submetidos aos tratamentos de densificação termomecânica em comparação a testemunha, como ilustrado na Figura 19. Isso pode ser atribuído ao efeito de retorno parcial das dimensões iniciais da madeira quando exposta a elevada umidade devido a liberação das tensões internas de compressão. Antes da densificação termomecânica, a madeira desses tratamentos apresentava maiores espessuras iniciais (30 mm e 25 mm) em relação à testemunha (20 mm). Após o retorno parcial às dimensões iniciais, a maior espessura inicial desses corpos de prova densificados termomecânicamente resultou em maior disponibilidade de lume celular, contribuindo para o maior acúmulo de água livre e, conseqüentemente, maior absorção de água em comparação aos corpos de prova da testemunha.

Valores menores de absorção de água são mais apropriados para a utilização da madeira em ambientes com contato direto ou indireto com a água, prevenindo problemas como deformação e redução da durabilidade natural da madeira. Para o período de 2 horas de absorção de água nenhum tratamento diferiu-se da testemunha, pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$) (Figura 19). É possível que isso seja atribuído ao fechamento dos microporos superficiais da madeira e alterações químicas e físicas que tornaram principalmente a superfície da madeira mais hidrofóbica.

O menor valor de absorção de água durante o período de 2 horas observado para o tratamento T170-2, está relacionado com a maior indisponibilidade dos grupos hidroxila (Figura 12), uma vez que esse tratamento apresentou menor umidade de equilíbrio da madeira (Figura 19). Entretanto, essa característica pode ser apenas superficial porque para os períodos de 48 horas e 72 horas esse tratamento apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) e maior absorção de água que a testemunha (Figura 19). Isso ocorreu porque em períodos mais longos de absorção de água as forças internas de densificação da madeira são liberadas e os vasos que foram densificados retornam parcialmente às dimensões iniciais, permitindo maior absorção em água. Outra hipótese para explicação dessa ocorrência é que a densificação pode ter ocasionado microfissuras internas nos corpos de prova. Devido a isso, mesmo que inicialmente a superfície da madeira seja mais hidrofóbica e impeça a entrada de água durante o período de 2h e 24h, à medida que o tempo de imersão aumentou, a água gradualmente penetrou na madeira e preencheu tanto os espaços vazios dos lumes celulares quanto os espaços deixados por essas microfissuras. Isso resultou em maiores médias de absorção de água nos períodos de 48h e 72h. Resultado semelhante a este estudo foi encontrado por Pelit, Budakçi e Sönmez (2016), avaliando a densificação da madeira de *Abies bornmuelleriana* Mattf. e *Populus nigra* L. em que a madeira não densificada apresentou menor absorção em água que as madeiras densificadas. No entanto os autores relataram que ao aplicar tratamento térmico após a densificação da madeira a absorção em água da madeira densificada reduz principalmente em amostras densificadas com alta taxa de densificação (50%).

No período de 24 horas, destaca-se que apenas o tratamento T150-1 apresentou valor estatisticamente maior que a testemunha, conforme teste de Dunett ($p < 0,05$). Esse resultado indica que a madeira tratada dessa forma apresentou desempenho inferior ao da madeira dos demais tratamentos e *in natura*. Vale ressaltar que esse é o tratamento menos agressivo e que a menor temperatura e a menor taxa de densificação contribuíram para a maior absorção de água. Para todos os tempos de absorção de água, o tratamento T150-1 esteve entre os maiores valores

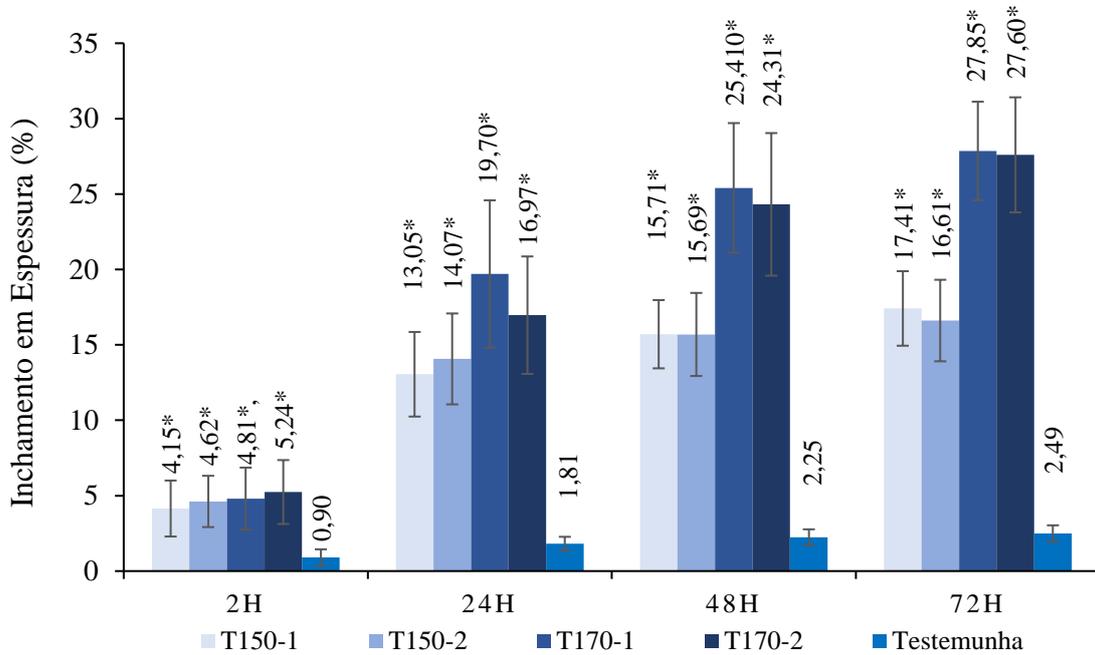
médios observados. Esse efeito pode ter ocorrido por esse tratamento ter a associação da menor temperatura e taxa de densificação, dentre os tratamentos avaliados. A menor taxa de densificação promoveu menor compactação dos poros, enquanto a menor temperatura de tratamento térmico promoveu maior acessibilidade dos grupos hidroxílicos (Figura 12), que ocasionou maiores valores de absorção em água.

Conforme verificado na análise de variância fatorial (Apêndice E) não houve interação significativa entre os fatores para nenhum dos períodos de absorção de água avaliados. Dessa maneira, os fatores foram avaliados de maneira independente. Somente houve significância para a temperatura no tempo de duas horas de absorção de água. Os valores de absorção de água para as amostras tratadas a 150°C e 170°C foram, respectivamente, iguais a 5,80% e 4,38%. Houve redução de 1,42 pontos percentuais dos valores de absorção de água com o aumento da temperatura de tratamento de 150°C para 170°C. Isso pode ser explicado pelo fato de que a temperatura mais elevada possa ter provocado aumento na quantidade de reações de desidratação das hemiceluloses. Essas reações reduzem a disponibilidade dos grupos -OH para se ligarem com a água, conforme confirmado na análise de FTIR em que houve redução da intensidade de absorbância do pico 3 350 cm¹ (Figura 12 – pico A). No entanto, esse comportamento não foi observado para os tempos de 24h, 48h e 72h de absorção de água analisados, em que não houve significância dos demais fatores. Para esses períodos os valores médios de absorção de água foram, respectivamente, iguais a 25,75%, 38,41% e 45,87%.

Conforme observado na Figura 19, a madeira de teca densificada termomecanicamente para todos os tratamentos não deve ser submersa em água durante períodos superiores a 24 horas. No entanto, é importante observar que esse ensaio simula a madeira em condições rigorosas de submersão completa em água, e na prática dificilmente a madeira utilizada para pisos ficará exposta a essa condição durante tempo prolongado. Vale destacar que a madeira submersa em água durante duas horas apresentou resultados semelhantes a madeira *in natura*.

Os valores médios e desvio-padrão do inchamento em espessura da madeira de teca densificada termomecanicamente e da testemunha estão apresentados na Figura 20.

Figura 20 - Valores médios e desvio-padrão do inchamento em espessura nos períodos de 2h, 24h, 48h e 72h da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecânicamente e testemunha.



Em que: *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha.
Fonte: Da autora (2023).

O inchamento em espessura da testemunha para todos os períodos avaliados foi menor e diferiu-se significativamente dos tratamentos de densificação termomecânica pelo teste de Dunnett a 5% de significância (Figura 20). Quanto menor o valor de inchamento em espessura da madeira melhor ela será para uso em ambientes em contato com umidade elevada. Assim, todos tratamentos apresentaram resultados inferiores à testemunha em todos os períodos avaliados, demonstrando que a madeira densificada pode retornar parcialmente as suas dimensões originais quando exposta a umidade, conforme relatado por Navi e Sandberg (2012). Isso ocorre principalmente devido a liberação das tensões da parede celular ocasionadas pelo processo de densificação.

A densificação da madeira é um processo que requer temperaturas superiores à transição vítrea dos componentes da parede celular, permitindo que essas sejam comprimidas sem a ocorrência de rupturas. Assim, ao expor a madeira densificada a fontes de umidade, há dois tipos de inchamento, um reversível, devido à natureza higroscópica da madeira, e outro irreversível, resultado do retorno parcial ou total da madeira densificada às suas dimensões originais. É possível perceber que para o mesmo tratamento o inchamento em espessura

aumentou à medida que o tempo de submersão na água foi prolongado. E que os tratamentos a temperatura de 150°C apresentarem menor inchamento em espessura que os tratamentos a 170°C, mesmo que para o período de 2h essa diferença tenha sido menor. Além disso, é importante destacar que a espessura dos corpos de prova densificados a 24% de taxa de densificação no período de 72h praticamente retornou a espessura inicial antes da densificação, com espessura média igual a 24,60 mm. Já os corpos de prova densificados a 36,7% não retornaram totalmente a espessura anteriormente a densificação, com valor médio de espessura igual a 24,30 mm.

Conforme verificado na análise de variância fatorial (Apêndice E) não houve interação significativa do fator temperatura com o fator taxa de densificação em nenhum dos períodos avaliados. Para o período de duas horas também não houve significância dos fatores temperatura e taxa de densificação avaliados independentemente. Para esse período, o valor médio de inchamento em espessura foi baixo, 4,71%. A migração dos extrativos hidrofóbicos para a superfície da madeira pode ter contribuído para esse resultado, já que podem ter atuado como uma barreira, impedindo a entrada de água inicial na estrutura da madeira. Isso é justificável porque a absorção de água pode desencadear a liberação das tensões internas da madeira e, conseqüentemente, contribuir para o aumento do inchamento em espessura.

Não foi verificada significância da taxa de densificação para o inchamento em espessura. Esse resultado é diferente do observado em literatura de que a densificação influencia diretamente a estabilidade dimensional, com tendência de maiores inchamentos em amostras com maiores taxas de densificação (Unsal *et al.*, 2011; Cai; Ding; Yang, 2012).

Houve efeito significativo para o fator temperatura independente no período de 24h, 48h e 72h (Apêndice E). Foi observado diferença entre as médias dos tratamentos tratados a 150°C e 170°C. Os valores médios de inchamento em espessura para a temperatura de tratamento 150°C, no período de 24 horas, foi de 13,55%; no período de 48 horas, foi de 15,70%; e no período de 72 horas, foi de 17,01%. Por outro lado, para a temperatura de tratamento a 170°C, esses valores foram mais elevados: 18,33% para 24 horas, 24,86% para 48 horas e 27,72% para 72 horas. Os maiores valores de inchamento em espessura observados para os tratamentos a 170°C não eram esperados, uma vez que em maiores temperaturas é esperado ocorrer maior redução dos grupos OH livres que se ligam com moléculas de água (Figura 12).

Os valores médios e desvio-padrão do *Set recovery* da madeira de teca densificada termomecanicamente e da testemunha estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores médios e desvio-padrão do *Set Recovery* da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente.

<i>Set recovery (%)</i>	
Tratamento	Média
T150-1	33,10 ^(40,67)
T150-2	11,69 ^(34,90)
T170-1	44,15 ^(42,93)
T170-2	13,36 ^(36,78)

Em que: *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha; (...) desvio-padrão

Fonte: Da autora (2023).

Os maiores *set recovery* foram observados para os tratamentos T150-1 e T170-1 (Tabela 9), tratamentos densificados na menor taxa de densificação (24%). Maiores *set recovery* representam retorno parcial ou total da madeira as dimensões iniciais anteriormente à densificação quando a madeira é submetida a elevada umidade ou ciclos de imersão em água e secagem, resultando em maior instabilidade dimensional. Vale ressaltar que maiores valores de *set recovery* são indesejados para a utilização da madeira em usos que requerem maior estabilidade dimensional, como é o caso dos pisos. De maneira geral os dados apresentaram elevado desvio-padrão, o que pode ser resultado de liberação desigual das tensões internas da madeira resultantes do processo de densificação dos corpos de prova.

Não houve interação dos fatores temperatura e taxa de densificação para o *set recovery* (Apêndice E). Houve significância para o fator taxa de densificação avaliado independentemente. O *set recovery* observado para as taxas de densificação 24% e 36,7% foram iguais a 38,2% e 12,52%, respectivamente, ou seja, uma redução de 26,1 pontos percentuais. Esse mesmo comportamento também foi observado por Laine *et al.* (2016) e Pelit, Budakçi e Sönmez (2016). Esse resultado pode ter ocorrido porque de acordo com a literatura, em uma taxa de compressão elevada, o colapso e a ruptura celular são maiores e os lumes celulares são parcialmente fechados (Ahmed *et al.* 2013; Pelit, 2014; Bekhta *et al.* 2015) e isso pode impedir que as células retornem à sua forma anterior (Pelit; Budakçi; Sönmez, 2016). Além disso, a densificação a 36,7% pode ter ocasionado maior quebra das ligações covalentes (entre hemiceluloses e lignina) e das ligações de hidrogênio (entre hemiceluloses e celulose) e com isso as tensões internas acumuladas nas regiões como microfibrilas cristalinas durante a densificação tenham sido amenizadas, reduzindo o *set recovery* (Laine *et al.* 2013).

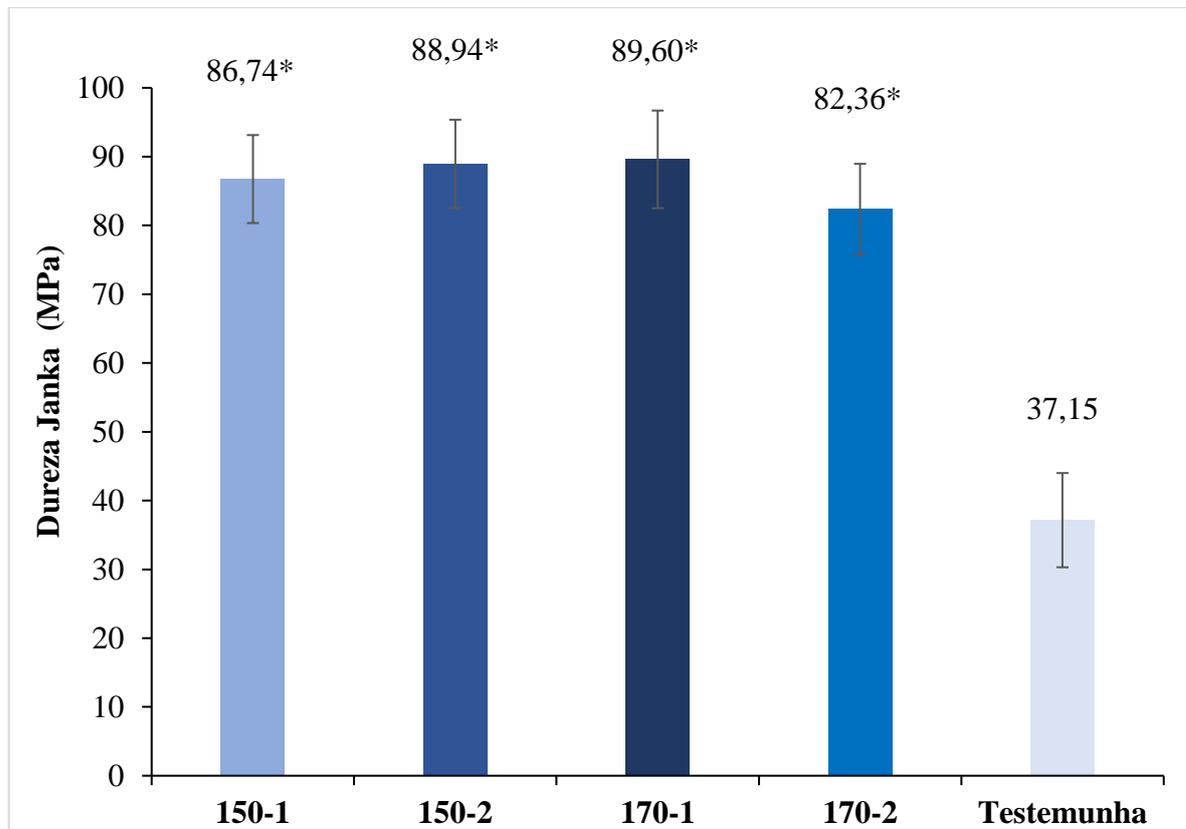
Durante a densificação termomecânica, as regiões cristalinas da celulose são deformadas principalmente de forma elástica, cuja energia da deformação elástica é armazenada na parede celular (Laine *et al.* 2013). A estrutura da madeira é forçada a uma nova conformação,

mas as ligações covalentes e as ligações de hidrogênio não são quebradas (Laine *et al.* 2013). Portanto, a espessura da peça de madeira densificada pode ser recuperada quando molhada novamente ou aquecida devido à liberação da energia da deformação elástica. Contudo, ocorrem deformações plásticas sob cargas muito altas (Laine *et al.* 2013). No presente estudo, apesar da carga aplicada nos tratamentos ter sido a mesma (5,3 MPa), as taxas de densificação foram diferentes, em que maiores taxas de densificação podem estar associadas a maiores deformações plásticas. Nesse caso, se as ligações forem rompidas durante a compressão, as tensões internas são liberadas e o *set recovery* é reduzido.

5.5 Dureza Janka

Os valores médios e desvio-padrão dureza Janka da madeira de teca densificada termomecanicamente e da testemunha estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Valores médios e desvio-padrão da Dureza Janka da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.



Em que: *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha.
Fonte: Da autora (2023).

A dureza Janka da testemunha diferiu-se significativamente dos tratamentos pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). A madeira de teca *in natura* (testemunha) foi classificada como de baixa dureza (Tabela 5). Já as madeiras densificadas termomecânicamente apresentaram classe de dureza alta (Tabela 5). A dureza Janka da madeira *in natura* foi inferior à observada por Blanco-Flórez *et al.* (2014) ao avaliar a madeira de teca de 13 anos de idade, cujo valor foi de 46,6 MPa e Silva *et al.* (2021), ao avaliar a madeira de teca de 17 anos, cujo valor médio igual a 58,66 MPa.

Houve aumento de 121,69% a 141,18% nos valores de dureza Janka com a aplicação da densificação termomecânica da madeira em relação à testemunha, respectivamente, para os tratamentos T170-2 e T170-1. Em média, com a aplicação do tratamento de densificação, a dureza Janka aumentou aproximadamente 135%. Esse aumento na dureza é positivo, já que superfícies mais duras são menos susceptíveis a deformações permanentes quando aplicadas cargas sobre o piso (Sydor; Pinkowski; Jasińska, 2020). Outros autores também observaram aumento da dureza com a aplicação de tratamentos de densificação da madeira (Pertuzzatti *et al.*, 2018; Laskowska; 2020; Wang *et al.*, 2021).

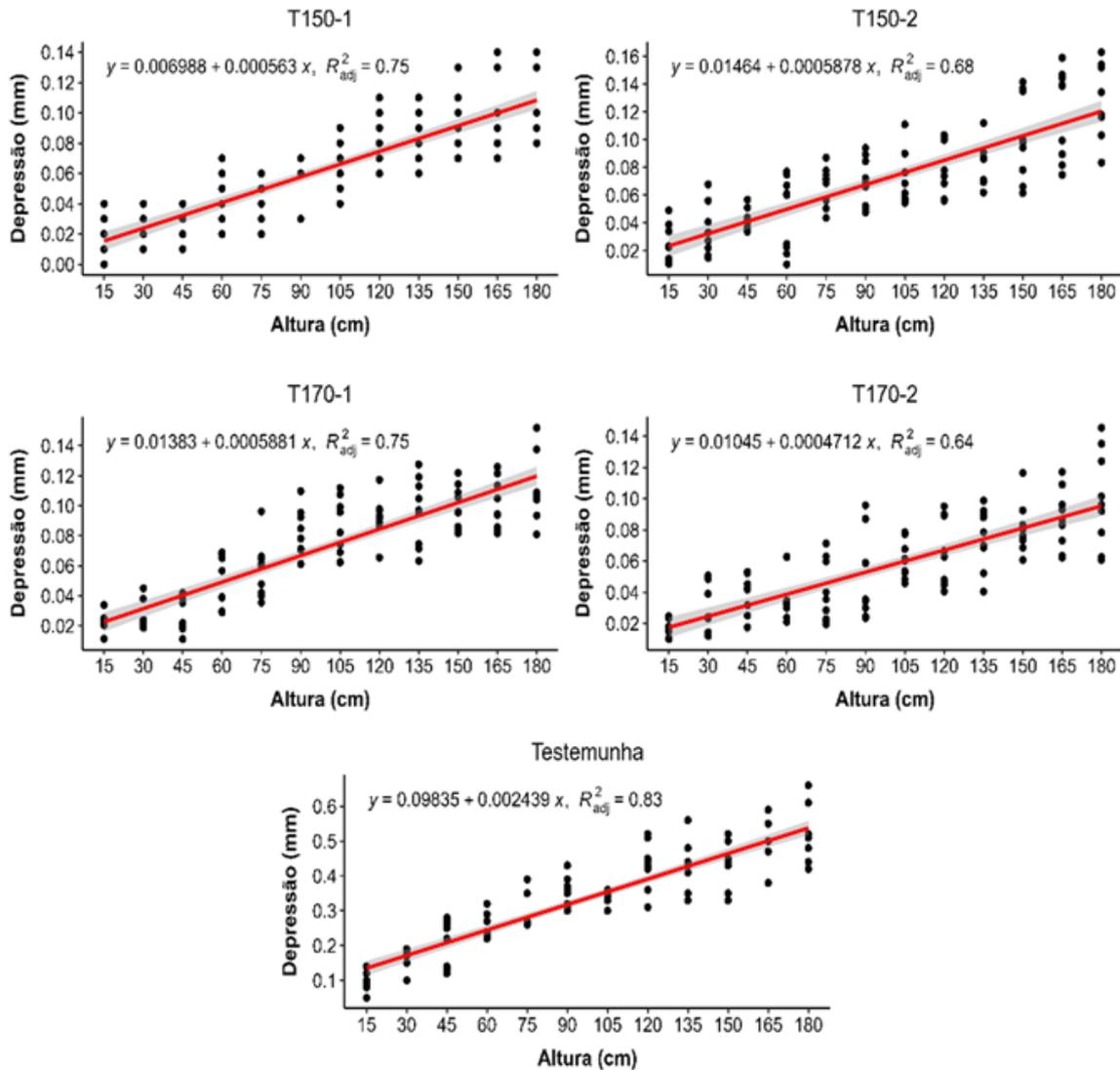
Não foi observada interação entre os fatores temperatura e taxa de densificação para a dureza Janka (Apêndice F). Dessa forma esses resultados, levam a conclusão de que considerando essa propriedade mecânica de maneira isolada, é preferível utilizar o tratamento menos agressivo de taxa de densificação e de temperatura (150-1), já que os valores de dureza Janka não apresentam diferença significativa. Ao escolher o tratamento de menor intensidade é possível economizar energia durante o processo de densificação termomecânica e reduzir quantidade de madeira utilizada para a confecção dos pisos, por meio da redução da espessura dos corpos de prova.

5.6 Ensaios de simulação de pisos em serviço

5.6.1 Queda da esfera de aço

As equações de regressão para o ensaio de queda da esfera de aço para as madeiras densificadas termomecânicamente e *in natura* estão apresentadas na Figura 22.

Figura 22 - Equação ajustada e relação entre a depressão causada pela queda da esfera de aço e as alturas de queda para as madeiras de teca de 15 anos densificadas termomecanicamente e testemunha.



Fonte: Da autora (2023).

O índice de endentação observado na altura de 180 cm foi de 0,338; 0,108; 0,120; 0,120 e 0,095, respectivamente, para a testemunha, T150-1, T150-2, T170-1 e T170-2. Quanto menor o índice de endentação maior é a resistência da madeira a depressões ocasionadas pela queda de objetos sob a superfície, logo o processo de densificação termomecânica, proporcionou melhora na qualidade da madeira de teca juvenil.

O índice de endentação encontrado para a testemunha foi menor ao relatado para a madeira de teca de 13 anos de idade, estudado por Blanco-Flórez *et al.* (2015), com valor igual

a 0,55. Com a aplicação da densificação termomecânica houve redução de 68,05% (T170-2) a 64,50% (T150-2 e T170-1) nos valores do índice de endentação em relação à madeira *in natura* (testemunha). O índice de endentação observado para os tratamentos foi inferior aos observados para madeiras tropicais, normalmente utilizadas para pisos: cumaru (0,195), ipê (0,195), jatobá (0,316), muiracatiara (0,339) e sucupira- preta (0,468) avaliados por Costa *et al.* (2021). O índice de endentação também foi inferior as madeiras de cumaru (0,186), ipê (0,241), sucupira (0,390) e amêndola (0,537) avaliadas por Oliveira *et al.* (2019a).

O maior índice observado para a madeira de *in natura* (testemunha) está relacionado com o menor valor de densidade superficial (Figura 14), menor dureza Janka (Figura 21) e maior umidade de equilíbrio da madeira (Figura 18) observado para a testemunha. Por outro lado, os menores índices de endentação observados para a madeira de teca densificada termomecanicamente estão associados com a maior densidade superficial (Figura 14), maior dureza Janka (Figura 21) e menor umidade de equilíbrio da madeira (Figura 18) promovida com o tratamento de densificação termomecânica da madeira. A relação entre o aumento da densidade e o aumento da resistência a endentação causada pela queda da esfera verificada nesse estudo também é relatada em outros pesquisas (Martins *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2019a; Costa *et al.*, 2021).

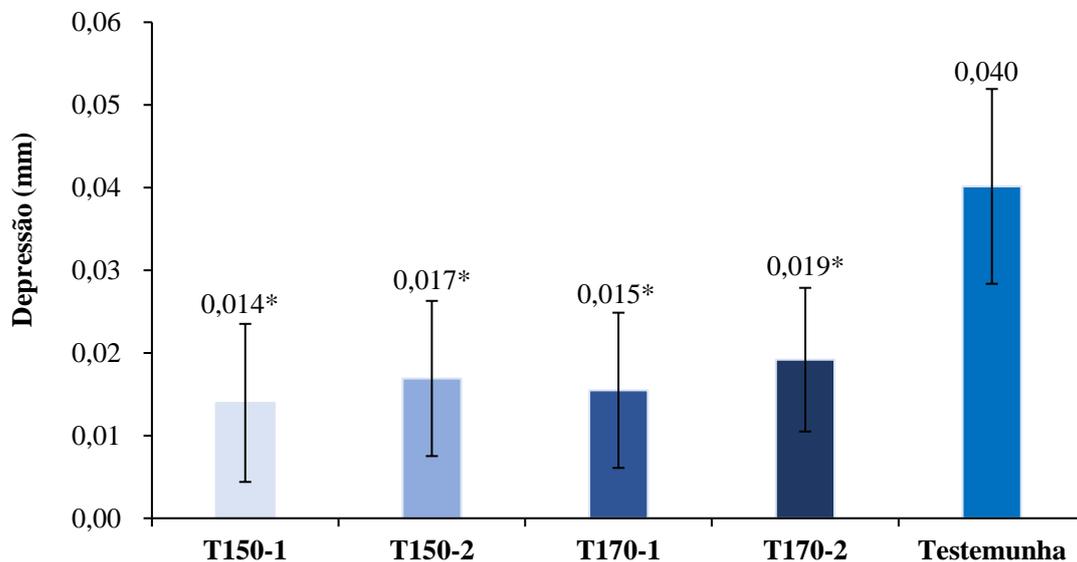
De maneira geral, é importante destacar que a madeira densificada termomecanicamente, cuja densidade variou de 0,69 g.cm⁻³ a 0,79 g.cm⁻³ (Figura 17), apresentou menores índices de endentação que as madeiras frequentemente utilizadas da indústria de pisos, que possuem elevados valores de densidade e dureza. Portanto, a aplicação dos tratamentos de densificação foi capaz de promover melhora na resistência mecânica à queda de objetos.

De acordo com classificação proposta por Oliveira *et al.* (2019a) apresentada na Tabela 1, a testemunha foi classificada como de baixa qualidade, portanto, indicada para ambientes em que não ocorram quedas eventuais de objetos na superfície do piso. Enquanto, as madeiras densificadas termomecanicamente foram classificadas como de alta qualidade, desse modo, são indicadas para instalação como pisos em ambientes de tráfego moderado e intenso, em que a queda de objetos sobre a superfície dos pisos é comum, como em indústrias, shoppings, áreas comerciais, e de lazer.

5.6.2 Ensaio de endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas

Os valores médios e desvio-padrão para o ensaio de endentação de cargas aplicadas em pequenas áreas, após 100 viagens, da madeira de teca densificada termomecanicamente e da testemunha estão apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Valores médios e desvio-padrão das endentações causadas por cargas aplicadas em pequenas áreas na madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.



Em que: *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha.

Fonte: Da autora (2023).

Houve diferença significativa pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$) entre os valores médios de depressão observados para a testemunha e as madeiras densificadas termomecanicamente. A testemunha apresentou a maior depressão, portanto foi considerada menos resistente. A depressão observada para a testemunha foi inferior ao relatado para a madeira de teca de 13 anos de idade, cujo valor foi igual a 0,1 mm, estudada por Blanco-Flórez *et al.*, (2015) e próximo aos valores de depressão observados para as espécies cumaru, muiracatiara (Costa *et al.*, 2021).

Houve redução de 52,5% a 65% do valor de depressão das madeiras densificadas termomecanicamente em relação à testemunha. Essa redução está principalmente associada ao aumento da densidade superficial com a aplicação dos tratamentos de densificação

termomecânica (Figura 14), uma vez que altas densidades proporcionaram maiores resistência e dureza, conforme relatado por Oliveira *et al.* (2019a), refletindo-se na resistência de carga aplicada. Além disso, os tratamentos de densificação termomecânica também promoveram a redução da umidade de equilíbrio da madeira (Figura 18), que é uma propriedade que possui relação inversa com a resistência mecânica. Portanto, essa redução na umidade de equilíbrio pode ter contribuído para que a madeira apresentasse maior resistência.

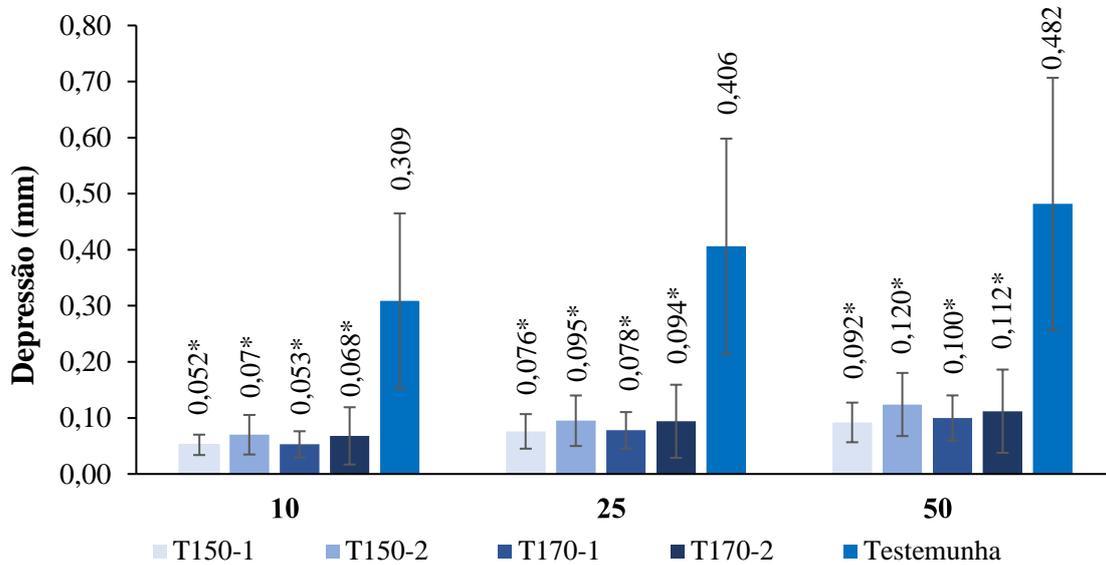
A depressão ocasionada no ensaio de endentação de cargas aplicadas em pequenas áreas foi próxima ao observado para as espécies de sucupira (Oliveira *et al.*, 2019a), ipê e jatobá (Costa *et al.*, 2021), que são espécies muito utilizadas na indústria de pisos sólidos. Vale destacar que essas espécies apresentam maiores densidade que a madeira densificada termomecanicamente. Isso, permite inferir que o aumento da resistência mecânica ocasionada pelo tratamento pode estar relacionado à maior densificação da camada superficial da madeira, tornando-a mais resistente superficialmente (Figura 14).

Não houve interação entre os fatores temperatura e taxa de densificação da madeira no ensaio do arraste da carga rolante, conforme verificado no Apêndice G. Também não houve significância para os fatores avaliados isoladamente. O valor médio de depressão observada para as madeiras densificadas termomecanicamente foi igual a 0,016 mm. A testemunha apresentou qualidade baixa, portanto, é indicada para pisos apenas para locais onde o tráfego de pessoas é baixo como residências e pequenos escritórios, enquanto as madeiras densificadas termomecanicamente apresentaram qualidade intermediária conforme proposto por Oliveira *et al.* (2019a), podendo ser utilizadas como pisos em locais com tráfego moderado e intenso de pessoas, como por exemplo, em restaurantes, lojas, bancos e shopping.

5.6.3 Ensaio de carga rolante

Os valores médios e desvio-padrão para o ensaio da resistência da carga rolante, após 10, 25 e 50 viagens, da madeira de teca densificada termomecanicamente e da testemunha estão apresentados na Figura 24.

Figura 24 – Valores médios e desvio-padrão das endentações causadas no ensaio de carga rolante na madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecânicamente e testemunha.



Em que: *diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Dunnett em relação à testemunha.
Fonte: Da autora (2023).

As madeiras densificadas termomecânicamente demonstraram maior resistência ao arraste de objetos, pois apresentaram as menores depressões no ensaio de carga rolante, e diferiram estatisticamente da testemunha pelo teste de ($p < 0,05$), conforme verificado na Figura 24. Quanto menor for a depressão observada, maior será a resistência aos esforços ocasionados durante o uso da madeira como pisos.

Foi observada redução nos valores de depressão em relação à testemunha de aproximadamente 80% para todas as viagens. Essa redução da depressão está relacionada com o aumento da resistência mecânica da madeira submetida ao processo de densificação termomecânica ocasionada principalmente pelo aumento da densidade superficial (Figura 14), da dureza (Figura 21) e pela redução da umidade de equilíbrio (Figura 18).

O valor de depressão observado para a testemunha na viagem 10 foi semelhante ao observado por Blanco-Flórez *et al.* (2015) para a madeira de teca de 13 anos. Já as depressões notadas nesse estudo nas viagens 25 e 50 foram maiores que a depressão observada pelos mesmos autores, que foram respectivamente iguais a 0,37 mm e 0,44 mm. No entanto, a madeira de teca de 13 anos também foi considerada como de baixa qualidade por apresentar depressões superiores a 0,301 mm.

Não houve interação entre os fatores temperatura e taxa de densificação da madeira para as viagens 10, 25 e 50 do ensaio do arraste da carga rolante, conforme verificado no Apêndice

G. Também não houve significância para os fatores avaliados independentemente. Os valores médios dos tratamentos para a viagem de 10, 25 e 50 foi igual a, respectivamente, 0,061 mm, 0,086 mm e 0,106 mm. O valor observado para todos os tratamentos foi baixo, demonstrando que a densificação termomecânica foi efetiva em melhorar a qualidade da madeira de teca juvenil, tornando-a mais resistente ao arraste de objetos sobre a superfície dos pisos.

Ao comparar os resultados verificados para as madeiras densificadas do presente estudo com o trabalho de Oliveira *et al.*, (2019a), foi observado que na viagem 10 a endentação foi maior que a verificada para madeira de ipê (0,035 mm) e semelhante a madeira de cumaru (0,066 mm). Para a viagem 25, a endentação foi maior que a madeira de ipê (0,070 mm) e menor para a madeira de cumaru (0,093 mm). Para a viagem 50 a endentação verificada para as madeiras densificadas termomecanicamente foi semelhante as madeiras de ipê (0,105 mm) e cumaru (0,11 mm). Para as viagens 10, 25 e 50 foi observada menor endentação que as espécies sucupira (0,093 mm, 0,156 mm e 0,458 mm) e amêndola (0,271 mm, 0,383 mm e 0,458 mm).

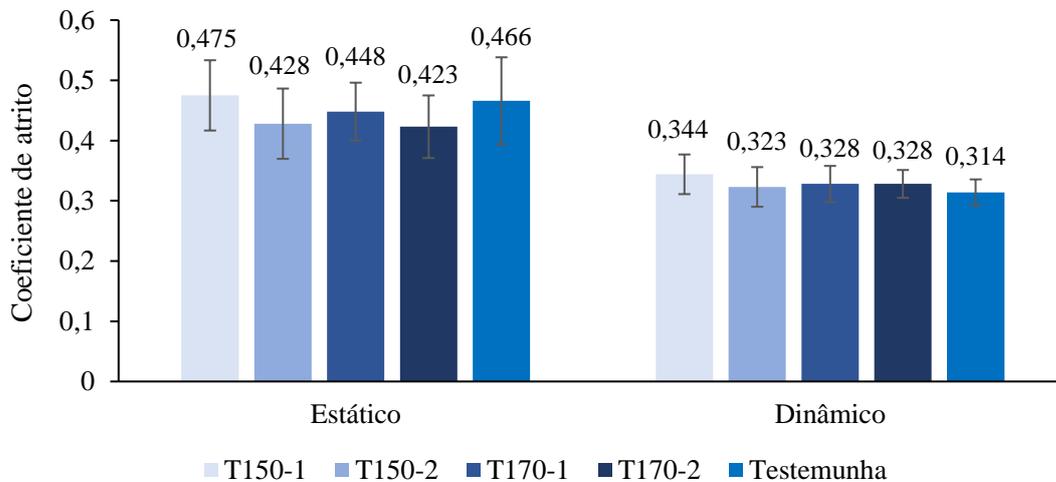
Considerando estudo de espécies utilizadas para pisos elaborado por Costa *et al.* (2021) observa-se que a depressão na viagem 10 de todos os tratamentos foi maior que a observada para as madeiras de ipê (0,042 mm) e cumaru (0,035 mm), semelhante a madeira de jatobá (0,056 mm). Em relação as viagens 25 e 50 a depressão observada nos tratamentos de densificação termomecânica foi maior que as madeiras de ipê (0,058 mm e 0,075 mm), cumaru (0,063 mm e 0,079 mm) e jatobá (0,068 mm e 0,077 mm). Já a endentação observada para as madeiras densificadas nas viagens de 10, 25 e 50 foi menor que as observadas para as espécies de muiracatiara (0,127 mm, 0,178 mm e 0,201 mm) e sucupira-preta (0,142 mm, 0,214 mm e 0,246 mm).

Constatou-se que houve aumento na depressão conforme o aumento do número de viagens da carga rolante. De acordo com classificação proposta por Oliveira *et al.* (2019a), a testemunha foi classificada como de baixa qualidade, portanto, indicada para ambientes em que o tráfego é leve, como em usos residenciais. As madeiras densificadas termomecanicamente foram classificadas como de alta qualidade, desse modo, são indicados para instalação como pisos em ambientes com tráfego intenso, em que o arraste de objetos pesados é comum como em áreas comerciais e industriais.

5.6.4 Ensaio de atrito estático e dinâmico

Os valores médios e desvio-padrão dos coeficientes de atrito estático e atrito dinâmico da madeira de teca densificada termomecanicamente e da testemunha estão apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Valores médios e desvio-padrão dos coeficientes de atrito estático e dinâmico da madeira de teca de 15 anos de idade densificada termomecanicamente e testemunha.



Fonte: Da autora (2023).

Não houve diferença significativa entre as médias do coeficiente de atrito estático e atrito dinâmico entre a testemunha e as madeiras densificadas termomecanicamente pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$). Os menores valores de atrito estático e atrito dinâmico indicam superfície mais lisa, em que menor esforço é necessário para iniciar o movimento de caminhar (estático) e o movimento de continuar caminhando (dinâmico) sobre o piso, ou seja, superfície mais escorregadia. No entanto, de acordo com classificação de Oliveira *et al.* (2019a) tanto a testemunha quanto as madeiras densificadas termomecanicamente apresentaram alta qualidade, porque os valores observados foram superiores a 0,181, portanto, não são considerados escorregadios.

Os valores de atrito estático e atrito dinâmico observados para as madeiras densificadas termomecanicamente e *in natura* foram superiores às madeiras de cumaru, ipê, sucupira e amêndola (Oliveira *et al.*, 2019a), teca de 13 anos (Blanco-Flórez *et al.*, 2015) e eucalipto (Padilha *et al.*, 2006; Martins *et al.*, 2013). Os coeficientes de atrito dinâmico das madeiras

densificadas termomecânicamente e *in natura* foram maiores em relação às espécies ipê, jatobá, muiracatiara e sucupira-preta e menor que a madeira de cumaru, avaliadas por Costa *et al.* (2021). No entanto, os coeficientes de atrito estático foram menores do que os observados para essas mesmas madeiras.

Não houve interação significativa entre os fatores temperatura e taxa de densificação para os coeficientes de atrito estático e dinâmico das madeiras densificadas termomecânicamente. No entanto, para o atrito estático houve significância do fator independente taxa de densificação (Apêndice G). A maior densificação tornou a superfície da madeira mais regular e lisa, diminuindo o coeficiente de atrito estático. Isso está associado principalmente ao maior esmagamento das estruturas da madeira como as fibras, raios e vasos em maiores taxas de densificação. Os valores do coeficiente de atrito estático das madeiras densificadas a 24% e 36,7% foram, respectivamente, iguais a 0,461 e 0,425.

Embora os valores médios dos tratamentos não tenham apresentado diferenças significativas em relação à testemunha, a avaliação visual revelou que as madeiras densificadas termomecânicamente exibiram uma superfície mais lisa e uniforme, assemelhando-se à textura obtida após o lixamento com lixa de granulometria fina e a aplicação de algum produto de acabamento. Em contrapartida, as madeiras *in natura* demonstraram, visualmente, uma superfície menos lisa e uniforme. Esse aspecto mais liso das madeiras densificadas termomecânicamente foi confirmado na análise de rugosidade da madeira em que todos os tratamentos apresentaram redução de mais de 50% dos parâmetros de rugosidade em relação a testemunha (Figura 15). Assim, o ensaio de atrito estático e dinâmico não se mostrou eficiente para estimar o quão liso e escorregadio a madeira para piso se torna após a densificação termomecânica da madeira.

De maneira geral, a densificação termomecânica promoveu melhora na qualidade da madeira de teca juvenil para a utilização como pisos maciços. Todos os tratamentos de densificação termomecânica da madeira apresentaram resultados semelhantes para os ensaios de simulação de pisos em serviço, com qualidade de resistência variando de intermediária a alta conforme o ensaio avaliado. A madeira juvenil de teca densificada termomecânicamente apresentou qualidade semelhante ou até superior as madeiras de espécies tropicais amplamente utilizadas na indústria de pisos. Esse fato demonstra que esse tratamento pode ser promissor para agregar valor na indústria de PMVA para a madeira juvenil.

6 CONCLUSÃO

De maneira geral conclui-se que o processo de densificação termomecânica da madeira de *Tectona grandis* de 15 anos apresentou viabilidade para a utilização como piso sólido por promover melhoria na maioria das propriedades tecnológicas da madeira.

A madeira *in natura* de *Tectona grandis* de 15 anos apresentou maior rugosidade, molhabilidade e umidade de equilíbrio em relação à madeira densificada termomecanicamente. Além disso, apresentou densidade moderada, baixa dureza e baixa resistência mecânica aos ensaios de simulação de pisos maciços. Devido a essas características a madeira de teca juvenil *in natura* deve ser utilizada para pisos apenas em ambientes de tráfego baixo.

Após os tratamentos de densificação termomecânica nas combinações de temperatura (150°C e 170°C) e taxas de densificação (24% e 36,7%) a madeira de *Tectona grandis* de 15 anos apresentou alterações químicas e físicas que proporcionaram melhoria na qualidade da superfície como redução da rugosidade e da molhabilidade da madeira, o escurecimento da cor, aumento da densidade superficial, redução da umidade de equilíbrio, aumento da dureza e redução da endentação ocasionada nos ensaios de simulação de pisos em serviço.

Ao considerar a temperatura, os tratamentos avaliados a 170°C demonstraram alterações químicas mais significativas na análise de FTIR, variação de cor mais pronunciada, ângulos de contato mais elevados e menor umidade em equilíbrio. Quanto à taxa de densificação, os tratamentos densificados a 36,7% apresentaram maiores valores de densidade, menor *set recovery*. Para as propriedades mecânicas de dureza Janka e ensaios de simulação de pisos em serviço todos os tratamentos de densificação termomecânica apresentaram resultados semelhantes. Dessa maneira, os tratamentos T170-1 e T170-2 destacaram-se de maneira geral por atenderem melhor as necessidades requeridas para a utilização da madeira para pisos. Entretanto ao considerá-los é preferível dar preferência ao tratamento T170-1 por demandar menor volume de material e menor energia para a densificação da madeira.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos neste estudo e com o propósito de contribuir para investigações futuras nesse campo, sugere-se as seguintes orientações:

a) Avaliar a qualidade da madeira de alburno juvenil submetida à densificação termomecânica e compará-la em relação às propriedades tecnológicas com a madeira de cerne adulta.

b) Realizar testes a temperaturas e taxas de compactação mais baixas, a fim de explorar uma gama mais ampla de condições. Além de também avaliar a densificação da madeira sem a aplicação de temperatura.

c) Investigar a viabilidade econômica e os aspectos processuais ao aplicar o processo em escala industrial.

d) Conduzir ensaios para avaliar o desempenho da madeira densificada termomecanicamente em colagens laterais e na aplicação de acabamentos superficiais.

e) Quantificar e identificar os componentes da madeira, como açúcares dos polissacarídeos (celulose e hemiceluloses), lignina e extrativos totais.

Essas recomendações visam aprofundar o entendimento da densificação termomecânica da madeira e explorar potenciais aplicações e melhorias em diferentes contextos.

REFERÊNCIAS

ACUÑA, L. *et al.* Modelling of impact falling ball test response on solid and engineered wood flooring of two *Eucalyptus* species. **Forests**, v. 11, n. 9, p. 933-951, 2020.

AHMED, S. A *et al.* Anatomical properties and process parameters affecting blister/blow formation in densified European aspen and downy birch sapwood boards by thermo-hygro-mechanical compression. **Journal of Materials Science**, v. 48, n. 24, p. 8571-8579. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7679-9>

ALBUÊS, T. A. S. *et al.* Quality of *Tectona grandis* for sawn wood production. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v. 26, p. 1-16, 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **ASTM D724-99**. Standard Test Method For Surface Wettability Of Paper (Angle-Of-Contact Method), 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **ASTM D 1037-12**. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **ASTM D 2395-14**. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials Annual Book of ASTM Standards. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **D2244-23**. Standard practice for calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates. 2023

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **ASTM D2394-17**. Standard Methods for Simulated Service Testing of Wood and Wood-Base Finish Flooring Test. 2017.

ANDRADE, A. de; JANKOWSKY, I. P. **Pisos de madeira: características de espécies brasileiras**. Piracicaba: ANPM, 2015. 184p.

ANDRADE, A.de; GALINA, I. C. M.; JANKOWSKY, I. P. **Guia básico para instalação de pisos de madeira**. 2. ed. Piracicaba: ANPM, 2015.

APPANAH, S. *et al.* **Forest landscape restoration for Asia-Pacific forests**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Regional Office for Asia and the Pacific, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR ISO 4287**. Especificações geométricas dos produtos (GPS) – rugosidade: método do perfil – termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ARÉVALO, J. J. P.; MARTÍ, B.V. Characterization of teak pruning waste as an energy resource. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 1, p. 241-250, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00387-3>

ARRUDA, L. M. **Modificação termomecânica da madeira de amescla (*Trattinnickia burseraefolia* (mart.) willd.): efeito sobre as propriedades de lâminas e compensados.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

AYATA, U. *et al.* Effect of heat treatment (ThermoWood) on some surface properties of parquet beech (*Fagus orientalis* Lipsky.) with different layers of UV system applied. **BioResources**, v. 12, n. 2, p. 3876-3889, 2017.

BAHANAWAN, A. *et al.* Comparison of physico-chemical and thermo-mechanical properties of sungkai (*Peronema canescens* Jack.), sengon (*Falcataria moluccana* (Miq.) Barneby & JW Grimes), and teak (*Tectona grandis* Lf) wood veneers. **Wood Material Science & Engineering**, p. 1-11, 2023.

BALL, J. B.; PANDEY, D.; HIRAI, S. **Global Overview of Teak Plantations.** *In:* Regional Seminar Site, Technology and Productivity of Teak Plantations, Chiang Mai, Thailand. 1999.

BATISTA, D. C. Retificação térmica, termorretificação, tratamento térmico, tratamento com calor ou modificação térmica?. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 463-480, 2019.

BEKHTA, P. *et al.* Effect of thermomechanical densification on surface roughness of wood veneers. **Wood Material Science & Engineering**, v. 9, n. 4, p. 233-245, 2014.

BEKHTA, P., *et al.* Effects of short-term thermomechanical densification on the structure and properties of wood veneers, **Wood Material Science and Engineering**, 2015. <https://doi.org/10.1080/17480272.2015.1009488>

BENEDETTI, V. **Caracterização da madeira de teca plantada em diferentes idades e regiões para produção de piso.** Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2018.

BHAT K. (1999) Is fast grown teak inferior in wood quality? —An appraisal: from plantations of low input management. **Wood News** 8:27–31

BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, v. 34, n. 6, p. 517-532, 2001.

BLANCO-FLÓREZ, J. *et al.* Characterization of young wood *Tectona grandis* L. f. planted in Brazil. **Madera y Bosques**, v. 20, n. 1, p. 11-20, 2014.

BLANCO-FLOREZ, J. *et al.* Simulation in service of young teak wood floors. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, p. 1048-1060, 2015.

BLOMBERG, J.; PERSSON, B.; BEXELL, U. Effects of semi-isostatic densification on anatomy and cell-shape recovery on soaking. **Holzforschung**, v. 60, n. 3, p. 322–331, 2006. <https://doi.org/10.1515/HF.2006.052>

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BSI. **BS 373: 1957:** Method of Testing Small Clear Specimens of Timber. 1957.

BRITO, T. M. *et al.* Resistance to biodeterioration of thermally modified *Eucalyptus grandis* and *Tectona grandis* short-rotation wood. **Wood Material Science & Engineering**, v. 18, n. 1, p. 3-10, 2023.

BROCCO, V. F. *et al.* Potencial dos extratos de cerne de teca como preservativo natural de madeira. **Journal of Cleaner Production** v. 142, p. 2093-2099, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.074>

BUDHE, S. *et al.* Effects of heat treatment on the behavior of teak wood adherends bonded joints. **Applied Adhesion Science**, v. 8, p. 1-10, 2020.

CADEMARTORI, P. H. G. *et al.* Physical and mechanical properties and colour changes of fast-growing gympie messmate wood subjected to two-step steam-heat treatments. **Wood Material Science & Engineering**, v. 9, n. 1, p. 40-48, 2013a.

CADEMARTORI, P. H. G. *et al.* Thermal modification of *Eucalyptus grandis* wood: variation of colorimetric parameters. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v. 15, n. 1, p. 57-64, 2013b.

CAI, J; DING, T.; YANG, L. Dimensional Stability of Poplar Wood after Densification Combined with Heat Treatment. **Applied Mechanics and Materials**, v. 152-154, p. 112-117, 2012.

CAMARGOS, J. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, nº 71, set. 2001.

CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro *et al.* **Rugosidade superficial: conceitos e princípios de medição**. 1996.

CARVALHO, D, E. *et al.* Colour changes and equilibrium moisture content on thermomechanical densified wood. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, 2021.

CAVINATO, C. D.; POLETTO, M. Kinetic analysis of thermal degradation of *Cedrela odorata*, *Marmaroxylon racemosum* and *Tectona grandis* from timber industry. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 23, 2021. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100446>

COSTA, A. C. S. *et al.* Qualidade de Pisos Maciços de Madeiras Tropicais. **Revista Árvore**, v. 45, 2021.

CSANÁDY E.; MAGOSS E.; TOLVAJ L. Quality of machined wood surfaces. **Springer**. 265p. 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22419-0>

CUCCUI, I. *et al.* Thermo-vacuum modification of teak wood from fast-growth plantation. **BioResources**, v. 12, n. 1, p. 1903-1915, 2017.

CURVO, K. R. *et al.* Heartwood proportion and density of *Tectona grandis* Lf wood from Brazilian fast-growing plantations at different ages. **European Journal of Wood and Wood Products**, p. 1-13, 2024.

DA SILVA, L. F. V. *et al.* Compostos químicos em teca. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35,

n. 83, p. 315-322, 2015.

DARMAWAN, W. *et al.* Juvenile and mature wood characteristics of short and long rotation teak in Java. **IAWA journal**, v. 36, n. 4, p. 428-442, 2015.

DELUCIS, R. de A. *et al.* Propriedades físicas da madeira termorretificada de quatro folhosas. **Floresta e Ambiente**, v. 21, p. 99-107, 2014.

DUARTE, B. B. *et al.* Influence of physical and chemical components on the physical-mechanical properties of ten Brazilian wood species. **Materials Research**, v. 23, 2020.

ESTEVES, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: A review. **BioResources**, v. 4, n. 1, p. 370–404, 2009.

ESTEVES, B. *et al.* Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 15, n. 2, p. 245-258, 2013.

EVANS, J. W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. Red Alder: Analysis of Physical and Mechanical Data to Delineate. **Forest Products Journal**, v. 50, n. 15588, p. 75–87, 2000.

FANG, C. H. *et al.* Engineered wood flooring with a densified surface layer for heavy-duty use. **BioResources**, v. 7, n. 4, 2012.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO ESTADO DE MATO GROSSO-FAMATO. **Diagnóstico de florestas plantadas do Estado de Mato Grosso**. 2013.

FERNÁNDEZ-SÓLIS, D.; BERROCAL, A.; MOYA, R. Heartwood formation and prediction of heartwood parameters in *Tectona grandis* Lf trees growing in forest plantations in Costa Rica. **Bois & Forêts des Tropiques**, v. 335, p. 25-37, 2018.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, A. D. de; SCOLFORO, J. R. S. Análise econômica de povoamentos não desbastados de *Tectona grandis* Lf, na microrregião do baixo Rio Acre. **Cerne**, v. 11, n. 4, p. 342-353, 2005.

FOREST PRODUCTS LABORATORY- FPL. **FPL-0171**: Standard terms for describing wood. U.S. Department of Agriculture. Madison, USA. 1973.

FU, Q. *et al.* Surface chemical changes of sugar maple wood induced by thermo-hygro-mechanical (THM) treatment. **Materials**, v. 12, n. 12, p. 1946, 2019.

GAITAN-ALVAREZ, J.; MOYA, R.; BERROCAL, A. The use of X-ray densitometry to evaluate the wood density profile of *Tectona grandis* trees growing in fast-growth plantations. **Dendrochronologia**, v. 55, p. 71-79, 2019.

GARCIA, R. A. *et al.* Color stability of weathered heat-treated teak wood. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 16, n. 4, p. 453–462, 2014.

GAŠPARÍK, M. *et al.* Color and chemical changes in teak (*Tectona grandis* L. f.) and meranti (*Shorea* spp.) wood after thermal treatment. **BioResources**, v. 14, n. 2, p. 2667-2683, 2019.

GATTO, D. A. *et al.* Estimativa da idade de segregação do lenho juvenil e adulto por meio de parâmetros anatômicos para madeira de *Luehea divaricata* Mart. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 4, p. 535-540, 2008.

GIEBELER, E. Dimensional stabilization of wood by moisture-heat-pressure-treatment. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 41, p. 87-94, 1983.

GRININS, J. *et al.* Thermo-hydro treated (THT) birch veneers for producing plywood with improved properties. **Holzforschung**, v. 70, n. 8, p. 739-746, 2016.

GURAU, L.; IRLE, M. Surface roughness evaluation methods for wood products: A review. **Current forestry reports**, v. 3, p. 119-131, 2017.

HAKKOU, M. *et al.* Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer degradation and stability**, v. 89, n. 1, p. 1-5, 2005.

Hikita, Y. *et al.* Weathering testing of timber: discoloration. In: Imamura, Y. (Ed.). **High performance utilization of wood for outdoor uses**. Kyoto, FU: Press-Net, 2001. p. 27-32

HIRATA, S.; OHTA, M.; HONMA, Y. Hardness distribution on wood surface. **Journal of Wood Science**, v. 47, p. 1-7, 2001.

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

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2023**. 2023. Disponível em: < <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>>. Acesso em: 25/11/2023.

ITTO. **Side-event hosted by ITTO and Teaknet examines challenges and opportunities for boosting teak value.** 2023b. https://www.itto.int/news/2023/07/05/side_event_hosted_by_itto_and_teaknet_examines_challenges_and_opportunities_for_boosting_teak_value/ Acessado em 01/08/2023

ITTO. **Tropical Timber Market Report**. v. 28, n. 1. 1 st-15 January 2024 p. 29. 2024.

JANKOWSKY, I. P. **Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial**. Instituto de Pesquisa e Ciências Florestais (IPEF), v. 81, p. 1-15, 1979.

KAČÍKOVÁ, D. *et al.* The impact of thermal treatment on structural changes of Teak and iroko wood lignins. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 14, 2020.

KADIVAR, M. *et al.* Densification of bamboo: State of the art. **Materials**, v. 13, n. 19, p. 1–25, 2020.

KAOSA-ARD, A. Teak its natural distribution and related factors. **Nat His Bull Siam Soc**, v. 25, p. 55–74, 1981.

KARIZ, M. *et al.* Influence of temperature of thermal treatment on surface densification of spruce. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, n. 1, p. 113–123, 2017.

KOCAEFE, D. *et al.* Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. **Holz Roh Werkst**, v. 66, n. 5, p. 355-361, 2008. DOI: 10.1007/s00107-008-0233-9.

KOKUTSE, A. D. *et al.* Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis* L.f) heartwood and relationship with colour. **Trees - Structure and Function**, v. 20, n. 2, p. 219–223, 2006.

KOKUTSE, A. D. *et al.* Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* Lf). **Forest Ecology and Management**, v. 189, n. 1-3, p. 37-48, 2004.

KOLLERT, W.; KLEINE, M. The global teak study. Analysis, evaluation and future potential of teak resources. **IUFRO World Series**, v. 36, 2017.

KORKUT, D. S. *et al.* The effects of heat treatment on the physical properties and surface roughness of Turkish hazel (*Corylus colurna* L.) wood. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1772-1783, 2008.

KUTNAR, A.; KAMKE, F. A.; SERNEK, M. Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. **Wood Science and Technology**, v. 43, n. 1-2, p. 57-68, 2009.

KRUSS (2021). *Advance Software*. Hamburgo, Alemanha.

LAINE, K. *et al.* Wood densification and thermal modification: hardness, *set-recovery* and micromorphology. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 5, p. 883–894, 2016.

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, 2013.

LAINE, K. *et al.* Measuring the thickness swelling and *set-recovery* of densified and thermally modified Scots pine solid wood. **Journal of Materials Science**, v. 48, p. 8530-8538, 2013.

LASKOWSKA, A. The influence of process parameters on the density profile and hardness of surface-densified birch wood (*Betula pendula* Roth). **BioResources**, v. 12, n. 3, p. 6011-6023, 2017.

LASKOWSKA, A. *et al.* Surface and Physical Features of Thermo-Mechanically Modified Iroko and Tauari Wood for Flooring Application. **Coatings**, v. 11, n. 12, p. 1528, 2021.

LASKOWSKA, Agnieszka. Density profile and hardness of thermo-mechanically modified beech, oak and pine wood. **Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty**, v. 63, n. 205, 2020.

LEITE, H. G. *et al.* Taper models of heartwood of *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 53-59, 2011.

LEMOS, J. A. dos S. *et al.* Influência do método de propagação na produção e qualidade da madeira de *Tectona grandis*. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 3, p. 761-765, 2019.

LENGOWSKI, E. C. *et al.* Potential use of NIR and visible spectroscopy to analyze chemical properties of thermally treated wood. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 20, n. 4, p. 627-640, 2018.

LENGOWSKI, E. C. *et al.* Properties of thermally modified teakwood. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 23, n. 10, 2021.

LEONELLO, E. C.; PALMA, H. A. L ; BALLARIN, A. W. Delimitação da madeira juvenil e adulta de *Eucalyptus grandis* em São Paulo, Brasil. **Revista Forestal Venezolana**, v. 52, n. 1, p. 93-98, 2008

LOPES, J. de O. *et al.* Uniformização da cor da madeira jovem de teca pela termorreificação. **Revista Arvore**, v. 38, n. 3, p. 561-568, 2014.

LOPES, J. de O.; GARCIA, R. A.; NASCIMENTO, A. M. do. Wettability of the surface of heat-treated juvenile teak wood assessed by drop shape analyzer. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 20, n. 2, p. 249-256, 2018.

LOPES, J. de O; GARCIA, R. A.; SOUZA, N. D. de. Infrared spectroscopy of the surface of thermally-modified teak juvenile wood. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 20, n. 4, p. 737-746, 2018.

LOURENÇON, T. V. *et al.* Determinação da idade de transição entre lenho juvenil e lenho adulto para três espécies florestais por meio de suas propriedades mecânicas. **Floresta e Ambiente**, v. 21, p. 251-260, 2014.

MACHADO, J. S. *et al.* Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). **Materials & Design (1980-2015)**, v. 56, p. 975-980, 2014.

MANIA, P. *et al.* Hardness of densified wood in relation to changed chemical composition. **Forests**, v. 11, n. 5, p. 506, 2020.

MARCHESAN, R. *et al.* Caracterização da madeira de *Hovenia dulcis* para a fabricação de pisos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, 2020.

MARTHA, R. *et al.* The effect of heat treatment on the characteristics of the short rotation teak. **International wood products journal**, v. 12, n. 3, p. 218-227, 2021a.

MARTHA, R. *et al.* Effect of furfurylation treatment on technological properties of short rotation teak wood. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 1689-1699, 2021b.

MARTINS, M. *et al.* Simulação em uso dos pisos de madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia maculata*. **Cerne**, v. 19, p. 151-156, 2013.

MASCARENHAS, A. R. P. *et al.* Quality assessment of teak (*Tectona grandis*) wood from

trees grown in a multi-stratified agroforestry system established in an Amazon rainforest area. **Holzforschung**, v. 75, n. 5, p. 409–418, 2021.

MEDEIROS, R. A. *et al.* Idade técnica do primeiro desbaste de povoamentos de teca em diferentes espaçamentos. **Scientia Forestalis**, v. 45, n 116, p. 705-716, 2017.

MIRANDA, I.; SOUSA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of wood science**, v. 57, p. 171-178, 2011. DOI: doi.org/10.1007/s10086-010-1164-8

MOOSAVINEJAD, S. M *et al.* Evaluation of degradation in chemical compounds of wood in historical buildings using FT-IR and FT-Raman vibrational spectroscopy. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 21, n. 3, p. 381-392, 2019.

MONONEN, K.; ALVILA, L.; PAKKANEN, T. T. CIEL* a* b* measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver birch wood. **Scandinavian journal of forest research**, v. 17, n. 2, p. 179-191, 2002.

MORDOR INTELLIGENCE RESEARCH & ADVISORY (2023). **Hardwood Flooring Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2023 - 2028)**. Mordor Intelligence. Acessado em 5 de outubro de 2023. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/hardwood-flooring-market>

MOTTA, J. P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. proveniente do Vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

MOYA R; BOND B.; QUESADA H. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 2, p. 411-433. 2014.

MOYA, R *et al.* Comercialización de la teca. In: **Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades**. Serie Técnica Informe Técnico/CATIE no. 397, Turrialba Costa Rica, pp 225–244. 2013.

MOYA, R.; TENÓRIO, C. Wood properties and their variations in teak. In: Ramasamy, Y.; Galeano, E.; Win, T. T. **The Teak Genome**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 103-137. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79311-1_8

MÜLLER, B. V. *et al.* Avaliação das Principais Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 535–542, 2014.

NAMARI, S. *et al.* Mechanical properties of compressed wood. **Construction and Building Materials**, v. 301, 2021.

NAVARRO, C. F.; PEREZ, C. A. Color–texture pattern classification using global–local feature extraction, an SVM classifier, with bagging ensemble post-processing. **Applied Sciences**, v. 9, n. 15, p. 3130, 2019.

NAVI, P.; HEGER, F. Combined densification and thermo-hydro-mechanical processing of wood. **MRS bulletin**, v. 29, n. 5, p. 332-336, 2004.

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

NIAMKÉ, F. B. *et al.* Teakwood chemistry and natural durability. In: Ramasamy, Y.; Galeano, E.; Win, T. T. **The Teak Genome**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 83-102.

NOCETTI, M. *et al.* Provenance effect on the ring structure of teak (*Tectona grandis* Lf) wood by X-ray microdensitometry. **Annals of forest science**, v. 68, p. 1375-1383, 2011.

OLIVEIRA, M. B. de *et al.* Establishment of quality classes for hardwood floorings by simulated use. **Cerne**, v. 25, p. 105-109, 2019a.

OLIVEIRA, W. C. de *et al.* Deterioration of teak wood in accelerated decay test. **Floresta e Ambiente**, v. 26, 2019b.

OLYMPUS. **Medição da rugosidade de superfícies Parâmetros**. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#> Acessado em 24 de novembro de 2023.

PAES, J. B. *et al.* Caracterização tecnológica da madeira juvenil de teca (*Tectona grandis*) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 3, p. 437-442, 2015.

PADILHA, C. *et al.* Avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* para utilização em pisos. **Sci. For**, v. 71, p. 141-147, 2006.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology** 4.ed. New York: Mc-Graw-Hill, 1980.

PASSAUER, L. *et al.* Novel color stabilization concepts for decorative surfaces of native dark wood and thermally modified timber. **Progress in Organic Coatings**, v. 89, p. 314-322, 2015.

PELIT, H. (2014). **The Effects of Densification and Heat Treatment on Finishing Process with Some Technological Properties of Eastern Beech and Scots Pine**. Dissertação (Mestrado), Gazi University, Ankara, Turkey, 2014

PELIT, H.; BUDAKÇI, M.; SÖNMEZ, A. Density and some mechanical properties of densified and heat post-treated Uludağ fir, linden and black poplar woods. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, n. 1, p. 79–87, 2018.

PELIT, H.; BUDAKCI, M.; SÖNMEZ, A. Effects of heat post-treatment on dimensional stability and water absorption behaviours of mechanically densified uludag fir and black poplar woods. **BioResources**, v. 11, n. 2, 2016.

PELIT, H., SÖNMEZ, A., BUDAKÇI, M. Effects of thermomechanical densification and heat treatment on density and Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Eastern beech

(*Fagus orientalis* L.). **BioResources**, v. 10, n. 2, p. 3097-3111, 2015. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.3097-3111>

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

PERTUZZATTI, A. *et al.* 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.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; DE MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Effect of thermal rectification on colors of *Eucalyptus saligna* and *Pinus caribaea* woods. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 14, n. 2, p. 239-248, 2012.

POSIT TEAM. **RStudio: Integrated Development Environment for R**. Posit Software, PBC, Boston, 2023. MA. Disponível em: <http://www.posit.co/>.

PUTRO, G. S. *et al.* The growth of three teak (*Tectona grandis*) clones and its effect on wood properties. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, v. 21, n. 6, 2020.

QING, Y. *et al.* Investigation on stability and moisture absorption of superhydrophobic wood under alternating humidity and temperature conditions. **Results in physics**, v. 7, p. 1705-1711, 2017.

RAUTKARI, L. *et al.* Properties and set-recovery of surface densified Norway spruce and European beech. **Wood Science and Technology**, v. 44, n. 4, p. 679–691, 2010.

RAUTKARI, L. *et al.* Surface modification of Scots pine: The effect of process parameters on the through thickness density profile. **Journal of Materials Science**, v. 46, n. 14, p. 4780–4786, 2011.

RAUTKARI, L. *et al.* Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots pine in relation to degree of densification. **Journal of Materials Science**, v. 48, n. 6, p. 2370–2375, 2013.

REIS, C. A. F.; DE OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, M. S. **Teca (*Tectona grandis* L. f.) no Brasil**. Embrapa, p. 734, 2023.

RIZANTI, D. E. *et al.* Comparison of teak wood properties according to forest management: short versus long rotation. **Annals of Forest Science**, v. 75, n. 2, 2018.

SADATNEZHAD, S. H. *et al.* Continuous surface densification of wood: A new concept for large-scale industrial processing. **BioResources**, v. 12, n. 2, p. 3122–3132, 2017.

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.

SANTOS, C. M.T. dos; DEL MENEZZI, C. H. S; de SOUZA, M. R. Properties of thermo-mechanically treated wood from *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **BioResources**, v. 7, n. 2, 2012.

SANTOS, I. S.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. da. Evaluation of flooring produced from small diameters logs of *Eucalyptus* sp. clones. **Cerne**, v. 16, n. 4, p. 473–478, 2010.

SCHAFFER, E. L. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry Douglas-fir. **Journal of testing and evaluation**, v. 1, n. 4, p. 319-329, 1973.

SETIAWAN, Y.; RACHMAWATI, R.; TARNO, H. Diversity of ambrosia beetles (Coleoptera: Scolytidae) on teak forest in Malang District, East Java, Indonesia. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, v. 19, n. 5, p. 1791-1797, 2018.

SILVA, G. A. O. *et al.* Effect of Age on Heartwood Proportion, Color, Chemical Composition, and Biological Resistance of Teakwood. **BioResources**, v. 18, n. 2, 2023.

SILVA, J. E. C. *et al.* Properties of teak wood infected by *ceratocystis fimbriata*. **Floresta**, v. 51, n. 4, p. 1037–1045, 2021.

SOARES, B. C. D. *et al.* Behavior of juvenile and mature *Eucalyptus cloeziana* wood subjected to drastic drying. **Floresta e Ambiente**, v. 26, 2019.

SOARES, B. C.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. da. Analysing the drying behavior of juvenile and mature *Eucalyptus saligna* wood in drastic drying test for optimal drying schedule. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 18, n. 4, p. 543-554, 2016.

SOUZA, M. T. *et al.* Statistical delimitation of juvenile and mature wood of *Eucalyptus* and *Corymbia*. **Sci. For.** v. 45, n. 116, p. 611-618, 2017. DOI: dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n116.02

SRIVARO, S. *et al.* Effect of compression ratio and original wood density on pressing characteristics and physical and mechanical properties of thermally compressed coconut wood. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 124272, 2021.

STALLBAUN P. H. *et al.* Resistência natural da madeira de *Tachigali vulgaris* ao fungo xilófago *Postia placenta*. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v.88, n.36, p. 459-463, 2016.

SYDOR, M.; PINKOWSKI, G; JASIŃSKA, A. The Brinell method for determining hardness of wood flooring materials. **Forests**, v. 11, n. 8, p. 878, 2020.

TENORIO, C.; MOYA, R. Effect of thermo-hydro-mechanical densification on the wood properties of three short-rotation forest species in Costa Rica. **Bioresources**, v. 15, n. 4, p. 8065, 2020.

TENORIO, C.; MOYA, R.; NAVARRO-MORA, A. Flooring Characteristics of Thermo-Mechanical Densified Wood From Three Hardwood Tropical Species in Costa Rica. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 23, n. 23, p. 1–12, 2021.

TAKIZAWA, F. H. *et al.* **Teca do plantio à colheita**. Editora UFV, 2022, p. 344.

THULASIDAS, P. K.; BHAT, K. M.; OKUYAMA, T. Heartwood colour variation in home garden teak (*Tectona grandis*) from wet and dry localities of Kerala, India. **Journal of Tropical Forest Science**, p. 51-54, 2006.

THULASIDAS, P. K. *et al.* Wood quality for advanced uses of teak from natural and planted forests. **IUFRO world series**, v. 36, p. 73-81, 2017.

TROPICOS. *Tectona grandis*. Disponível em: <<https://www.tropicos.org/name/33700544>>. Acesso em: 7 abr. 2022.

TSUKAMOTO FILHO, A. DE A. *et al.* Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 487–494, 2003.

UGALDE ARIAS, L. A.; MONTEUUIS, O. **Teak: new trends in silviculture, commercialization and wood utilization**. International Forestry and Agroforestry, 2013, p. 522.

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, 2012.

UNSAI, O.; CANDAN, Z. Moisture content, vertical density profile and janka hardness of thermally compressed pine wood panels as a function of press pressure and temperature. **Drying Technology**, v. 26, n. 9, p. 1165–1169, 2008.

UNSAI, O. *et al.* Efeito do tratamento de compressão térmica na dureza superficial, propile densidade vertical e inchamento em espessura de tábuas de madeira de eucalipto por prensagem a quente. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 39, n. 2, p. 148-155, 2011.

VAN DUONG, V. D.; HASEGAWA, M.; MATSUMURA, J. The relations of fiber length, wood density, and compressive strength to ultrasonic wave velocity within stem of *Melia azedarach*. **J. Indian Acad. Wood Sci.** v. 16, p. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13196-018-0227-0>.

VERHAEGEN, D. *et al.* What is the genetic origin of teak (*Tectona grandis* L.) introduced in Africa and in Indonesia?. **Tree Genetics and Genomes**, v. 6, n. 5, p. 717–733, 2010.

VIDAURRE, G. B. *et al.* Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.

XU, X.; TANG, Z. Vertical compression rate profile and dimensional stability of surface-densified plantation poplar wood. **Lignocellulose**, v. 1, n. 1, p. 45-54, 2012.

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

WEILAND, J. J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 61, p. 216-220, 2003.

YANG, H. *et al.* Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

ZEPNER, L *et al.* (2020) **ClimateCharts.net – an interactive climate analysis web platform**. International Journal of Digital Earth. <https://climatecharts.net/>. Acessado em 02/09/2023. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1829112>

ZHANG, P. *et al.* Heat-Induced Discoloration of Chromophore Structures in Eucalyptus Lignin. **Materials**, v.11, n. 9, p. 1686, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11091686>

ZHUANG, Z. *et al.* Color Regression and Sorting System of Solid Wood Floor. **Forests**, v. 13, n. 9, p. 1454, 2022.

ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN J P. **Wood variation: its causes and control**. Springer Series in Wood Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 363, 1989.

APÊNDICES

Apêndice A - Análise de variância fatorial para taxa de densificação (%), perda de massa (%) e *Spring back* (%) em razão dos fatores temperatura e taxa de densificação para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecanicamente.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Taxa de densificação (%)	Temperatura (A)	1	0,016	0,016	0,64895 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	34,806	34,806	0,00000*
	A x B	1	0,063	0,063	0,3966 ^{ns}
	Resíduo	76	5,855	0,077039	
Razão de Compactação	Temperatura (A)	1	0,009158	0,009158	0,0519 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,463144	0,463144	0,0000*
	A x B	1	0,000054	0,000054	0,8799 ^{ns}
	Resíduo	99	0,226956	0,002364	
Perda de massa (%)	Temperatura (A)	1	67,241	67,241	0,00000*
	Taxa de densificação (B)	1	0,239	0,239	0,73228 ^{ns}
	A x B	1	2,125	2,125	0,30935 ^{ns}
	Resíduo	76	154,106	2,0277	
<i>Spring back</i> (%)	Temperatura (A)	1	0,11112	0,11112	0,15649 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,00375	0,00375	0,79192 ^{ns}
	A x B	1	0,4500	0,4500	0,36217 ^{ns}
	Resíduo	36	1,90996	0,053054	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; *Significativo ao nível de 5% de significância

Apêndice B - Análise de variância fatorial para os parâmetros colorimétricos em razão dos fatores temperatura e taxa de densificação para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecanicamente.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
<i>L</i> *	Temperatura (A)	1	16,02	16,02	0,43006 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	75,84	75,84	0,08765 ^{ns}
	A x B	1	43,53	43,53	0,19437 ^{ns}
	Resíduo	108	2757,04	25,5281	
<i>a</i> *	Temperatura (A)	1	4,883	4,883	0,042620*
	Taxa de densificação (B)	1	1,797	1,797	0,02160*
	A x B	1	6,310	6,310	0,02153*
	Resíduo	108	125,274	1,15994	
<i>b</i> *	Temperatura (A)	1	0,02	0,02	0,96764 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	41,37	41,37	0,06026 ^{ns}
	A x B	1	58,21	58,21	0,02632*
	Resíduo	108	1239,17	11,473796	
C	Temperatura (A)	1	0,38	0,38	0,86093 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	41,39	41,39	0,06926 ^{ns}
	A x B	1	64,53	64,53	0,02389*

	Resíduo	108	1327,53	12,29194	
h°	Temperatura (A)	1	71,75	71,75	0,00124*
	Taxa de densificação (B)	1	0,01	0,01	0,97216 ^{ns}
	A x B	1	0,23	0,23	0,85064 ^{ns}
	Resíduo	108	703,98	6,5183	
ΔE^*	Temperatura (A)	1	25,66	25,66	0,02287*
	Taxa de densificação (B)	1	14,52	14,52	0,08533 ^{ns}
	A x B	1	0,34	0,34	0,79166 ^{ns}
	Resíduo	108	519,98	4,814629	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; *Significativo ao nível de 5% de significância

Apêndice C - Análise de variância fatorial para os parâmetros de rugosidade em razão dos fatores temperatura e taxa de densificação para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecânicamente.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Rugosidade Ra (μm)	Temperatura (A)	1	0,06048	0,06048	0,109688 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,04387	0,04387	0,171752 ^{ns}
	A x B	1	0,15265	0,15265	0,012457*
	Resíduo	56	1,28202	0,022893	
Rugosidade Rz (μm)	Temperatura (A)	1	0,11112	0,11112	0,19512 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,00375	0,00375	0,38724 ^{ns}
	A x B	1	0,4500	0,4500	0,04059*
	Resíduo	56	1,90996	0,034106	
Rugosidade Rq (μm)	Temperatura (A)	1	0,01945	0,01945	0,08322 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,00595	0,00595	0,33330 ^{ns}
	A x B	1	0,03949	0,03949	0,01486*
	Resíduo	56	0,35008	0,006265	
Rugosidade Rt (μm)	Temperatura (A)	1	2,845	2,845	0,36928 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	33,292	33,292	0,00306*
	A x B	1	6,872	6,872	0,16502 ^{ns}
	Resíduo	56	194,469	3,472660	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; *Significativo ao nível de 5% de significância; Ra: rugosidade média; Rq: rugosidade quadrática; Rz: rugosidade profundidade média; Rt: rugosidade total.

Apêndice D - Análise de variância fatorial do ângulo de contato e da molhabilidade em razão dos fatores temperatura e taxa de densificação para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecanicamente.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Ângulo de contato (°)	Temperatura (A)	1	63,42	63,42	0,02963*
	Taxa de densificação (B)	1	110,78	110,78	0,00612*
	A x B	1	3,73	3,73	0,57057 ^{ns}
	Resíduo	16	177,98	11,12375	
Molhabilidade (°/s)	Temperatura (A)	1	0,0068513	0,0068513	0,00229*
	Taxa de densificação (B)	1	0,0003511	0,0003511	0,42416 ^{ns}
	A x B	1	0,0083519	0,0083519	0,29550 ^{ns}
	Resíduo	16	0,0161648	0,0010103	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; *Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice E - Análise de variância fatorial para densidade aparente da madeira (g.cm³), umidade de equilíbrio da madeira (%), absorção de água (%), inchamento em espessura (%) e *Set recovery* (%) em razão dos fatores temperatura e taxa de densificação para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecanicamente.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Densidade aparente da madeira (g.cm ³)	Temperatura (A)	1	0,00087	0,00087	0,68268 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	1,15883	1,15883	0,00000 *
	A x B	1	0,01534	0,01534	0,08914 ^{ns}
	Resíduo	76	0,39306	0,00517	
Umidade de equilíbrio da madeira (%)	Temperatura (A)	1	8,993	8,993	0,01354*
	Taxa de densificação (B)	1	0,004	0,004	0,95766 ^{ns}
	A x B	1	7,320	7,320	0,02479*
	Resíduo	36	48,011	1,3336	
Absorção de água 2 horas (%)	Temperatura (A)	1	0,16300	0,16300	0,03848*
	Taxa de densificação (B)	1	0,0175	0,0175	0,16264 ^{ns}
	A x B	1	0,00000	0,00000	0,99621 ^{ns}
	Resíduo	36	1,27129	0,03531	
Absorção de água 24 horas (%)	Temperatura (A)	1	71,20	71,20	0,26117 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	64,67	64,67	0,28384 ^{ns}
	A x B	1	0,16	0,16	0,95696 ^{ns}
	Resíduo	36	1966,82	54,6338	
Absorção de água 48 horas (%)	Temperatura (A)	1	53230	53230	0,70443 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	400122	400122	0,30147 ^{ns}
	A x B	1	72812	72812	0,65741 ^{ns}
	Resíduo	36	13106646	361.073,5	
Absorção de água 72 horas (%)	Temperatura (A)	1	1,0189e+09	1,0189e+09	0,51155 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	1,5747e+09	1,5747e+09	0,41524 ^{ns}
	A x B	1	1,3992e+09	1,3992e+09	0,44228 ^{ns}
	Resíduo	36	8,3447e+10	2,2317e+09	

Inchamento em espessura 2 horas (%)	Temperatura (A)	1	4,137	4,137	0,32643 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	2,041	2,041	0,48913 ^{ns}
	A x B	1	0,004	0,004	0,97691 ^{ns}
	Resíduo	36	150,462	4,1795	
Inchamento em espessura 24 horas (%)	Temperatura (A)	1	227,75	227,75	0,00050*
	Taxa de densificação (B)	1	7,35	7,35	0,49606 ^{ns}
	A x B	1	35,16	35,16	0,14136 ^{ns}
	Resíduo	36	559,69	15,54694	
Inchamento em espessura 48 horas (%)	Temperatura (A)	1	839,27	839,27	0,00000*
	Taxa de densificação (B)	1	3,07	3,07	0,65212 ^{ns}
	A x B	1	2,90	2,90	0,66123 ^{ns}
	Resíduo	36	535,14	14,865	
Inchamento em espessura 72 horas (%)	Temperatura (A)	1	1147,62	1147,62	0,00000*
	Taxa de densificação (B)	1	2,79	2,79	0,61331 ^{ns}
	A x B	1	0,73	0,73	0,79563 ^{ns}
	Resíduo	36	386,82	10,745	
<i>Set recovery</i> (%)	Temperatura (A)	1	0,1886	0,1886	0,24769 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	5,6018	5,6018	0,00000*
	A x B	1	0,0258	0,0258	0,66631 ^{ns}
	Resíduo	32	4,3536	0,13605	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; *Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice F - Análise de variância fatorial para dureza Janka em razão dos fatores temperatura e taxa de densificação para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecânicamente.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Dureza Janka (Mpa)	Temperatura (A)	1	63,504	63,504	0,6207 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	34,596	34,596	0,7147 ^{ns}
	A x B	1	222,784	222,784	0,3560 ^{ns}
	Resíduo	36	9173,512	254,8199	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; *Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice G - Análise de variância fatorial para os ensaios de simulação em serviço dos pisos de teca de 15 anos densificados termomecanicamente.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas (mm)	Temperatura (A)	1	0,0100	0,01000	0,23705 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,0188	0,01888	0,10558 ^{ns}
	A x B	1	0,0009	0,00096	0,71280 ^{ns}
	Resíduo	81	0,5708	0,00705	
Carga rolante (10 viagens)	Temperatura (A)	1	0,0011	0,0109	0,64136 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,1118	0,1118	0,13804 ^{ns}
	A x B	1	0,0113	0,0113	0,66123 ^{ns}
	Resíduo	80	3,9842	0,04980	
Carga rolante (25 viagens)	Temperatura (A)	1	0,0050	0,0050	0,74521 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,0664	0,0664	0,24038 ^{ns}
	A x B	1	0,0113	0,0113	0,62759 ^{ns}
	Resíduo	81	3,7967	21,3343	
Carga rolante (50 viagens)	Temperatura (A)	1	0,0082	0,0082	0,66272 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,0831	0,0831	0,16673 [*]
	A x B	1	0,0532	0,0532	0,26744 ^{ns}
	Resíduo	80	3,4137	23,4349	
Atrito estático	Temperatura (A)	1	0,0026	0,00256	0,35321 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,0129	0,01296	0,04131 [*]
	A x B	1	0,0012	0,00121	0,52198 ^{ns}
	Resíduo	36	0,1042	0,002894	
Atrito dinâmico	Temperatura (A)	1	0,0003	0,000303	0,53802 ^{ns}
	Taxa de densificação (B)	1	0,00110	0,001103	0,24301 ^{ns}
	A x B	1	0,00110	0,001103	0,24301 ^{ns}
	Resíduo	36	0,0282	0,000783	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; *Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice H - Análise de variância para os parâmetros pelo teste de Dunnett para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecanicamente

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
L^*	Tratamento	4	6300	6300	2e-16 [*]
	Resíduo	138	3128	23	
a^*	Tratamento	4	61,78	61,78	2e-16 [*]
	Resíduo	138	183,98	1,33	
b^*	Tratamento	4	904,5	904,52	2e-16 [*]
	Resíduo	138	1446,1	10,5	
C	Tratamento	4	961,7	961,7	2e-16 [*]
	Resíduo	138	1569,3	11,4	
h (°)	Tratamento	4	44,3	44,28	2e-16 [*]
	Resíduo	138	890,4	6,45	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; F: F calculado; *Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice I - Análise de variância para os parâmetros de rugosidade pelo teste de Dunnett para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecanicamente.

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Rugosidade Ra (μm)	Tratamento	4	2,0982	0,524	2e-16 *
	Resíduo	70	0,3821	0,0055	
Rugosidade Rz (μm)	Tratamento	4	1,9864	0,4966	2e-16 *
	Resíduo	70	0,4421	0,0063	
Rugosidade Rq (μm)	Tratamento	4	1,2815	0,3204	2e-16 *
	Resíduo	70	0,3924	0,0056	
Rugosidade Rt (μm)	Tratamento	4	1,7086	0,4272	2e-16 *
	Resíduo	70	0,4757	0,0068	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice J - Análise de variância para do ângulo de contato e molhabilidade pelo teste de Dunnett para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecanicamente

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Ângulo de contato ($^{\circ}$)	Tratamento	1	738,5	738,5	5,02e-07*
	Resíduo	23	357,7	15,6	
Molhabilidade ($^{\circ}/\text{s}$)	Tratamento	1	0,3846	0,3846	2,83e-08*
	Resíduo	23	0,1317	0,0057	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice K - Análise de variância para densidade aparente da madeira ($\text{g}\cdot\text{cm}^3$), umidade de equilíbrio da madeira (%), absorção de água (%), inchamento em espessura (%) e *Set recovery* (%) pelo teste de Dunnett para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecanicamente

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Densidade aparente da madeira ($\text{g}\cdot\text{cm}^3$)	Tratamento	1	0,1694	0,16941	2e-16 *
	Resíduo	98	0,1509	0,00154	
Umidade de equilíbrio da madeira (%)	Tratamento	1	235,06	58,76	3e-16 *
	Resíduo	45	51,51	1,14	
Absorção de água 2 horas (%)	Tratamento	4	0,2735	0,06837	0,0709 ^{ns}
	Resíduo	45	1,3238	0,02942	
Absorção de água 24 horas (%)	Tratamento	4	585,5	146,37	0,0234*
	Resíduo	45	2100,6	46,68	
Absorção de água 48 horas (%)	Tratamento	4	1202	300,55	0,00209*
	Resíduo	45	2720	60,45	
Absorção de água 72 horas (%)	Tratamento	4	9866419	2466605	0,00132*
	Resíduo	45	20778371	461742	
Inchamento em espessura 2 horas (%)	Tratamento	4	4,764	1,1911	3,21e-10*
	Resíduo	45	2,396	0,0532	
Inchamento em espessura 24 horas (%)	Tratamento	4	7,274	1,8184	2e-16*
	Resíduo	45	0,569	0,0126	
Inchamento em espessura 48 horas (%)	Tratamento	4	7,614	1,9035	2e-16*
	Resíduo	45	0,345	0,0077	
Inchamento em espessura 72 horas (%)	Tratamento	4	90,78	22,696	2e-16*
	Resíduo	45	4,70	0,104	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; *Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice L - Análise de variância da dureza Janka pelo teste de Dunnett para a madeiras de teca de 15 anos densificada termomecanicamente

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Dureza Janka (Mpa)	Tratamento	4	20129	5032	7.57e-11*
	Resíduo	45	9189	204	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *Significativo ao nível de 5% de significância.

Apêndice M - Análise de variância pelo teste de Dunnett para os ensaios de simulação em serviço dos pisos de teca de 15 anos densificados termomecanicamente

Propriedade	FV	GL	SQ	QM	P valor
Endentação causada por cargas aplicadas em pequenas áreas	Tratamento	1	1,197	1,167	4,39e-12 *
	Resíduo	104	2,032	0,0195	
Carga rolante (10 viagens)	Tratamento	1	8,386	8,386	2e-16 *
	Resíduo	103	5,205	0,051	
Carga rolante (25 viagens)	Tratamento	1	7,693	7,693	2e-16 *
	Resíduo	103	4,866	0,047	
Carga rolante (50 viagens)	Tratamento	1	7,144	7,144	2e-16 *
	Resíduo	103	4,511	0,044	
Atrito estático	Tratamento	1	0,00451	0,004509	0,268 ^{ns}
	Resíduo	48	0,17269	0,003598	
Atrito dinâmico	Tratamento	1	0,00212	0,00212	0,097 ^{ns}
	Resíduo	48	0,03545	0,0007385	

Em que: FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; ns: Não significativo em nível de 5% de significância; *Significativo ao nível de 5% de significância.