

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA MACIEL VEIGA

AVALIAÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS PRODUZIDOS COM LÂMINAS DE
Eucalyptus dunnii E *Pinus spp.* PARA APLICAÇÕES EM EDIFICAÇÕES EM LIGHT
WOOD FRAME

CURITIBA

2026

BRUNA MACIEL VEIGA

AVALIAÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS PRODUZIDOS COM LÂMINAS DE
Eucalyptus dunnii E *Pinus spp.* PARA APLICAÇÕES EM EDIFICAÇÕES EM
LIGHT WOOD FRAME

Dissertação apresentada para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal. Área de Concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.
Orientadora: Prof. Dra. Rosilani Trianoski
Coorientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

CURITIBA

2026

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ / SISTEMA DE BIBLIOTECAS
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

Veiga, Bruna Maciel

Avaliação de painéis compensados produzidos com lâminas de *Eucalyptus dunni* e *Pinus spp.* para aplicações em edificações em *light wood frame* / Bruna Maciel Veiga. - Curitiba, 2026.

1 recurso on-line : PDF.

Orientadora: Profa. Dra. Rosilani Trianoski

Coorientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakari

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 10/02/2026.

1. Compensados de madeira. 2. *Eucalyptus dunni*. 3. Edificações.
4. Compensados de madeira - Normas. I. Trianoski, Rosilani. II. Iwakari, Setsuo. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias.
V. Título.

CDD – 674.834

CDU – 634.0.832.282



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **BRUNA MACIEL VEIGA**, intitulada: **Avaliação de painéis compensados produzidos com lâminas de Eucalyptus dunnii e Pinus spp. para aplicações em edificações em Light Wood Frame.**, sob orientação da Profa. Dra. ROSILANI TRIANOSKI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

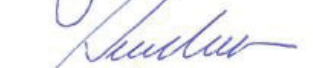
CURITIBA, 10 de Fevereiro de 2026.


ROSILANI TRIANOSKI

Presidente da Banca Examinadora


JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


ADAUTO JOSÉ MIRANDA DE LIMA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

*Dedico esta dissertação aos meus pais e à minha irmã
em agradecimento pelo amor, apoio constante e paciência.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e por toda a sua bondade, que me sustentou ao longo desta caminhada.

Aos meus pais, Cátia e Joacir, que sempre me apoiaram incondicionalmente, com amor e dedicação, sendo essenciais para minha formação pessoal e acadêmica.

À minha irmã, Alexandra, pelo amor fraternal, incentivo e apoio que tantas vezes me motivaram a seguir em frente.

Aos professores, pelos ensinamentos transmitidos; em especial, à minha orientadora, prof. Dra. Rosilani Trianoski, pela paciência, atenção, orientação e conselhos, não apenas pelos ensinamentos técnicos, mas também pelos ensinamentos que levarei para a vida. Ao professor coorientador, Setsuo Iwakiri, pelo apoio prestado sempre que necessário.

Aos colegas Amanda e Leandro, por toda parceria e apoio durante o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

À empresa Compensados Império Ltda. e a toda a equipe, pela confiança, pela oportunidade e por todo o suporte oferecido por meio dos maquinários, do tempo e dos materiais disponibilizados, que tornaram este trabalho possível.

RESUMO

O Brasil destaca-se na produção de florestas plantadas, sobretudo com espécies de *Pinus* e *Eucalyptus*, amplamente utilizadas pela indústria madeireira. Entre os produtos derivados, o painel compensado assume papel de destaque, especialmente na construção civil, setor reconhecido por seu impacto ambiental. Nesse cenário, o sistema construtivo *Light Wood Frame* desponta como alternativa sustentável, impulsionado pela publicação da NBR 16936 (ABNT, 2023) – Edificações em *Light Wood Frame*, que estabelece diretrizes técnicas para o uso do compensado estrutural. Considerando o possível aumento na demanda por compensados estruturais e a escassez de *Pinus spp.* com características adequadas ao uso estrutural, investigou-se o potencial do *Eucalyptus dun nii* como espécie alternativa para a produção de painéis destinados ao fechamento e travamento de edificações em *wood frame*, avaliando-se sua conformidade com a normativa. Inicialmente, analisaram-se os efeitos do aquecimento de toras de *Eucalyptus dun nii* sobre as propriedades físico-químicas da madeira e sobre o desempenho físico-mecânico dos painéis produzidos. Toras com e sem aquecimento por vapor foram processadas industrialmente na região de Teixeira Soares, Paraná, passando pelas etapas de laminação e posterior produção de painéis compensados. Após a fabricação, os painéis foram submetidos a ensaios para verificar a conformidade com a NBR 16936 (ABNT, 2023). Realizaram-se ensaios de massa específica aparente, absorção de água, inchamento em espessura, teor de umidade e resistência à flexão, conforme NBR 17002 (ABNT, 2021) – Compensado – Requisitos e Métodos, além da avaliação da qualidade de colagem, conduzida segundo a NBR 12466-1 e 12466-2 (ABNT, 2012). Os resultados evidenciaram que o aquecimento das toras influenciou significativamente suas propriedades, reduzindo a densidade básica e os teores de extrativos solúveis, além de favorecer melhor acabamento superficial das lâminas. Apesar do aparecimento de rachaduras de topo e de uma redução no rendimento de laminação, observou-se maior estabilidade dimensional dos painéis, manifestada pela diminuição da absorção de água e do inchamento, sem redução no desempenho mecânico. Conclui-se que painéis compensados combi produzidos com *Eucalyptus dun nii* e *Pinus spp.*, apresentaram desempenho compatível com as exigências normativas para aplicação em sistemas construtivos do tipo *Light Wood Frame*, configurando-se como alternativa tecnicamente viável e potencialmente sustentável para o setor da construção civil.

Palavras-chave: painel compensado estrutural; aquecimento; *light wood frame*; *Eucalyptus dun nii*.

ABSTRACT

Brazil stands out in the production of planted forests, especially with species of *Pinus* and *Eucalyptus*, which are widely used by the wood industry. Among the derived products, plywood plays a prominent role, particularly in the construction sector, which is recognized for its environmental impact. In this context, the Light Wood Frame construction system emerges as a sustainable alternative, driven by the publication of NBR 16936 (ABNT, 2023) – Light Wood Frame Buildings, which establishes technical guidelines for the use of structural plywood. Considering the potential increase in demand for structural panels and the scarcity of *Pinus spp.* with properties suitable for structural applications, this study investigated the potential of *Eucalyptus dunnii* as an alternative species for the production of panels intended for sheathing and bracing in wood frame buildings, assessing their compliance with technical standards. Initially, the effects of log heating on the physico chemical properties of *Eucalyptus dunnii* wood and on the physical and mechanical performance of the resulting panels were analyzed. Logs with and without steam heating were processed industrially in the region of Teixeira Soares, Paraná, going through the stages of veneer production and subsequent manufacture of plywood panels. After production, the panels were tested to verify compliance with NBR 16936 (ABNT, 2023). Tests of apparent density, water absorption, thickness swelling, moisture content, and bending strength were conducted in accordance with NBR 17002 (ABNT, 2021) – Plywood – Requirements and Methods, in addition to the evaluation of bonding quality, carried out according to NBR 12466-1 and 12466-2 (ABNT, 2012). The results showed that heating the logs significantly affected their properties, reducing basic density and the content of soluble extractives, as well as improving the surface finish of the veneers. Despite the occurrence of end checking and a reduction in veneer yield, greater dimensional stability of the panels was observed, expressed by reduced water absorption and swelling, without loss of mechanical performance. It is concluded that plywood panels produced with *Eucalyptus dunnii* and *Pinus spp.* exhibited performance compatible with normative requirements for application in Light Wood Frame systems, thus representing a technically feasible and potentially sustainable alternative for the construction sector.

Keywords: structural plywood; heating; light wood frame; *Eucalyptus dunnii*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Evolução da produção mundial de compensado (2012-2021).....	23
FIGURA 2 - Discos das toras de <i>Eucalyptus dunnii</i> para densidade básica e propriedades químicas	33
FIGURA 3 – Preparação e análise química.....	34
FIGURA 4 - Toras selecionadas para a laminação.....	35
FIGURA 5 – Qualidade superficial das lâminas com e sem processo de aquecimento.....	36
FIGURA 6 - Toras inutilizadas no processo de laminação.....	41
FIGURA 7 – Qualidade superficial das lâminas após a secagem	43
FIGURA 8 - Lâminas após processo de laminação.....	43
FIGURA 9 - Patio de toras e tanque de aquecimento	56
FIGURA 10 - Medição da espessura e secagem de lâminas	57
FIGURA 11- Preparação da batida de cola	58
FIGURA 12 - Processo de aplicação do adesivo.....	59
FIGURA 13 - Montagem dos painéis compensados.....	60
FIGURA 14 - Prensagem dos painéis compensados	60
FIGURA 15 - Painéis após processo de esquadrejamento e lixamento	61
FIGURA 16 - Esquema de corte para os ensaios de painéis compensados	62
FIGURA 17 - Corpos de prova cortados para os ensaios	63

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Delineamento experimental dos painéis compensados de <i>Eucalyptus dunnii</i> com e sem aquecimento de toras.....	36
TABELA 2 - Resultados médios de densidade básica da madeira.....	38
TABELA 3 Resultados médios das propriedades químicas da madeira.....	39
TABELA 4 – Resultado da quantidade de toras inutilizadas no torno laminador.	41
TABELA 5 - Resultados médios da densidade e teor de umidade dos painéis compensados.....	45
TABELA 6- Resultados médios da absorção de água e inchamento e recuperação em espessura dos painéis compensados.	46
TABELA 7- Resultados médios dos módulos de ruptura e de elasticidade à flexão estática dos painéis compensados.....	48
TABELA 8 - Resultados médios da resistência da linha de cola ao cisalhamento dos painéis compensados.....	50
TABELA 9 - Delineamento experimental dos painéis compensados puros e em combinação de <i>Pinus spp.</i> e <i>Eucalyptus dunnii</i>	58
TABELA 10 – Ensaio, dimensões e amostragem dos corpos de prova.....	63
TABELA 11 - Requisitos da NBR 16936 (ABNT, 2023) para painel compensado estrutural.	64
TABELA 12 - Resultados médios da massa específica e teor de umidade dos painéis compensados de <i>Eucalyptus dunnii</i> e <i>Pinus spp.</i> puros e combinados	65
TABELA 13- Resultados médios da absorção de água e inchamento e recuperação em espessura dos painéis compensados de <i>Eucalyptus dunnii</i> e <i>Pinus spp.</i> puros e combinados.....	67
TABELA 14 - Resultados médios dos módulos de ruptura e de elasticidade à flexão estática dos painéis compensados de <i>Eucalyptus dunnii</i> e <i>Pinus spp.</i> puros e combinados.....	69
TABELA 15- Resultados médios da resistência da linha de cola ao cisalhamento dos painéis compensados de <i>Eucalyptus dunnii</i> e <i>Pinus spp.</i> puros e combinados.....	71

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
ASPECTOS GERAIS	13
1.1. INTRODUÇÃO	13
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. Objetivo geral	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	15
1.4. REVISÃO DE LITERATURA	16
1.4.1. Setor florestal	16
1.4.2. <i>Eucalyptus</i>	17
1.4.3. Indústria de base florestal	21
1.4.4. Painéis compensados	22
1.4.5. Construção civil e madeira	25
1.4.6. Normativa <i>Light Wood Frame</i>	28
1.5. METODOLOGIA GERAL	28
1.5.1. Localização e coleta do material	28
CAPÍTULO 2	30
INFLUÊNCIA DO AQUECIMENTO DAS TORAS DE <i>Eucalyptus dunnii</i> NAS PROPRIEDADES DE PAINÉIS COMPENSADOS	30
2.1. INTRODUÇÃO	31
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS	32
2.2.1. Determinação da densidade básica e propriedades químicas	33
2.2.1.1. Densidade básica	33
2.2.2. Laminação das toras	34
2.2.3. Produção dos painéis compensados	36
2.2.4 Avaliação dos painéis compensados	37
2.2.5 Análise estatística	38
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
2.3.1. Densidade básica da madeira	38
2.3.2. Propriedades químicas da madeira	39
2.3.3. Laminação e qualidade das lâminas	40
2.3.4. Propriedades físicas dos painéis	44
2.3.5. Propriedades mecânicas dos painéis	48
2.4. CONCLUSÃO	51

CAPITULO 3	53
AVALIAÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS PUROS E COMBINADOS DE PINUS SPP. E EUCALYPTUS DUNNII PARA APLICAÇÃO EM LIGHT WOOD FRAME	53
3.1. INTRODUÇÃO	54
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.2.1. Preparação das lâminas de <i>Pinus spp.</i> e <i>Eucalyptus dunnii</i>	56
3.2.2. Processo de produção dos painéis	57
3.2.3. Preparação da batida de cola	58
3.2.4. Montagem dos painéis	59
3.2.5. Avaliação dos painéis compensados.....	61
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.3.1. Massa específica e teor de umidade e dos painéis.....	65
3.3.2. Absorção de água e inchamento e recuperação da espessura.....	66
3.3.3. Propriedades mecânicas dos painéis.....	68
3.4. CONCLUSÃO.....	72
CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES	74
REFERÊNCIAS.....	76

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GERAIS

1.1. INTRODUÇÃO

As florestas nativas e plantadas constituem a base do setor florestal brasileiro. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2022), estima-se a existência de aproximadamente 4 bilhões de hectares de florestas no mundo, entre nativas e plantadas, sendo que cerca de 12% dessa área está localizada no Brasil. Trata-se de um recurso renovável com elevado potencial industrial, que proporciona diversos benefícios, como a geração de renda e empregos, a conservação da biodiversidade e o estímulo à pesquisa científica.

O Brasil destaca-se mundialmente na produção de florestas plantadas. Entre as espécies de maior relevância econômica, sobressai-se o gênero *Pinus*, amplamente cultivado em razão de sua boa adaptação às condições climáticas e de sua ampla aceitação pela indústria madeireira. Destaca-se também o gênero *Eucalyptus*, que apresenta ampla distribuição no território nacional e tem se consolidado como uma alternativa sustentável e competitiva para a produção de bens florestais industrializados.

O painel compensado está entre os principais produtos derivados da madeira e, em razão de suas propriedades favoráveis, é amplamente empregado em diferentes setores, como a construção civil, a indústria moveleira, o setor naval, a fabricação de instrumentos musicais e de embalagens industriais, entre outras aplicações (Bortoletto Júnior e Garcia, 2004). Trata-se de um produto com expressiva relevância econômica, amplamente comercializado nos mercados interno e externo, sendo o Brasil um tradicional exportador desse material.

A construção civil destaca-se como um dos principais mercados potenciais para a aplicação de painéis compensados, ao mesmo tempo em que está entre os setores de maior impacto ambiental, sendo responsável por elevada geração de resíduos (MMA, 2025). Nesse contexto, o sistema construtivo *Light Wood Frame* apresenta-se como uma alternativa sustentável, por se tratar de um método

industrializado que contribui para a redução do consumo de materiais e do tempo de execução das edificações. Embora ainda em processo de consolidação no Brasil, o sistema ganhou impulso com a publicação da NBR 16936 (ABNT, 2023), a qual estabelece critérios técnicos para sua utilização, associada à atualização da NBR 17002 (ABNT, 2021) para painéis compensados de aplicação estrutural.

A NBR 16936 (ABNT, 2023) prevê a utilização do compensado como uma das alternativas para painéis estruturais de contraventamento aplicados às paredes do sistema construtivo. Espera-se que a implementação dessa normativa amplie o uso da madeira como solução técnica e economicamente viável para atender à crescente demanda habitacional nacional. Nesse cenário, programas habitacionais públicos e linhas de financiamento tendem a incorporar edificações em *Light Wood Frame*, o que pode impulsionar o consumo de produtos derivados da madeira.

A madeira de *Pinus spp.* é amplamente utilizada como matéria-prima pela indústria de painéis. Contudo, a crescente escassez dessa espécie tem impulsionado a busca por alternativas de rápido crescimento, como o *Eucalyptus spp.*, que apresenta propriedades físico-mecânicas compatíveis com aplicações estruturais. Apesar de seu potencial, o processamento do eucalipto ainda é limitado pela ocorrência de elevadas tensões de crescimento, responsáveis pela formação de defeitos e perdas significativas de matéria-prima. Nesse contexto, o tratamento térmico de toras, por meio de aquecimento em água ou vapor, tem sido adotado como estratégia para reduzir essas tensões e melhorar o desempenho do material. Dentre as espécies do gênero, o *Eucalyptus dunnii* destaca-se pelo rápido crescimento, boa adaptação a baixas temperaturas e desempenho satisfatório na produção de painéis compensados.

Diante da perspectiva de aumento da demanda por painéis compensados, torna-se essencial a avaliação dos processos industriais, especialmente com o uso de espécies alternativas ao *Pinus spp.*, visando à utilização eficiente das principais matérias-primas de reflorestamento disponíveis no país. Nesse contexto, o presente estudo busca contribuir com o setor madeireiro ao indicar práticas e métodos produtivos capazes de conciliar rendimento industrial, qualidade e desempenho estrutural dos painéis, promovendo sua aplicação adequada em sistemas construtivos sustentáveis.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de painéis compensados destinados ao fechamento e travamento no sistema *wood frame*, produzidos a partir de lâminas de *Eucalyptus dunnii* e *Pinus spp.*, verificando sua conformidade com os requisitos estabelecidos pela NBR 16936 (ABNT, 2023) - Edificações em *Light Wood Frame*.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Avaliar as propriedades físico-químicas das toras de *Eucalyptus dunnii* com e sem o processo de aquecimento;
- b) Avaliar o efeito do aquecimento de toras de *Eucalyptus dunnii* sobre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis compensados;
- c) Avaliar os efeitos de diferentes composições de lâminas de pinus e eucalipto na produção de painéis compensados estruturais, comparando suas propriedades físicas e mecânicas conforme os critérios da NBR 16936 (ABNT, 2023).

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para atender aos objetivos desta pesquisa, a presente dissertação está estruturada em capítulos, conforme as especificações a seguir:

Capítulo 1: apresenta a introdução geral, os objetivos geral e específicos, a organização da pesquisa, a revisão de literatura e a metodologia geral adotada.

Capítulo 2: corresponde ao estudo sobre a “Influência do aquecimento das toras nas propriedades de compensados de *Eucalyptus dunnii*”, o qual investiga o efeito do aquecimento sobre as principais propriedades físicas e químicas da madeira, sobre o aproveitamento de toras e sobre as propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados.

Capítulo 3: corresponde à investigação sobre a “Avaliação de painéis compensados puros e combinados de *Pinus spp.* e *Eucalyptus dunnii* para aplicação em *Light Wood*

Frame”, que analisa as propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados puros e em combinação destas espécies, e verifica sua conformidade em relação aos requisitos estabelecidos pela NBR 16936 (ABNT, 2023) — Edificações em *Light Wood Frame*.

1.4. REVISÃO DE LITERATURA

1.4.1. Setor florestal

As florestas no mundo ocupam uma área total de 4,0 bilhões de hectares, dos quais 93% correspondem a florestas nativas, ou seja, 3,74 bilhões de hectares, e 7% de florestas plantadas, totalizando 291 milhões de hectares. O Brasil possui extensão florestal de 495 milhões de hectares (12% do total mundial), ocupando a segunda posição no ranking global, atrás apenas da Rússia (ABIMCI, 2022).

Segundo dados da Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal - APRE (2022), o Brasil está entre os dez países com maior área de florestas plantadas, ocupando a sétima posição. De acordo com a ABIMCI (2022), as plantações florestais no Brasil tiveram início no início do século XX, com destaque para o eucalipto e, posteriormente, o pinus. Sua expansão consolidou-se a partir de 1966, impulsionada por incentivos fiscais voltados ao abastecimento das indústrias de celulose, papel e carvão vegetal e atualmente essas florestas vem desempenhando papel estratégico no fornecimento de matéria-prima para diversos segmentos da cadeia madeireira e siderúrgica.

A Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2024) estima que o país possua 10,2 milhões de hectares de plantios florestais, sendo o eucalipto a principal espécie cultivada, com 7,8 milhões de hectares - o que representa 76% da área total plantada. Esse número reflete um crescimento de 41% nos últimos dez anos, evidenciando a crescente importância dessa cultura na economia florestal brasileira. Segundo esta mesma associação, o pinus é a segunda espécie mais plantada com 1,9 milhões de hectares.

As regiões Sudeste e Sul concentram as maiores áreas de florestas plantadas, totalizando 7.054.946 hectares - sendo 3.863.225 hectares no Sudeste e 3.191.721 hectares no Sul. Essas regiões, além de apresentarem condições

climáticas favoráveis, possuem vantagens competitivas como infraestrutura logística (acesso a rodovias, portos e aeroportos), proximidade dos principais centros consumidores, presença de centros de pesquisa e universidades, além de importantes polos industriais (APRE, 2022).

Segundo dados da ABIMCI (2022), o Paraná concentra aproximadamente 42% das florestas de pinus do Brasil, destacando-se como um dos principais polos do setor, abrigando um parque industrial madeireiro de grande relevância, que utiliza essa matéria-prima na produção de madeira serrada, lâminas, compensados, portas, pisos, molduras e pellets.

Segundo Iwakiri *et al.* (2007), apesar de a madeira de pinus ser amplamente utilizada na produção de serrados, laminados, compensados e painéis reconstituídos, como MDF, OSB e aglomerados, as projeções apontam para um possível desequilíbrio entre oferta e demanda, caracterizado como “apagão florestal”, em razão da escassez de matéria-prima em condições adequadas ao processamento industrial, e nesse contexto, espécies do gênero *Eucalyptus* têm sido consideradas alternativa estratégica para garantir o suprimento.

1.4.2. *Eucalyptus*

O *Eucalyptus* é, atualmente, o gênero mais amplamente utilizado em projetos de reflorestamento no Brasil e em diversos outros países, como Índia, África do Sul, Argentina, Portugal, Angola, Espanha, China, França e Japão (Rocha *et al.*, 2024). De acordo com a Embrapa (2019), o gênero *Eucalyptus*, originário da Oceania, teve suas primeiras plantações no Brasil, segundo relatos, em meados de 1868 e embora existam mais de 700 espécies conhecidas, apenas 20 são destinadas para fins comerciais em todo o mundo, e devido às suas propriedades físicas e químicas, o eucalipto tem uma ampla gama de aplicações produtivas.

Segundo Trugilho *et al.* (2006), além dos usos tradicionais, o gênero *Eucalyptus* tem se destacado também em aplicações de maior valor agregado, especialmente nas indústrias moveleira e da construção civil. Esse potencial para usos mais nobres decorre da ampla diversidade de espécies, bem como da elevada capacidade de geração de clones e híbridos, o que possibilita maior adaptabilidade e qualidade da matéria-prima.

O gênero *Eucalyptus* é essencial para a indústria de base florestal, por ser utilizado pelos principais segmentos industriais, inclusive em substituição a outras espécies florestais como pinus (Junior; Colodette, 2013). A ampla adoção do *Eucalyptus* decorre de sua elevada adaptabilidade a distintas condições climáticas, associada ao rápido crescimento e ao elevado rendimento produtivo. Além disso, sua madeira apresenta características versáteis, sendo empregada em diversos segmentos, como construção civil, laminação, compensados, paletes, elementos decorativos, indústria automotiva, produção de mourões e geração de carvão vegetal (Santos, 2023).

Segundo dados da IBÁ (2024), os plantios de *Eucalyptus* no Brasil estão majoritariamente concentrados na região Sudeste, que responde por 44% da área total cultivada no país, sendo que o estado de Minas Gerais se destaca como principal produtor regional, concentrando 63% dos plantios dessa região. Contudo, a região Centro-Oeste vem ganhando relevância no setor florestal, com expressiva expansão da base plantada, atingindo atualmente 1,6 milhão de hectares destinados ao cultivo de *Eucalyptus*.

De acordo com a Embrapa (2019), no contexto brasileiro, o *Eucalyptus* possui grande relevância econômica, destacando-se pelo rápido crescimento, elevada produtividade e notável capacidade de adaptação a diferentes condições climáticas. Essas características fazem com que seu cultivo seja intensamente estudado e aprimorado por pesquisadores do setor florestal.

Conforme Severo e Tomaselli (2000), o *Eucalyptus* é considerado alternativa promissora à substituição de espécies nativas em função de suas propriedades físico-mecânicas. Seu uso, especialmente, como madeira serrada ainda enfrenta limitações técnicas, que para Trugilho *et al.* (2006), resultam na redução do rendimento da madeira serrada e, em alguns casos, podem até mesmo inviabilizar sua utilização na indústria de transformação, ocasionando, consequentemente, o aumento dos custos de produção.

De acordo com a FAO (1981), embora o *Eucalyptus* apresente rápido crescimento e ampla adaptabilidade, determinadas propriedades limitam sua utilização na fabricação de produtos, como lâminas. Entre os principais fatores restritivos destacam-se as tensões de crescimento, fibras reversas, elevada retratibilidade e o colapso durante a secagem. Como estratégia para reduzir essas tensões, é comum a aplicação do aquecimento das toras por meio de água ou vapor

promovendo o amolecimento das fibras da madeira e a liberação das tensões de crescimento (USDA, 2010).

Segundo a FAO (1981), métodos como o aquecimento da madeira podem atenuar esses problemas, reduzindo as tensões, porém sem eliminá-los completamente. Esse fato foi evidenciado por Severo e Tomaselli (2000), em sua pesquisa onde a vaporização das toras, por um determinado período, não eliminou por completo as tensões de crescimento, mas proporcionou a redução significativa das mesmas para a espécie de *Eucalyptus dunnii*.

Segundo Severo e Tomaselli (2000), as tensões de crescimento desenvolvem-se ao longo do processo de formação da árvore, resultando em diferentes esforços internos na madeira. Na direção longitudinal, a região periférica, próxima à casca, encontra-se sob tração, enquanto a área central, próxima à medula, está submetida à compressão. Já na direção transversal à tora, ocorre o inverso: a madeira periférica sofre compressão e a central, tração. A interação dessas tensões pode ocasionar rachaduras nos topos das toras após o corte transversal. Para Souza (2002), as tensões de crescimento correspondem a esforços mecânicos gerados durante o desenvolvimento da árvore, cuja função é contribuir para a manutenção do equilíbrio da copa em resposta tanto a agentes ambientais, como luz, vento e inclinação do terreno, quanto a fatores silviculturais, como desbaste, poda e densidade de plantio.

De acordo com Kazmierczak (2012), a presença de tensão de crescimento é mais acentuada em árvores jovens do que em adultas. Essa diferença está relacionada a fatores como a maior proporção de lenho juvenil no tronco e a presença de grã espiralada. Esse fenômeno constitui uma das principais limitações na conversão de toras em madeira serrada, especialmente nos topos, resultando em rendimentos significativamente inferiores aos obtidos com outras espécies (Crespo, 2000).

Na Austrália, diversas espécies de *Eucalyptus* são empregadas na fabricação de compensados, muitos dos quais atendem aos mais elevados padrões de qualidade. No entanto, essas espécies frequentemente apresentam baixo rendimento de laminação, devido à ocorrência de rachaduras nas extremidades das toras, associadas às tensões internas de crescimento (USDA, 2010). Entretanto, segundo Jaeger e Ziger (2007), a utilização do gênero *Eucalyptus* na produção de compensados é favorecida por sua maior resistência em comparação à madeira de

Pinus. A busca por novas fontes de matéria-prima, aliada às vantagens apresentadas pelas madeiras de *Eucalyptus*, evidencia a necessidade de ampliar o volume de pesquisas voltadas às espécies, híbridos e clones desse gênero, bem como à avaliação da qualidade dos produtos dele derivados (Almeida; Bortoletto; Jankowsky, 2004).

1.4.2.1. *Eucalyptus dunnii*

Na região Sul do Brasil predominam os cultivos de *Eucalyptus dunnii*, devido à maior resistência dessa espécie às baixas temperaturas, além de se destacarem por seu rápido crescimento e pela boa adaptação a regiões com ocorrência de geadas e invernos rigorosos, características climáticas comuns nos estados dessa região (Kazmierczak, 2012).

A espécie *Eucalyptus dunnii* ocorre naturalmente em duas regiões entre o sudeste de Queensland e o noroeste de New South Wales, na Austrália, sendo indicada para plantios em áreas com temperaturas mínimas de até -5°C , desde que o resfriamento ocorra de forma gradual. Nessas condições, apresenta elevada tolerância a geadas, suportando até 22 eventos anuais, valor significativamente superior ao observado para *Eucalyptus saligna*. No Brasil, o *E. dunnii* destaca-se como a principal espécie de eucalipto cultivada em regiões de clima temperado, podendo ser propagado por sementes e apresentando elevada produtividade anual, superior a $50\text{ m}^3/\text{ha}$. Trata-se de uma espécie de rápido crescimento, com incrementos médios anuais de aproximadamente 3 m em altura e 3 cm em diâmetro (Filho; Santos, 2005).

Em relação às propriedades físicas da madeira, de acordo com Filho; Santos (2005), esta espécie apresenta madeira de cor clara e densidade básica de $0,50\text{ g/cm}^3$. Os estudos realizados por Pereira *et al.* (2000) encontraram uma densidade básica média de $0,55\text{ g/cm}^3$ em árvores de *E. dunnii* com 8 anos de idade, enquanto Rocha (2000) obteve uma densidade média de $0,62\text{ g/cm}^3$ em árvores com 16,5 anos, indicando aumento da densidade com a idade da árvore.

Uma das limitações para o uso da madeira de *Eucalyptus dunnii*, assim como da maioria das espécies de *Eucalyptus*, são as altas tensões internas de crescimento (Iwakiri *et al.*, 2007). Ainda segundo estes autores, uma das alternativas para minimizar os efeitos da instabilidade dimensional, seria a fabricação de produtos

reconstituídos de madeira através do processo de colagem de lâminas e partículas para obtenção de painéis compensados e particulados.

Pereyra (1994) avaliou a madeira de *Eucalyptus dunnii* para a produção de lâminas torneadas e painéis compensados, concluindo que a espécie apresenta alto potencial como matéria-prima para a indústria, embora tenham sido produzidos compensados com resistência à água, os testes de caracterização mecânica não comprovaram essa propriedade. Com isso, o autor recomendou a realização de novos estudos com diferentes formulações de adesivos fenólicos, com o objetivo de alcançar a resistência desejada.

Kazmierczak *et al.* (2017) destacam que, embora *Eucalyptus dunnii* não seja comumente utilizado na fabricação de painéis compensados, existe a necessidade de se investigar formas alternativas para o aproveitamento dessa espécie, pois a possibilidade de utilização da madeira de *E. dunnii* significa mais uma alternativa silvicultural, principalmente para as empresas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

1.4.3. Indústria de base florestal

Segundo a ABIMCI (2022), a indústria madeireira brasileira consolidou-se a partir de meados do século XX, impulsionada pela organização produtiva e pela introdução de melhorias no beneficiamento da madeira. Ainda segundo a associação, na segunda metade do século, o crescimento da demanda por conhecimento técnico sobre propriedades da madeira e processamento levou ao incremento em pesquisa e desenvolvimento, resultando no aprimoramento das linhas de produção e na modernização do setor, com ganhos expressivos de eficiência.

Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2022), ao longo da última década, a cadeia produtiva florestal brasileira apresentou, em termos reais, um desempenho significativamente superior ao do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, sendo que entre os anos de 2010 e 2021, enquanto o PIB do Brasil registrou um crescimento acumulado de 7,4%, o valor adicionado pela cadeia florestal teve um incremento de 20,5% no mesmo período.

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2022), mesmo diante das adversidades intensificadas pela pandemia de COVID-19, a cadeia produtiva de florestas plantadas manteve-se resiliente e apresentou contribuição significativa para a geração de empregos. Em 2021, o setor registrou cerca de 553 mil empregos diretos

e 1,59 milhão indiretos. Considerando também os postos induzidos, o total de ocupações passou de 2,88 milhões em 2020 para 2,97 milhões em 2021. Já segundo a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2022), em 2020, o setor madeireiro foi responsável pela geração de 334.388 postos de trabalho, dos quais 158.972 (48%) estavam vinculados à indústria madeireira e 175.416 (52%) à indústria de móveis de madeira, destacando-se a região Sul do país, que concentrou 52% do total de empregos do setor, seguida pela região Sudeste, com 31%.

Segundo a ABIMCI (2022), as regiões Sul e Sudeste concentram a maior parte das empresas dos setores madeireiro e moveleiro no Brasil. Em 2020, a indústria madeireira contabilizava 20.321 empresas, das quais 74% localizavam-se nessas regiões. No mesmo ano, a indústria moveleira registrou 28.259 empresas, com 78% também situadas no Sul e Sudeste, o que evidencia a concentração regional da atividade produtiva.

1.4.4. Painéis compensados

O compensado é definido como um painel produzido a partir da colagem em camadas de um número ímpar de lâminas, com a direção das fibras disposta perpendicularmente entre camadas adjacentes, conferindo ao painel maior estabilidade dimensional e resistência mecânica (Iwakiri e Trianoski, 2020). De acordo com Júnior *et al.* (2017), a madeira compensada é utilizada em diversas aplicações, como pisos, móveis, construção civil, sistemas construtivos em *wood frame*, entre outros.

Segundo Vieira *et al.* (2012), a produção de compensado no Brasil teve início com a utilização da espécie *Araucaria angustifolia* oriunda das florestas nativas da região Sul, posteriormente, na década de 1960, foi transferida para a Amazônia, com a exploração de espécies folhosas nativas e a partir da década de 1990, passou a adotar o *Pinus* de florestas plantadas no Sul como principal fonte de matéria-prima.

Conforme Lima *et al.* (2022), o compensado tem grande relevância para o setor econômico do país, especialmente na região Sul, onde se concentram as maiores plantações de *Pinus* e *Eucalyptus*, contribuindo para que a maior parte das empresas produtoras de compensado esteja localizada nas proximidades dessas áreas.

Dentre os maiores fabricantes de compensado de coníferas, destacam-se a China e os Estados Unidos, com o Brasil ocupando a quarta posição nesse *ranking*. Em 2021, a produção mundial foi de aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos. A China é o principal produtor e consumidor global de compensado de coníferas, respondendo por 61% da produção e 59% do consumo mundial. Os Estados Unidos ocupam a segunda posição, sendo responsáveis por 16% da produção e 18% do consumo global (ABIMCI, 2022).

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO MUNDIAL DE COMPENSADO (2012-2021)



FONTE: ABIMCI (2022).

Segundo a Associação Catarinense de Empresas Florestais (ACR, 2022), o Brasil figura entre os principais produtores mundiais de compensado de coníferas, destinando mais de dois terços de sua produção à exportação. Em 2021, os Estados Unidos foram o principal destino, com 41% do total, seguidos por México (8,4%) e Reino Unido (8%) (ABIMCI, 2022). No mesmo ano, o Paraná respondeu por 68% e Santa Catarina por 31% das exportações nacionais do produto (ABIMCI, 2022).

De acordo com Iwakiri *et al.* (2001), o *Pinus elliottii* e o *Pinus taeda* provenientes de reflorestamentos, passaram a ser utilizados em maior escala em função de suas propriedades favoráveis à laminação e da redução na oferta de madeiras tropicais com qualidade adequada para compensados. Além dos fatores técnicos e econômicos, questões ambientais também contribuíram para essa mudança, favorecendo a racionalização do uso da floresta amazônica como fonte de matéria-prima. Vieira *et al.* (2012) ressaltam que o compensado tropical apresenta, em média, preço aproximadamente 60% superior ao do compensado de *Pinus*, a

decisão de aquisição é influenciada não apenas pelo custo, mas também pela preferência estética do consumidor, uma vez que ambos possuem aplicações semelhantes.

O compensado de folhosas, amplamente empregado na construção civil e na indústria moveleira, é produzido principalmente a partir de madeiras tropicais provenientes de florestas nativas, embora parte da produção utilize espécies de plantios florestais, como paricá e eucalipto. As exportações brasileiras desse segmento mantiveram crescimento contínuo nas últimas duas décadas, mesmo durante a pandemia, registrando taxa média anual de 12% e volume de 123 mil m³ em 2021. Destaca-se, nesse contexto, o aumento das exportações de compensado de eucalipto, que somaram 66 mil m³ no mesmo ano (ABIMCI, 2021).

Jankowsky (1979), realizou um dos primeiros estudos no Brasil relacionados com a produção de lâminas e compensados a partir de espécies do gênero *Eucalyptus*. As pesquisas que investigam o uso do eucalipto para compensado não se restringem apenas ao melhor aproveitamento das espécies do gênero, mas também à busca por alternativas viáveis frente à escassez e restrições de uso das madeiras nativas e do *Pinus* (Bortoletto, 2003). Dentre as espécies de *Eucalyptus* com elevado potencial de utilização na indústria de painéis, destaca-se o *Eucalyptus dunnii*, conforme demonstrado por Pereyra (1994) em sua pesquisa. Segundo Wallis (1970 *apud* Jankowsky; Aguiar, 1983), embora o trabalho com a madeira de *Eucalyptus* seja considerado desafiador, é possível produzir compensados de elevada qualidade, desde que haja aperfeiçoamento dos equipamentos utilizados e o desenvolvimento e implementação de técnicas avançadas de processamento.

Vale destacar que dentro das estatísticas de painéis compensados reportadas, algumas indústrias fabricam painéis do tipo *combi*, os quais consistem em uma combinação de lâminas de coníferas e folhosas, com o objetivo de aprimorar a qualidade do produto final ou conferir propriedades específicas, como é do caso dos estudos feitos por Iwakiri *et al.* (2012), que analisaram a combinação de lâminas de *Pinus* e *Eucalyptus* em painéis compensados, concluindo que a maior densidade do *Eucalyptus* contribui de maneira significativa para o aumento das propriedades mecânicas das chapas.

1.4.4.1. Compensado Estrutural

A classificação do compensado é definida por meio de normas técnicas, podendo ser estrutural ou não estrutural, e é determinada com base nas propriedades físicas e mecânicas do produto. De acordo com Iwakiri *et al.* (2012), os painéis estruturais devem apresentar, além de durabilidade, resistência mecânica adequada para garantir sua aplicação segura e eficiente em sistemas construtivos. Ainda de acordo com estes autores, a composição estrutural do painel compensado constitui um dos requisitos fundamentais para a valorização e o desempenho técnico do produto.

O painel classificado como compensado estrutural para uso exterior é fabricado com resinas à prova d'água, como a fenol-formaldeído, cuja composição química confere resistência à umidade e ao contato direto com a água, esses painéis são destinados principalmente aos setores da construção civil, construção naval e fabricação de embalagens (Baldwin, 1995; Pizzi, 1983).

Com o avanço de novas tecnologias construtivas no setor da construção civil, como os sistemas *Light Wood Frame (LWF)* e *Light Steel Frame (LSF)*, que utilizam chapas de compensado como parte da estrutura, a padronização do produto no mercado nacional passou por atualizações. Em 2021, foi revisada a norma técnica e publicada a NBR 17002 (ABNT, 2021) – Compensado: Requisitos e métodos de ensaio, que passou a abranger o uso estrutural do compensado. A norma agora contempla exigências específicas quanto à resistência à carga, aplicáveis quando a chapa compõe parte permanente de edificações ou de outros tipos de construções (ABIMCI, 2022).

1.4.5. Construção civil e madeira

O setor da construção é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa, sendo responsável por impressionantes 37% das emissões globais. A produção e o uso de materiais como cimento, aço e alumínio contribuem com uma parcela significativa dessas emissões de carbono (UNEP, 2023).

No Brasil, esse cenário é agravado pela predominância do sistema convencional de construção, baseado no uso de estruturas em alvenaria e concreto

armado. Nesse contexto, o uso da madeira como método construtivo ainda é incipiente no país, especialmente em aplicações estruturais (Soares, 2023).

Segundo Paese (2012), o uso da madeira na construção civil brasileira foi historicamente limitado a aplicações secundárias, o que contribuiu para sua associação a moradias precárias e a percepção de baixa qualidade, afastando seu uso em edificações formais. Já para Pizzol, Mantilla e Carrasco (2017), o mercado da construção civil para a madeira apresenta grande potencial, uma vez que se trata de um material versátil, capaz de reduzir o tempo de execução das obras, aprimorar a qualidade final e viabilizar construções secas e sustentáveis, em consonância com os princípios do desenvolvimento sustentável.

O Brasil ainda tem um longo caminho a percorrer no desenvolvimento de componentes padronizados para construções mais sustentáveis, econômicas, de rápida execução e com menor impacto ambiental (Viana, 2020). Sathre e Gustavsson (2009), analisaram o uso de produtos de madeira como estratégia de mitigação das mudanças climáticas e constataram que sua produção demanda menor consumo energético e resulta em menores emissões de carbono em comparação ao concreto.

De acordo com Rezende (2019), os compensados, segundo as empresas que os fabricam, são produzidos sob rigorosos critérios socioambientais, utilizando madeira de reflorestamento e com baixa emissão de formaldeído. Essa preocupação se deve ao fato de a indústria da construção civil ser uma das que mais poluem no mundo. O mercado tem direcionado sua atenção para sistemas construtivos industrializados, com soluções sustentáveis e inovadoras, como o *wood frame*, constituído por elementos estruturais, compostos por peças leves de madeira, que viabiliza a construção de moradias em larga escala (ABIMCI, 2022).

O *wood frame* é um sistema industrializado, durável e estruturado com perfis de madeira reflorestada tratada. Ele forma painéis de pisos, paredes e telhados que são combinados e/ou revestidos com outros materiais, com o objetivo de melhorar o conforto térmico e acústico, além de proteger a edificação contra intempéries e fogo. Nos Estados Unidos, a tecnologia *wood frame* é utilizada em 95% das residências construídas (Molina; Calil, 2010).

De acordo com Resende *et al.* (2021), o sistema *wood frame* apresenta vantagens em relação à alvenaria convencional, destacando-se pela maior rapidez de execução, utilização de materiais sustentáveis e renováveis, melhor desempenho termoacústico e redução do custo total da edificação. Segundo Molina e Calil (2010),

a madeira é utilizada principalmente como estrutura interna de paredes e pisos, resultando em uma construção leve e de rápida execução, pois seus sistemas e subsistemas são industrializados e montados por equipes especializadas, em etapas bem definidas e de forma independente.

Por outro lado, Resende *et al.* (2021) mencionam que no contexto brasileiro, sua adoção enfrenta limitações relacionadas à escassez de mão de obra especializada, à insuficiente capacitação técnica de engenheiros e arquitetos, à ausência de disciplinas específicas sobre construção a seco e sustentabilidade nos cursos de graduação, bem como à predominância cultural do modelo construtivo em alvenaria.

O sistema *wood frame* utiliza predominantemente madeira de *Pinus* e *Eucalyptus* provenientes de reflorestamento e é constituído por elementos como vigas, montantes e chapas de OSB ou compensado. O *wood frame* é considerado um sistema sustentável, sendo aplicado em construções comerciais, residenciais, pousadas e habitações de interesse social (Gasparin, 2018).

Segundo Castro (2005), outro sistema industrializado de construção a seco é o *Light Steel Framing*, o qual trata-se de um sistema construtivo racionalizado que utiliza perfis de aço galvanizado na composição de painéis estruturais e não estruturais, vigas de piso, vigas secundárias, tesouras de telhado e demais componentes. As paredes estruturais, chamadas de painéis estruturais, são formadas por grande quantidade de montantes galvanizados leves, cuja função é distribuir uniformemente as cargas e transmiti-las ao solo. Segundo Campos (2014), por se tratar de uma estrutura autoportante, as chapas aplicadas nas paredes externas desempenham não apenas a função de fechamento, mas também atuam como elementos de contraventamento, conferindo estabilidade ao conjunto e essa vedação pode ser realizada por meio de diferentes tipos de placas, entre as quais se destacam o OSB estrutural, a placa cimentícia e a placa de gesso acartonado. E também, segundo a norma NBR 16970 (ABNT, 2022) – *Light Steel Frame* que abrange esse tipo de sistema construtivo, é possível utilizar o compensado estrutural para o fechamento do sistema.

1.4.6. Normativa *Light Wood Frame*

O setor industrial madeireiro e de base florestal brasileiro vivencia, atualmente, um dos momentos mais significativos de sua história recente com a publicação da norma técnica para construções em *Light Wood Frame* pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023). Esta normativa estabelece diretrizes para edificações residenciais e empreendimentos construídos com madeira, representando um avanço fundamental para a consolidação do sistema construtivo industrializado em madeira no Brasil. A publicação da NBR 16936 (ABNT, 2023) – *Edificações em Light Wood Frame* é fruto de iniciativas articuladas ao longo de mais de duas décadas por entidades, empresas e profissionais do setor (ABIMCI, 2023).

Segundo Sugahara (2024), a implementação da norma brasileira para o sistema *wood frame* deve impulsionar a demanda por materiais compatíveis com essa tecnologia, tornando-se essencial desenvolver estudos sobre a aplicação desses materiais em paredes, pisos, lajes e estruturas de cobertura, a fim de garantir conformidade com padrões de qualidade e desempenho, fortalecendo a consolidação técnica e normativa do sistema na construção civil brasileira. Com essa demanda na construção e a pouca disponibilidade de madeira de *Pinus spp.*, as espécies de rápido crescimento, por exemplo, os *Eucalyptus spp.*, são potenciais substitutos para suprir essa demanda industrial (Coneglian *et al.*, 2017).

1.5. METODOLOGIA GERAL

1.5.1. Localização e coleta do material

Este estudo foi realizado em uma fábrica de painéis compensados localizada em Curitiba, Paraná. A empresa produz compensados utilizando apenas madeira de pinus (*Pinus spp.*). No entanto, devido às dificuldades em obter toras com a idade adequada para o seu uso e a um custo acessível, iniciou-se uma pesquisa para acrescentar o *Eucalyptus dunnii* à composição, uma vez que essa espécie apresenta disponibilidade próxima ao local de laminação, situado no sudeste do Paraná na cidade de Teixeira Soares. Neste contexto, as toras utilizadas no experimento foram provenientes de uma floresta plantada com idade de 15 anos, localizada no município de Inácio Martins - PR, a 78 km de distância do local de laminação.

A pesquisa foi conduzida em duas etapas, apresentadas em capítulos nesta dissertação. Na primeira, avaliou-se o efeito do aquecimento das toras na qualidade dos painéis compensados, com o objetivo de identificar a condição que proporcionasse melhor desempenho em termos de qualidade do material e resistência. As toras foram laminadas industrialmente e os painéis foram produzidos em escala laboratorial. Cabe destacar que, no contexto industrial, ainda existe um número significativo de empresas que não adotam o processo de aquecimento no tratamento de toras de eucalipto.

A segunda etapa da pesquisa consistiu na produção dos painéis em escala industrial, puros e em combinação com *Pinus spp.*, utilizando-se lâminas obtidas a partir de toras de *Eucalyptus dunnii* com aquecimento, condição previamente selecionada com base nos resultados da etapa anterior. Após a confecção, os painéis foram encaminhados ao Laboratório de Painéis de Madeira da UFPR para a realização de testes de qualidade, a fim de verificar sua conformidade com os requisitos para compensado estabelecidos pela NBR 16936 (ABNT, 2023) – *Edificações em Light Wood Frame*.

CAPITULO 2

INFLUÊNCIA DO AQUECIMENTO DAS TORAS DE *Eucalyptus dunnii* NAS PROPRIEDADES DE PAINÉIS COMPENSADOS

RESUMO

O setor madeireiro brasileiro vive um momento particularmente significativo com a publicação da norma NBR 16936 (ABNT, 2023) – *Edificações em Light Wood Frame*, marco fundamental para a consolidação do sistema construtivo industrializado em madeira no país. A normativa tende a ampliar a demanda por materiais compatíveis com essa tecnologia, tornando imprescindíveis estudos que garantam a qualidade e o desempenho de produtos empregados como elementos estruturais. Considerando o aumento esperado no consumo de compensado e a limitada disponibilidade de madeira de *Pinus spp.* com as características necessárias para uso estrutural, torna-se essencial a avaliação de processos industriais envolvendo espécies alternativas, entre as quais o eucalipto se destaca como substituto promissor. Nesse contexto, o presente estudo analisou a influência do aquecimento de toras de *Eucalyptus dunnii* sobre a qualidade das lâminas e sobre as propriedades físico-mecânicas de painéis compensados produzidos com essas lâminas. Toras com e sem aquecimento foram laminadas, avaliando-se o percentual de toras inutilizadas no processo, qualidade superficial das lâminas, além da densidade básica e das propriedades químicas da madeira. Os painéis foram produzidos utilizando as lâminas das duas condições, segregadas em dois tratamentos, colados a partir de batida de cola fenólica com 32% de sólidos, em gramatura de 180 g/m², e consolidados sob ciclo de prensagem com temperatura de 130 °C e pressão de 12 kgf/cm² pelo tempo de 8 minutos. A avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis compensados foi realizada conforme as normas NBR 17002 (ABNT, 2021) e 12466:1 e 2 (ABNT, 2012). Os resultados foram analisados estatisticamente e comparados com os parâmetros estabelecidos na norma NBR 16936 (ABNT, 2023) para utilização em edificações *Light Wood Frame*. Os resultados indicaram que o aquecimento proporcionou lâminas mais uniformes e com menor incidência de trincas e defeitos superficiais, no entanto, com elevado percentual de toras inutilizadas no processo de laminação devido as trincas e rachaduras de topo. O processo também reduziu parcialmente os teores de extrativos solúveis, possibilitando a remoção de compostos de baixo peso molecular, assim como a densidade básica. Os painéis compensados produzidos a partir de lâminas aquecidas apresentaram melhora nas propriedades físicas, contribuindo para maior estabilidade dimensional dos painéis, condição essencial em aplicações onde a umidade influencia diretamente a durabilidade das edificações e na resistência à flexão estática, superando os requisitos estabelecidos pela NBR 16936 (ABNT, 2023) para uso estrutural em sistemas *Light Wood Frame*. A qualidade de colagem também atendeu os requisitos normativos, com Classe III de uso. Conclui-se que o aquecimento de toras de *Eucalyptus dunnii* constitui uma alternativa tecnicamente viável para melhorar a qualidade das lâminas e aumentar o desempenho dos painéis compensados, reforçando sua adequação às exigências da construção em *Light Wood Frame*.

Palavra-chave: painel compensado estrutural; aquecimento; *light wood frame*; *Eucalyptus dunnii*.

2.1. INTRODUÇÃO

O compensado é um painel constituído por lâminas de madeira coladas com as fibras dispostas perpendicularmente entre si, configuração que lhe confere maior estabilidade dimensional e resistência mecânica. A qualidade de um painel compensado está diretamente relacionada às características da madeira utilizada, à conformidade das lâminas e aos procedimentos adotados durante a manufatura.

Em razão de suas propriedades favoráveis, esse material é amplamente empregado em diferentes setores, como na construção civil, na fabricação de móveis, embarcações, instrumentos musicais, embalagens industriais e caixas, entre outras aplicações (Bortoletto Júnior e Garcia, 2004).

A escassez de madeira de *Pinus spp.* tem contribuído para o esgotamento das fontes tradicionalmente empregadas na indústria de compensados. Nesse contexto, espécies de rápido crescimento, como o *Eucalyptus spp.*, despontam como alternativas viáveis para suprir a crescente demanda industrial (Coneglian *et al.*, 2017). De acordo com Severo e Tomaselli (1999), em função de suas propriedades físico-mecânicas, a madeira de eucalipto apresenta-se como uma boa alternativa. Contudo, seu processamento ainda gera frustrações devido ao surgimento de defeitos que ocasionam perdas significativas de matéria-prima e, conseqüentemente, prejuízos econômicos.

Entre os principais problemas associados ao gênero, destacam-se os elevados níveis de tensões de crescimento, forças internas presentes na madeira em estado verde que se manifestam sob a forma de rachaduras nas toras, tanto durante a derrubada quanto no desdobro, porém, uma estratégia para minimizar esses efeitos é o tratamento térmico de toras, realizado pela aplicação de vapor ou água quente por determinado período, com o objetivo de aquecer o material, promover sua plasticização e aliviar as tensões internas (Calonego; Severo, 2005). Nesse sentido, o aquecimento em água ou vapor busca amolecer a madeira e liberar tais tensões (USDA, 1999).

Rozas Mellado (1993) ao estudar *Eucalyptus grandis*, confirmou que o tratamento de vaporização aplicado em toras previamente aneladas foi eficaz na liberação das tensões de crescimento. O autor recomendou a vaporização por 18 horas, a 90 °C, em toras com diâmetro entre 15 e 20 cm, destacando que essa prática reduziu rachaduras e empenamentos durante o desdobro, melhorando a qualidade da

madeira serrada. Resultados semelhantes foram obtidos por Coneglian *et al.* (2017), que verificaram que o tratamento térmico com vapor indireto gerou lâminas com classificação superior, quando comparado à imersão em água quente, demonstrando a viabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de compensados. Rocha (2011) também observou que a vaporização em diferentes níveis promoveu alterações mínimas nas propriedades químicas da madeira e não afetou sua resistência natural a agentes xilófagos, confirmando o caráter positivo do processo.

Dentre os eucaliptos, uma espécie sugerida por Pereyra (1994) é o *Eucalyptus dunnii* (Maid), que apresenta elevado potencial de crescimento, boa adaptação a temperaturas negativas, e, densidade básica entre 0,45 e 0,55 g/cm³. Ensaio realizados pelo autor com compensados de *E. dunnii* demonstraram desempenho satisfatório, evidenciando seu alto potencial como matéria-prima para a indústria de painéis.

Neste contexto, considerando o possível aumento da demanda por compensado decorrente de sua inclusão como alternativa para painéis de contraventamento na normativa brasileira de *Light Wood Frame*, torna-se necessária a avaliação de espécies alternativas ao *Pinus*, de modo a preparar o setor produtivo para a utilização mais eficiente da matéria-prima. Assim, esta pesquisa teve como objetivo analisar o efeito do aquecimento de toras de *Eucalyptus dunnii* sobre as principais propriedades da madeira, das lâminas e de painéis compensados multilaminados.

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizadas toras de *Eucalyptus dunnii* de um plantio de 15 anos situado na cidade de Inácio Martins – PR e posteriormente laminadas na cidade de Teixeira Soares - PR. Utilizaram-se 200 toras, sendo 90 toras destinadas a laminação sem processo de aquecimento e 110 toras destinadas a laminação com processo de aquecimento. A amostragem das toras no pátio para cada um dos processos de laminação foi aleatória.

Anterior a realização da laminação foram coletados discos dos topos de 10 toras de cada condição avaliada (sem e com aquecimento) para avaliação da densidade básica e das propriedades químicas da madeira.

2.2.1. Determinação da densidade básica e propriedades químicas

Os discos coletados das toras de *Eucalyptus dunnii* (figura 02) foram provenientes de diferentes indivíduos, sendo dez toras submetidas ao processo de aquecimento e dez sem aquecimento, os quais foram seccionados em cunhas. Duas cunhas diametralmente opostas foram utilizadas para a determinação da densidade básica, e as outras duas, destinadas à análise das propriedades químicas.

FIGURA 2 - DISCOS DAS TORAS DE *Eucalyptus dunnii* PARA DENSIDADE BÁSICA E PROPRIEDADES QUÍMICAS



FONTE: A autora (2025).

2.2.1.1. Densidade básica

A determinação da densidade básica da madeira com e sem aquecimento foi efetuada de acordo com a Norma NBR 11941 (ABNT, 2003) - Madeira – Determinação da densidade básica, pela relação massa seca e volume verde ou saturado.

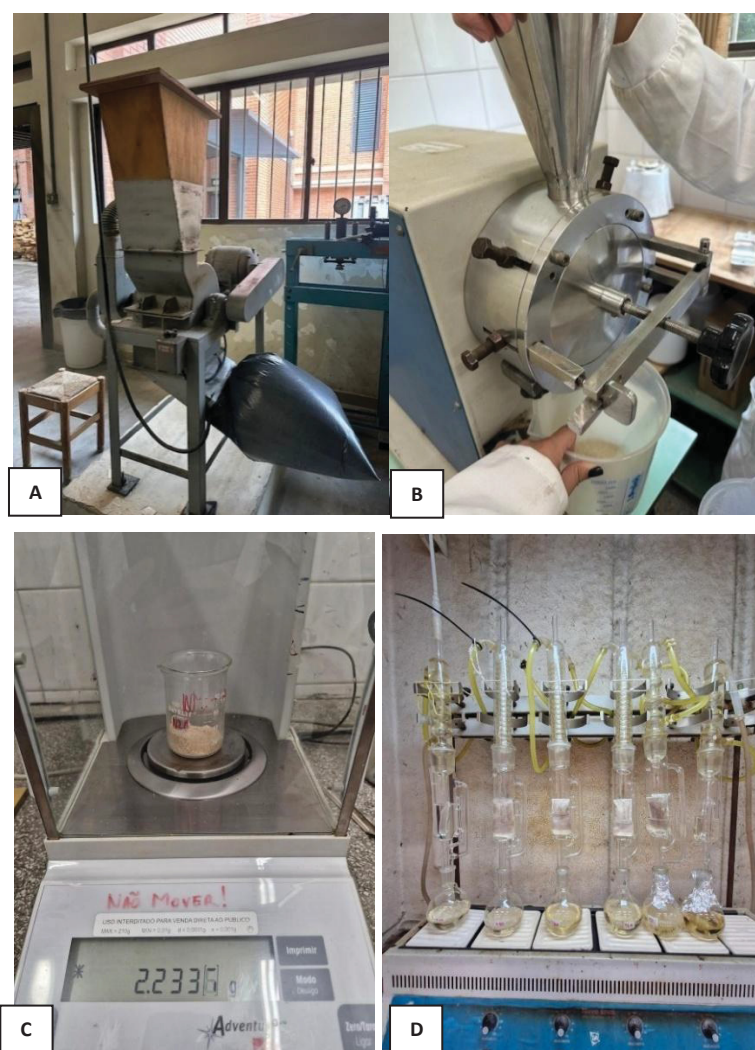
2.2.1.2. Propriedades químicas

Para a determinação das propriedades químicas da madeira com e sem processo de aquecimento as cunhas amostradas foram descascadas e em seguida fragmentadas em cavacos em picador de disco. Após a secagem natural dos cavacos, estes foram reduzidos em moinho de martelos e sequencialmente em moinho de facas

tipo Wiley para obtenção da serragem. Após a moagem, a serragem foi peneirada para a obtenção da fração 40/60 *mesh*.

A análise química foi realizada no Laboratório de Química da Madeira da UFPR, cuja análises foram feitas em duplicata. As propriedades químicas analisadas foram a determinação do teor de extrativos em água fria e quente, extrativos totais e teor de cinzas, conforme as normas TAPPI 207 (1999), TAPPI 204 (1997) e TAPPI 211 (2002), respectivamente.

FIGURA 3 – PREPARAÇÃO E ANÁLISE QUÍMICA



LEGENDA: A: moagem dos cavacos; B: moagem da serragem; C: pesagem do material; D: extração em etanol tolueno.

2.2.2. Laminação das toras

Considerando que o *Eucalyptus dunnii* ainda não possui aprovação para a fabricação de compensados estruturais nesta indústria — cuja produção apresenta

caráter esporádico e espessuras distintas das usualmente praticadas, foco deste estudo —, essa etapa inicial de laminação, de natureza exploratória, foi conduzida com o propósito de avaliar a viabilidade técnica dessa espécie e identificar o processo mais adequado, sem comprometer o fluxo da linha de produção. Para essa avaliação, foram selecionadas toras destinadas à obtenção de lâminas com espessura de 1,7 mm, parâmetro adotado pela empresa na fabricação de compensados para pisos, principal produto da linha industrial. No ensaio, o aquecimento das toras foi conduzido durante 14 horas, sob temperatura controlada de 70 °C, de modo a favorecer o amolecimento da madeira e otimizar o processo de laminação.

FIGURA 4 - TORAS SELECIONADAS PARA A LAMINAÇÃO



FONTE: A autora (2024)

LEGENDA: A: toras com processo de aquecimento; B: toras sem o processo de aquecimento.

A laminação foi realizada em torno com fuso, utilizando-se um ângulo de faca de 43° e velocidade de laminação de 60 m/min. As lâminas obtidas foram guilhotinadas por um sistema automático acoplado à saída do torno, a fim de atingir as dimensões finais de 1,28 m de largura e 2,52 m de comprimento.

Após a laminação, foram analisadas as quantidades de toras processadas em relação à quantidade de toras que apresentaram desprendimento da garra no momento de torneamento, em decorrência da presença de rachaduras. Adicionalmente, foi realizada uma avaliação visual das lâminas para identificar eventuais diferenças significativas entre aquelas provenientes de toras submetidas ao processo de aquecimento e as não aquecidas.

Em seguida, as lâminas foram secas em secador a vapor com seis câmaras, operando a uma temperatura máxima de 160 °C. O processo de secagem das lâminas

seguiu os parâmetros específicos da fábrica, com o objetivo de reduzir a umidade para 5% a 8%. Após a secagem, o material também passou por análise visual e foi encaminhado para a cidade de Curitiba, onde foram produzidos os painéis compensados e realizados os ensaios de qualidade do produto.

FIGURA 5 – QUALIDADE SUPERFICIAL DAS LÂMINAS COM E SEM PROCESSO DE AQUECIMENTO



FONTE: A autora (2024)

LEGENDA: A: lâminas com processo de aquecimento; B: lâminas sem o processo de aquecimento.

2.2.3. Produção dos painéis compensados

Foram fabricados painéis compensados compostos por lâminas de *Eucalyptus dunnii*, com e sem o processo de aquecimento, conforme o delineamento experimental apresentado na TABELA 1. A produção dos painéis foi realizada no Laboratório de Painéis de Madeira da UFPR, sendo produzidos 5 repetições por tratamento.

TABELA 1 - DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DOS PAINÉIS COMPENSADOS DE *Eucalyptus dunnii* COM E SEM AQUECIMENTO DE TORAS.

Tratamento	Aquecimento das toras
1	Sem aquecimento
2	Com aquecimento

FONTE: A autora (2025).

Inicialmente, as lâminas foram classificadas e guilhotinadas nas dimensões de 500 x 500 mm. Optou-se por composições formadas por cinco lâminas de 1,7 mm de espessura, com as fibras orientadas perpendicularmente entre camadas adjacentes. Para a colagem de lâminas, foi utilizada a resina fenol-formaldeído, com teor de sólidos de 54,7% e viscosidade Brookfield de 622 cP.

O preparo da batida de cola foi realizado por meio da mistura da resina (59%) com extensor à base de trigo (22%) e água (19%), gerando um teor de sólidos de 32%, similar ao praticado na empresa.

O adesivo foi aplicado manualmente sobre a superfície das lâminas e com gramatura de 180 g/m² (linha simples). Após a aplicação do adesivo montou-se os painéis, os quais passaram pelo processo de pré-prensagem a frio com pressão de 3 kgf/cm² por 7 minutos e montagem de 40 minutos.

Os painéis foram consolidados por meio de prensagem a quente, com temperatura de 130 °C, pressão específica de 12 kgf/cm² e tempo de permanência na prensa de 08 minutos. Após a prensagem, os painéis foram pré-esquadrejados e acondicionados em câmara climática à temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 5%, até a sua estabilização.

2.2.4 Avaliação dos painéis compensados

Após a confecção, os painéis compensados foram submetidos a ensaios de qualidade com o objetivo de verificar sua conformidade com os parâmetros estabelecidos na norma NBR 16936 (ABNT, 2023)– Edificações em *Light Wood Frame*. Foram realizados ensaios de massa específica aparente, absorção de água, inchamento em espessura, teor de umidade e resistência à flexão de acordo com a NBR 17002 (ABNT, 2021) – Compensado – Requisitos e Métodos, e qualidade de colagem (cisalhamento) que seguiu os procedimentos preconizados pela norma NBR – 12466:1 e 2 (ABNT, 2012) – Madeira Compensada – Qualidade de colagem e Requisitos.

Para painéis destinados a aplicações estruturais, a normativa NBR 17002 (ABNT, 2021) estabelece que os ensaios de resistência à flexão estática devem atender aos critérios de desempenho previstos em seu Anexo F, bem como aos requisitos estabelecidos pelas normas EN 789 e EN 1058. Contudo, no presente

trabalho, a análise será realizada exclusivamente com base nos critérios definidos no Anexo F da referida norma brasileira.

2.2.5 Análise estatística

Os resultados obtidos para a densidade básica da madeira e para as propriedades dos painéis foram submetidos a análise estatística por meio dos testes de *outliers* (Grubbs), homogeneidade de variância (Bartlett) e comparação de médias de *t* de Student, todos a 5% de significância.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir referem-se ao efeito do aquecimento ou não de toras de *Eucalyptus dunnii* destinadas à laminação.

2.3.1. Densidade básica da madeira

Os resultados médios da densidade básica da madeira das toras sem e com aquecimento são apresentadas na TABELA 2.

TABELA 2 - RESULTADOS MÉDIOS DE DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.

Tratamento	Densidade básica (g/cm ³)	Coefficiente de variação (%)
Sem aquecimento	0,552 a	9,23
Com aquecimento	0,494 b	8,71

LEGENDA: Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste *t* de Student a 5% de significância. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

Os resultados mostraram diferença significativa entre os tratamentos, as toras submetidas ao processo de aquecimento apresentaram média de massa específica básica menor do que aquelas não submetidas ao aquecimento. A redução pode ser atribuída à extração parcial de extrativos solúveis e outros componentes celulares durante o aquecimento, o que altera a relação massa/volume da madeira. Além disso, Rodrigues *et al.* (2018) relatam que a vaporização da madeira causa degradação principalmente hemiceluloses, onde também encontraram em sua pesquisa uma redução significativa na densidade básica das toras de *E. grandis* submetidas ao processo de vaporização.

Ainda com base no resultado da TABELA 2, o *Eucalyptus dunnii*, independente do processo de aquecimento apresentou valores médios dentro do recomendado para laminação. Segundo Walker (1993) *apud* Bortoletto (2003), as espécies adequadas para laminação possuem massa específica básica entre 0,38 e 0,70 g/cm³, com preferência para aquelas com massa específica básica de 0,50 g/cm³. Segundo Iwakiri *et al.* (2012), a densidade e a porosidade da madeira têm influência direta na formação da linha de cola e ligação entre as lâminas que constituem o painel.

2.3.2. Propriedades químicas da madeira

A TABELA 3 apresenta os resultados das propriedades químicas da madeira de *Eucalyptus dunnii*, avaliados nesse estudo sob as condições de aquecimento ou natural.

TABELA 3 RESULTADOS MÉDIOS DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA.

Propriedade	Sem aquecimento	Aquecida
Extrativos em água fria (%)	1,85 (3,44)	1,17 (21,24)
Extrativos em água quente (%)	3,17 (2,23)	2,92 (8,23)
Extrativos totais (%)	3,41 (2,70)	3,20 (8,84)
Cinzas (%)	0,45 (0,00)	0,38 (9,43)

LEGENDA: Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

Os resultados médios indicaram que o processo de aquecimento promoveu uma leve redução da concentração de extrativos solúveis em água fria e em água quente. Tal comportamento ocorre porque o aquecimento favorece o amolecimento da madeira e a consequente liberação de substâncias hidrossolúveis presentes em sua estrutura. Segundo Foelkel (1977), diversas classes de compostos são enquadradas como extrativos e a extração em água fria permite identificar a presença de açúcares, amido, gomas, substâncias pécicas, mucilagens, parte dos taninos e parte dos pigmentos coloridos. Além disso, a extração em água quente é capaz de remover alguns sais inorgânicos e polissacarídeos de baixo peso molecular, incluindo gomas e amidos (PETTERSEN, 1984).

De forma semelhante, observou-se uma ligeira diminuição no teor de extrativos totais, indicando a possível remoção de outros componentes, além dos removidos pela água fria e água quente. Os compostos solúveis em solventes orgânicos pertencem às classes dos ácidos graxos e ésteres graxos, álcoois de cadeia longa, esteroides, compostos fenólicos e glicosídeos (SJÖSTRÖM; ALÉN, 1998; FOELKEL, 1977).

Segundo Soares *et al.* (2015), os extrativos possuem como característica principal o baixo peso molecular e podem apresentar caráter hidrofóbico ou hidrofílico. Dependendo de sua estrutura química, a escolha dos solventes utilizados no processo de extração determina a fração de extrativos removida da madeira, influenciando, assim, propriedades físicas do material, especialmente aquelas relacionadas à higroscopicidade e à anisotropia. Essas reduções são importantes para processos de colagem, visto que a presença de extrativos pode interferir negativamente na adesão (IWAKIRI; TRIANOSKI, 2020), podendo prejudicar o processo de cura da resina quando presentes em elevadas concentrações (IWAKIRI; PEREIRA; NISGOSKI, 1999).

Embora tenha ocorrido uma leve redução nos teores de extrativos analisados, o processo de aquecimento não resultou em alterações substanciais na composição do material em comparação ao não aquecido. Essa discreta redução pode estar relacionada ao tipo de processo empregado, uma vez que, segundo Coneglian *et al.* (2017), o tratamento térmico com vapor indireto promove um aquecimento mais brando do que o obtido por meio de aquecimento em água quente. A água atua como um solvente eficiente para substâncias, favorecendo sua difusão no meio líquido.

De modo geral, a madeira de *Eucalyptus dunnii* apresentou composição química compatível com a de outras espécies do gênero *Eucalyptus*. Os resultados obtidos nesta pesquisa se aproximam daqueles reportados por Latorraca (1996), ao avaliar a viabilidade de utilização de *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis madeira-cimento.

2.3.3. Laminação e qualidade das lâminas

Na TABELA 4 é apresentado o percentual de toras inutilizadas no processo de laminação, avaliadas nas condições experimentais sem aquecimento e com aquecimento.

TABELA 4 – RESULTADO DA QUANTIDADE DE TORAS INUTILIZADAS NO TORNO LAMINADOR.

Tratamento	Quantidade de toras	% Toras desprendidas
Não aquecidas	90	8,0
Aquecidas	110	53,5

Os resultados indicaram que o aquecimento das toras influenciou negativamente seu processamento em torno laminador, sendo que 53% das toras aquecidas apresentaram desprendimento do equipamento, inviabilizando sua laminação completa. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que as toras que foram submetidas ao processo de aquecimento apresentaram maior incidência de rachaduras nas extremidades, e estas rachaduras provocaram o desprendimento durante a laminação, impedindo a continuidade do processo. Em contrapartida, as toras não aquecidas apresentaram melhor condição de laminação, onde apenas 8% destas desprenderam-se do torno laminador.

Problema semelhante foi relatado por Pereyra (1994), que atribuiu o desprendimento à presença de rachaduras profundas na extremidade das toras, defeitos causados por tensões de crescimento e intensificados pelo aquecimento. Coneglian *et al.* (2017) também observaram problemas de fixação das garras do torno laminador devido à presença de profundas rachaduras de topo quando processaram *Eucalyptus grandis* W. Hill com dois diferentes tratamentos térmicos, atribuindo tais problemas às rachaduras provocadas pelas tensões de crescimento.

FIGURA 6 - TORAS INUTILIZADAS NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO.



LEGENDA: A: tora aquecida inutilizada com mais de 24 cm de diâmetro; B: toras sem aquecimento inutilizadas com 15 cm.

Uma forma de reduzir os problemas relativos as rachaduras de topo no processo de laminação e consequentemente aumentar o rendimento de toras processadas é realizar o seu aquecimento em comprimentos maiores, técnica descrita por Pereyra (1994) que consiste em submeter toras com maior comprimento ao processo de aquecimento e, posteriormente, realizar o corte dos extremos do fuste que apresentarem rachaduras. Dessa forma, obtém-se uma tora, isenta de defeitos nas extremidades.

Além do procedimento mencionado acima, e de acordo com a pesquisa conduzida por Aguiar (1986), as tensões internas de crescimento, responsáveis pela formação de rachaduras nas extremidades das toras de *Eucalyptus* podem ser atenuadas por meio da aplicação de técnicas adequadas, entre as quais se destaca o anelamento da tora. A combinação do anelamento pode constituir uma estratégia eficaz para mitigar as tensões de crescimento em espécies com elevada propensão a esse fenômeno, como a maioria das espécies do gênero *Eucalyptus*, recomendando-se a continuidade de estudos que explorem essa interação em diferentes condições operacionais.

Dentre os procedimentos avaliados, a empresa optou por dar continuidade aos estudos com o cozimento de toras em maiores comprimentos, seguido do corte para o tamanho adequado à laminação, de modo a reduzir as áreas suscetíveis a rachaduras. Além disso, optou-se pela substituição do torno de laminação por um modelo equipado com roletes, visando à otimização do processo produtivo e ao aumento do rendimento das toras.

2.3.3.1. Qualidade superficial das lâminas

Embora as toras não submetidas ao aquecimento tenham apresentado maior rendimento na laminação, as lâminas produzidas exibiram acabamento insatisfatório após o processo de secagem, caracterizado por elevada incidência de rachaduras, fissuras, fendas, aspecto quebradiço e maior rugosidade superficial principalmente ao redor dos nós, conforme pode ser observado na FIGURA 7.

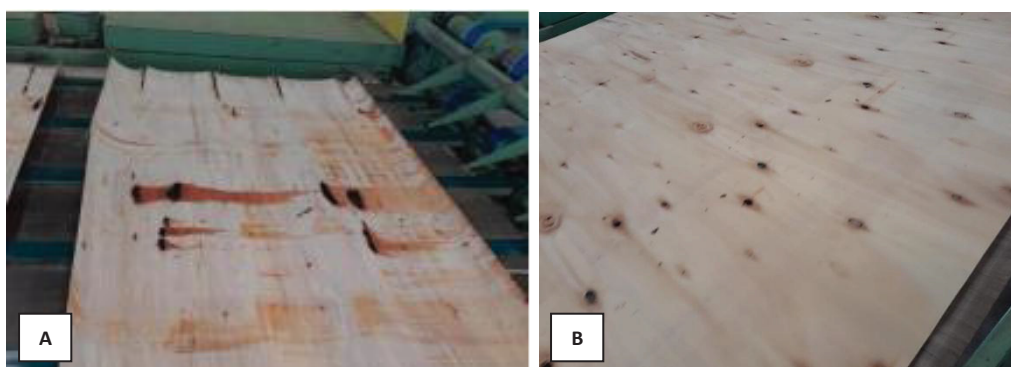
FIGURA 7 – QUALIDADE SUPERFICIAL DAS LÂMINAS APÓS A SECAGEM



LEGENDA: A: lâminas provenientes de toras sem aquecimento; B: lâminas proveniente de toras com o aquecimento.

Por outro lado, nas lâminas provenientes de toras submetidas ao aquecimento observou-se a presença de resíduos de coloração escura, possivelmente relacionados à migração de extrativos, conforme ilustrado na FIGURA 8. Apesar disso, essas lâminas apresentaram qualidade superficial superior, ainda que com elevada incidência de rachaduras nas extremidades.

FIGURA 8 - LÂMINAS APÓS PROCESSO DE LAMINAÇÃO



LEGENDA: A: lâmina proveniente de tora com aquecimento, com extrativos em sua superfície. B: lâmina proveniente de tora sem aquecimento

A melhor qualidade superficial das lâminas obtidas a partir de toras aquecidas pode ser atribuído ao amolecimento das fibras promovido pelo aquecimento, favorecendo o melhor acabamento das mesmas e facilitando o processo de laminação. Esta afirmação é corroborada por Kazmierczak (2012), que afirma que o aquecimento das toras contribui significativamente para a melhoria do desempenho

operacional durante o processo de laminação, promovendo o aumento da vida útil da faca e a redução da rugosidade das lâminas, especialmente na região dos nós, em virtude do amolecimento dos mesmos. Ainda segundo esta mesma autora, o aquecimento também resulta na obtenção de lâminas mais uniformes e com melhor acabamento superficial, favorecendo a laminação de madeiras com densidade média a alta. Dundar *et al.* (2008) também expressam o efeito positivo do aquecimento de toras sobre a qualidade das lâminas, relatando a partir de sua pesquisa que o aquecimento de toras da madeira de faia (*Fagus orientalis*) proporcionou lâminas mais homogêneas e com menor rugosidade superficial.

Além disso, essas observações são confirmadas pelos registros técnicos da empresa, que constataram uma melhora na qualidade das lâminas obtidas a partir de toras aquecidas, em comparação aquelas processadas sem o aquecimento.

A qualidade das lâminas de madeira exerce influência direta sobre a eficiência da colagem e, conseqüentemente, sobre o desempenho físico e mecânico dos painéis compensados. Defeitos superficiais, variações de rugosidade, presença de fissuras, ondulações e diferenças de espessura são fatores que comprometem a adesão entre as camadas (Iwakiri *et al.*, 2000). Além disso, e conforme Hse e Kuo (1988), a migração de extrativos para a superfície da madeira, conforme evidenciado na FIGURA 8, pode interferir na adesão química entre adesivo e substrato. Assim, a qualidade das lâminas é fundamental para garantir uma colagem eficiente e homogênea, assegurando a integridade estrutural dos painéis compensados.

2.3.4. Propriedades físicas dos painéis

2.3.4.1 Densidade aparente e teor de umidade

Na TABELA 5 estão apresentados os resultados médios da densidade aparente e do teor de umidade dos painéis compensados produzidos com lâminas com e sem aquecimento de toras.

TABELA 5 - RESULTADOS MÉDIOS DA DENSIDADE E TEOR DE UMIDADE DOS PAINÉIS COMPENSADOS

Tratamento	Densidade aparente (g/cm ³)	Teor de umidade (%)
Sem aquecimento	0,915 a (3,61)	12,34 a (13,78)
Com aquecimento	0,842 b (3,34)	11,36 b (14,96)

LEGENDA: Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste t de Student a 5% de significância. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

Os resultados médios de densidade aparente indicaram influência estatisticamente significativa do aquecimento das toras de *Eucalyptus dunnii* sobre os painéis compensados. Observou-se que os painéis produzidos a partir de toras submetidas ao aquecimento apresentaram valores inferiores de densidade, sugerindo que o tratamento térmico promoveu alterações estruturais na madeira, possivelmente relacionadas à degradação térmica das hemiceluloses, liberação de substâncias hidrossolúveis e à perda de umidade nas interfaces das lâminas durante o processo.

Essa redução na massa específica é consistente com os resultados encontrados por Juízo *et al.* (2018), que relataram uma tendência de diminuição da densidade com o aumento da temperatura em tratamentos térmicos aplicados à madeira, evidenciando que o aquecimento pode provocar modificações significativas nas características físicas do material lenhoso. Observou-se que a densidade do material apresentou valores superiores àqueles reportados por Pereyra (1994) e Kazmierczak (2012), para painéis da espécie de *Eucalyptus dunnii*. Tal incremento pode estar associado à menor espessura das lâminas utilizadas, bem como à pressão aplicada durante o processo de prensagem dos painéis. De acordo com Pereyra (2012), a espécie, umidade, pressão e temperatura usadas para fabricar um painel compensado podem influenciar na densidade do compensado.

Com relação ao teor de umidade, os painéis produzidos com toras que passaram pelo processo de aquecimento também apresentaram valores estatisticamente inferiores em relação aos observados nas amostras não submetidas ao aquecimento. Esse comportamento é característico de madeiras em alguns tipos de tratamento térmico, estando geralmente associado à redução da higroscopicidade. Resultado semelhante foi reportado por Severo e Tomaselli (2001), que observaram

diferenças significativas no teor de umidade de equilíbrio entre corpos de prova de madeira vaporizados e não vaporizados, mesmo após o condicionamento.

Dessa forma, os dados evidenciam o impacto do aquecimento das toras tanto na densidade quanto na capacidade de absorção de umidade de equilíbrio dos painéis, refletindo diretamente em suas propriedades físicas e na estabilidade dimensional dos painéis.

2.3.4.2 Absorção de água, inchamento e recuperação da espessura

Na TABELA 6 estão apresentados os resultados médios obtidos para absorção de água, inchamento e recuperação de espessura.

TABELA 6- RESULTADOS MÉDIOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAMENTO E RECUPERAÇÃO EM ESPESSURA DOS PAINÉIS COMPENSADOS.

Tratamento	Absorção de água (%)	Recuperação¹ (%)	Inchamento² (%)	Inchamento + recuperação (%)
Sem aquecimento	48,59 a (4,81)	2,66 a (27,21)	15,33 a (12,33)	16,88 a (6,36)
Com aquecimento	44,44 b (7,05)	2,66 a (26,74)	10,82 b (8,15)	13,48 b (5,59)

LEGENDA: Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste t de Student a 5% de significância. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

Pode-se observar que os painéis produzidos com toras aquecidas apresentaram menor absorção de água (44,44%) em comparação aos sem aquecimento (48,59%), sendo a diferença estatisticamente significativa. Para recuperação de espessura o valor médio foi idêntico (2,66%) em ambos os tratamentos, não ocorrendo diferença significativa. Já em relação ao inchamento, os compensados produzidos com lâminas oriundas de toras aquecidas apresentaram inchamento estatisticamente inferior (10,82%) em comparação aos painéis produzidos com lâminas provenientes de toras sem aquecimento (15,33%). Da mesma forma, os painéis constituídos por lâminas onde a madeira passou pelo processo de aquecimento mostraram-se estatisticamente inferiores (13,48%) em relação aos painéis produzidos com material oriundo de toras sem aquecimento (16,88%) no inchamento mais recuperação de espessura.

Ao comparar os resultados entre o processo com e sem aquecimento, o tratamento das toras proporcionou melhoria na estabilidade dimensional dos compensados, reduzindo tanto a absorção de água, quanto o inchamento em espessura e inchamento e recuperação de espessura. Esses resultados indicam que o processo de aquecimento contribuiu para a diminuição da higroscopicidade das lâminas e consequentemente dos painéis compensados. Para Ji *et al.* (2022) a aplicação de temperatura reduz a rugosidade superficial, fator que podem favorecer a colagem e reduzir a penetração de água nos painéis. Dessa forma, a diminuição observada no inchamento e na absorção sugere que o aquecimento altera a estrutura da madeira de maneira a reduzir a higroscopicidade e melhorar a estabilidade dos compensados, confirmando a relevância desse tratamento como etapa prévia a obtenção das lâminas.

Os valores de absorção obtidos neste estudo foram superiores aos relatados por Bortoletto (2003) em sua investigação com onze espécies de *Eucalyptus*, e nesse caso, tal diferença em comparação a esse estudo pode estar relacionada à formulação da resina empregada na colagem. Quando comparados aos resultados apresentados por Pereyra (1994) em sua pesquisa com o *Eucalyptus dunnii*, entretanto, os valores de absorção mostraram-se similares. Em relação à recuperação em espessura, os resultados foram semelhantes aos observados por Pereyra (1994). No entanto, para o inchamento e para a diferença entre inchamento e recuperação em espessura, os valores obtidos neste estudo foram superiores aos relatados pelo referido autor.

De acordo com Arruda *et al.* (2011), a contração e o inchamento da madeira, causadas pela sua interação com a umidade, constituem alguns dos fatores mais críticos no desempenho estrutural do material. Considerando que o compensado neste estudo tem como principal finalidade o uso em painéis de fechamento e contraventamento aplicados em pisos e paredes de sistemas construtivos, suas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional assumem grande relevância para o uso em elementos estruturais. O menor efeito de absorção de água e inchamento em painéis reconstituídos contribui diretamente para a sua estabilidade dimensional, apresentando menor tendência à deformação e perda de resistência mecânica, fatores críticos para garantir a durabilidade e a vida útil da edificação, atendendo de forma mais eficiente aos requisitos técnicos, normativos e de confiabilidade exigidos pela indústria da construção civil.

2.3.5. Propriedades mecânicas dos painéis

2.3.5.1. Flexão estática

Os resultados médios do ensaio de flexão estática estão apresentados na TABELA 7.

TABELA 7- RESULTADOS MÉDIOS DOS MÓDULOS DE RUPTURA E DE ELASTICIDADE À FLEXÃO ESTÁTICA DOS PAINÉIS COMPENSADOS

Tratamento	Módulo de ruptura (MPa)		Módulo de elasticidade (MPa)	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Sem aquecimento	91,27 a (10,79)	45,82 b (14,40)	12852,80 a (12,09)	3848,20 b (11,99)
Com aquecimento	97,09 a (8,60)	50,06 a (8,33)	13335,90 a (10,34)	4324,03 a (9,22)

LEGENDA: Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste t de Student a 5% de significância. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

O resultado do módulo de ruptura no sentido longitudinal às fibras apresentou valores médios de 91,27 MPa para painéis produzidos a partir de lâminas provenientes de toras sem aquecimento, e 97,09 MPa para os painéis manufaturados a partir de lâminas cujas toras foram aquecidas. Embora o aquecimento tenha resultado em incremento do MOR, não foi constatada diferença estatisticamente significativa. O mesmo aconteceu para o módulo de elasticidade, onde os valores foram de 12.852,80 MPa sem aquecimento e 13.335,90 MPa com aquecimento, e apesar da ligeira elevação nos resultados dos painéis produzidos com toras que passaram pelo processo de aquecimento, também não foi constatada diferença estatística significativa.

Já para o módulo de ruptura no sentido transversal observou-se diferença estatística significativa, com aumento de 45,82 MPa para os painéis colados a partir de lâminas oriundas de toras sem aquecimento para 50,06 MPa em painéis cujas toras foram submetidas ao aquecimento. O mesmo comportamento foi observado no módulo de elasticidade nesse sentido, sendo constatada diferença estatística significativa.

Os resultados dos ensaios de flexão estática indicam que o aquecimento das lâminas de *Eucalyptus dunnii* não comprometeu as propriedades mecânicas dos painéis compensados, tendo promovido inclusive melhorias significativas em determinadas direções de carga, tais ganhos podem representar melhor estabilidade estrutural e desempenho mais equilibrado dos painéis em aplicações construtivas. Esse aumento na resistência à flexão estática pode estar associado à melhoria na qualidade das lâminas promovida pelo processo de aquecimento. Esse tratamento reduziu a incidência de trincas e rugosidade, favorecendo a preservação da continuidade das fibras e diminuindo falhas na madeira, como pode ser visto na FIGURA 07. Consequentemente, esses fatores podem ter contribuído para um desempenho mecânico superior, gerando uma maior uniformidade estrutural no painel compensado. Esse resultado é corroborado por Prata (2006), ao destacar que a seleção adequada das lâminas por classe de qualidade constitui um aspecto relevante na etapa de montagem dos compensados. Em sua pesquisa, o autor também demonstra que a qualidade da juntagem das lâminas é determinante para o desempenho estrutural, uma vez que defeitos nessa etapa podem originar falhas, como as chamadas “janelas”, resultando em redução significativa da resistência mecânica do painel.

Os valores médios de MOR obtidos para os painéis analisados nesta pesquisa foram superiores aos requisitos estabelecidos para chapas de compensado estrutural pela norma NBR 16936 (ABNT, 2023) – Edificações em *Light Wood Frame*. Para painéis com espessura entre 9 e 12 mm, a referida norma estabelece como exigência mínima uma resistência à flexão superior a 18 N/mm² no sentido longitudinal e superior a 10 N/mm² no sentido transversal. Os valores obtidos neste estudo também foram superiores aos relatados por Pereyra (1994), Iwakiri *et al.* (2007) e Kazmierczak (2012) em pesquisas com compensados de *Eucalyptus dunnii*. Essa diferença pode estar relacionada à espessura das chapas utilizadas, uma vez que, no presente trabalho, foram produzidos painéis com menor espessura e com lâminas mais finas, os quais tendem a apresentar maior resistência à flexão estática, devido à maior participação das camadas externas no suporte das tensões de flexão.

A resistência à flexão estática dos painéis exerce papel fundamental no desempenho estrutural de edificações em *Light Wood Frame*, uma vez que esses elementos contribuem para a rigidez, estabilidade e segurança do sistema construtivo. Os valores elevados de MOR melhoram o desempenho dos painéis aumentando a

eficiência de contraventamento frente aos esforços de empenamento, ampliando a confiabilidade, o desempenho global e a durabilidade desse sistema de construção.

2.3.5.2. Cisalhamento da linha de cola

Os ensaios de cisalhamento realizados em painéis compensados produzidos com toras de *Eucalyptus dunnii*, submetidas ou não ao processo de aquecimento, permitiram avaliar os efeitos dessa etapa no desempenho da colagem dos painéis. Os resultados médios desta propriedade estão apresentados na TABELA 8.

TABELA 8 - RESULTADOS MÉDIOS DA RESISTÊNCIA DA LINHA DE COLA AO CISALHAMENTO DOS PAINÉIS COMPENSADOS.

Tratamento	Água fria		Fervura 72 horas	
	Cisalhamento (MPa)	Falha (%)	Cisalhamento (MPa)	Falha (%)
Sem aquecimento	2,02 a (22,20)	50	1,60 a (19,45)	55
Com aquecimento	1,88 a (24,59)	33	1,34 b (20,92)	20

LEGENDA: Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste t de Student a 5% de significância. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

Observou-se que, sob a condição de imersão em água fria, o processo de aquecimento das toras não resultou em diferença estatisticamente significativa na resistência ao cisalhamento dos painéis. No entanto, quando submetidos à fervura por 72 horas, os painéis confeccionados com toras aquecidas apresentaram uma redução estatisticamente significativa dessa propriedade, passando de 1,60 MPa (sem aquecimento) para 1,34 MPa (com aquecimento).

Além disso, constatou-se diminuição no percentual de falha na madeira nos painéis produzidos com toras aquecidas, tanto sob imersão fria quanto sob fervura. Embora o aquecimento favoreça a remoção de extrativos e, teoricamente, a penetração do adesivo e menor impacto negativo sobre sua cura, os resultados não evidenciaram ganhos na resistência ao cisalhamento. Pelo contrário, considerando a alteração química sofrida durante o aquecimento a mesma pode ter sido acentuada durante o processo de secagem e a exposição prolongada ao calor pode induzir a

migração de extrativos para a superfície da madeira, o que, conforme Hse e Kuo (1988), reduz a molhabilidade e interfere na cura dos adesivos, resultando em ligações de menor resistência e durabilidade.

Embora os resultados de resistência ao cisalhamento tenham apresentado diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos, os valores obtidos atendem aos requisitos mínimos de qualidade da colagem estabelecidos para a Classe III de uso, conforme especificado para chapas de compensado estrutural. De acordo com os critérios normativos, valores de tensão de ruptura superiores a 1,0 MPa são considerados satisfatórios e, nessas condições, não se exige um percentual mínimo de falha da madeira, sendo dispensada essa exigência como critério adicional de avaliação da colagem.

Os resultados desta pesquisa divergem daqueles encontrados por Pereyra (1994) e Kazmierczak (2012), os quais, ao avaliarem painéis compensados de *Eucalyptus dunnii*, não obtiveram desempenho satisfatório na qualidade de colagem que atendesse aos requisitos de colagem à prova d'água, evidenciando a complexidade da interação entre o material lenhoso e o sistema adesivo em condições de elevada exigência de durabilidade.

2.4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- O processo de aquecimento das toras de *Eucalyptus dunnii* reduziu significativamente a densidade básica da madeira.
- As análises químicas indicaram que o aquecimento das toras promoveu tendência de diminuição do teor de extrativos solúveis.
- No que se refere a laminação, o aquecimento intensificou a ocorrência de rachaduras de topo e elevou significativamente a porcentagem de toras inutilizadas no processo. Apesar disso, observou-se melhoria no acabamento superficial das lâminas, evidenciada pela redução da rugosidade, menor ocorrência de trincas e rachaduras superficiais.

- O aquecimento das toras proporcionou melhora na estabilidade dimensional dos compensados, reduzindo tanto a absorção de água, quanto o inchamento, assim como o inchamento mais recuperação de espessura.

- Do ponto de vista mecânico, o aquecimento não comprometeu as propriedades dos painéis. Observou-se melhora da propriedade de flexão estática, enquanto a resistência ao cisalhamento da linha de cola apresentou redução sob condição de fervura, embora os valores se mantivessem acima dos limites mínimos exigidos para uso estrutural.

De modo geral, o aquecimento das toras de *Eucalyptus dunnii* contribuiu positivamente para a qualidade superficial das lâminas, para a estabilidade dimensional dos painéis e propriedades de flexão estática atendendo os requisitos para chapas de compensado estrutural referenciados na norma NBR 16936 (ABNT, 2023) – Edificações em *Light Wood Frame*. Com base nos resultados obtidos, a empresa optou por dar continuidade aos estudos utilizando toras de eucalipto com aquecimento, implementando melhorias em seu processo para reduzir o índice de rachaduras e aumentar o rendimento das toras durante a laminação.

CAPITULO 3

AVALIAÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS PUROS E COMBINADOS DE *PINUS SPP.* E *EUCALYPTUS DUNNII* PARA APLICAÇÃO EM *LIGHT WOOD FRAME*

RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais gera resíduos e desperdícios, em grande parte isso ocorre devido ao uso de métodos artesanais como a alvenaria tradicional. O sistema *wood frame* surge no Brasil como alternativa sustentável, amplamente utilizado em países desenvolvidos e capaz de reduzir tempo de obra, custos e impactos ambientais, embora ainda enfrente barreiras de adoção no país. Nos últimos anos, normas como a NBR 16936 (ABNT, 2023) e a NBR 17002 (ABNT, 2021) impulsionaram a padronização e expansão do sistema construtivo no país. Diante desse cenário, espera-se o aumento da demanda por compensado estrutural, visando espécies alternativas ao *Pinus*, logo, o *Eucalyptus dunnii* é uma espécie promissora para atender aos requisitos estabelecidos para edificações em *Light Wood Frame*. O estudo avaliou a produção industrial de painéis compensados para uso estrutural utilizando lâminas de *Pinus spp.* e *Eucalyptus dunnii* oriundos de plantios no Paraná. Foram produzidos painéis compensados estruturais com dimensões de 12 mm × 1,20 m × 2,40 m e em quatro diferentes disposições de lâminas e colados com resina fenol-formaldeído. Após a fabricação, corpos de prova foram extraídos para a realização dos ensaios de densidade, teor de umidade, absorção de água, inchamento, recuperação em espessura e flexão estática, conforme a NBR 17002 (ABNT, 2021), bem como do ensaio de cisalhamento na linha de cola, de acordo com a NBR 12466-1 e 2 (ABNT, 2012). Os resultados indicaram que todos os tratamentos atenderam aos limites normativos estabelecidos para os ensaios físicos e mecânicos. No que se refere à qualidade de colagem, os painéis produzidos com *Pinus spp.* e as composições combi atenderam aos requisitos das normas NBR 12466-1 (ABNT, 2012) e NBR 16936 (ABNT, 2023). Conclui-se que os painéis combi constituem a alternativa mais promissora, por aliarem resistência mecânica, estabilidade dimensional e viabilidade industrial, enquanto os painéis produzidos exclusivamente com *Eucalyptus dunnii* demandam estudos adicionais e ajustes no processo de colagem para alcançar melhor desempenho.

Palavra-chave: *compensado estrutural*; *wood frame*; *Eucalyptus dunnii*; Edificações em *Light Wood Frame*.

3.1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores de maior impacto ambiental, estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção (MMA, 2025). De acordo com Viana (2020), o desperdício de materiais representa um significativo consumo de recursos naturais, posicionando a indústria da construção no centro das discussões sobre a busca pelo desenvolvimento sustentável em suas diversas áreas.

No contexto brasileiro, o setor da construção civil ainda se caracteriza predominantemente por métodos construtivos artesanais, sobretudo na alvenaria tradicional de tijolos cerâmicos, sendo que esse sistema apresenta elevado consumo de matéria-prima, expressivos índices de perdas e desperdícios. São esses aspectos que evidenciam a ineficiência no uso racional dos materiais e a insuficiência do planejamento das etapas construtivas (Mass;Tavares, 2017).

O sistema *wood frame* configura-se como uma alternativa construtiva sustentável, e embora ainda esteja em fase inicial de adoção no Brasil, é amplamente consolidado na América do Norte e na Europa. Por se tratar de um método industrializado, proporciona significativa redução no tempo de execução das edificações quando comparado ao sistema convencional em alvenaria (Espíndola, 2017).

Segundo Resende *et al.* (2021), o sistema *wood frame* apresenta diversas vantagens em relação à alvenaria convencional, destacando-se a maior rapidez de execução, o uso de materiais renováveis e sustentáveis, o desempenho térmico superior e a redução do custo global da edificação. No entanto, de acordo com os autores, sua adoção no Brasil ainda enfrenta limitações, sobretudo devido à escassez de mão de obra especializada, ao limitado domínio técnico por parte de engenheiros e arquitetos e à forte cultura nacional voltada aos sistemas tradicionais de alvenaria.

O sistema construtivo *wood frame* caracteriza-se como um método industrializado para a execução de edificações, cuja estrutura é composta por perfis de madeira reflorestada e tratada, organizados em painéis de piso, parede e cobertura. Esses elementos podem ser combinados e revestidos com diferentes materiais, visando aprimorar os desempenhos térmico e acústico, bem como garantir proteção contra intempéries e contra o fogo, sendo que nos Estados Unidos, essa

tecnologia é amplamente consolidada e é empregada em aproximadamente 95% das residências construídas (Molina; Calil Junior, 2010).

Conforme a ABIMCI (2023), o sistema *wood frame* começou a ser introduzido no Brasil na década de 1980, mas somente nos últimos anos ganhou maior visibilidade diante da demanda por inovações e alternativas sustentáveis na construção civil. O setor madeireiro vive um momento importante com a publicação da norma brasileira para edificações em *Light Wood Frame* (ABNT NBR 16936), marco fundamental para a consolidação do uso desse sistema industrializado no país e sobretudo por utilizar madeira proveniente de florestas plantadas assegurando os requisitos de desempenho e vida útil das edificações.

Além disso, o segmento de painéis compensados também avançou com a atualização da NBR 17002 (ABNT, 2021), que padroniza requisitos e métodos de ensaio para este tipo de painel, incluindo sua aplicação estrutural. Essa padronização atende às demandas das novas tecnologias construtivas, especialmente o *wood frame*, que utiliza as chapas de compensado como componente da edificação (ABIMCI, 2022).

Diante do possível aumento da demanda por painéis compensados, as empresas florestais têm buscado, nas espécies do gênero *Eucalyptus*, alternativas viáveis para o fornecimento de matéria-prima. Entre essas espécies, o *Eucalyptus dunnii* destaca-se como uma opção promissora, sobretudo pelas vantagens silviculturais que apresenta. Trata-se de uma espécie de rápido crescimento, com boa adaptação a regiões sujeitas a geadas e invernos rigorosos, como as áreas situadas nos Estados da região Sul do Brasil.

Nesse contexto, este capítulo tem por objetivo analisar a utilização do *Eucalyptus dunnii* na composição de painéis compensados estruturais, avaliando sua capacidade de atender os requisitos estabelecidos pela NBR 16936 (ABNT, 2023) – *Edificações em Light Wood Frame*.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Após os ensaios da primeira etapa, o presente estudo analisou a produção de painéis compensados utilizando *Eucalyptus dunnii* submetido apenas ao processo de aquecimento. Para este estudo foram fabricados painéis compensados industriais

para uso em fechamento ou travamento de construção em *wood frame*, compostos por lâminas de *Pinus spp.* e *Eucalyptus dunnii* em diferentes disposições dentro do painel, provenientes de plantios florestais localizados no município de Inácio Martins, região sudeste do Paraná. As toras utilizadas foram laminadas em uma unidade de laminação situada na cidade de Teixeira Soares, Paraná.

Antes do processo de laminação, as toras foram submetidas ao aquecimento, conforme metodologia aprovada no capítulo anterior desse estudo e pela empresa, com o objetivo de amolecer as fibras da madeira, melhorar o acabamento superficial das lâminas e facilitar o processo de laminação.

3.2.1. Preparação das lâminas de *Pinus spp.* e *Eucalyptus dunnii*

Foram selecionadas toras de *Pinus spp.* com idade superior a 20 anos e *Eucalyptus dunnii* com idade acima de 15 anos, provenientes de plantios florestais localizados no município de Inácio Martins no Paraná. O processo de aquecimento, laminação e secagem foi realizado em diferentes dias para cada espécie.

As toras foram submetidas ao aquecimento em um tanque de vapor por um período de 12 horas, sob temperatura controlada entre 70°C a 80°C, para ambas as espécies, seguindo os procedimentos operacionais da fábrica.

FIGURA 9 - PÁTIO DE TORAS E TANQUE DE AQUECIMENTO



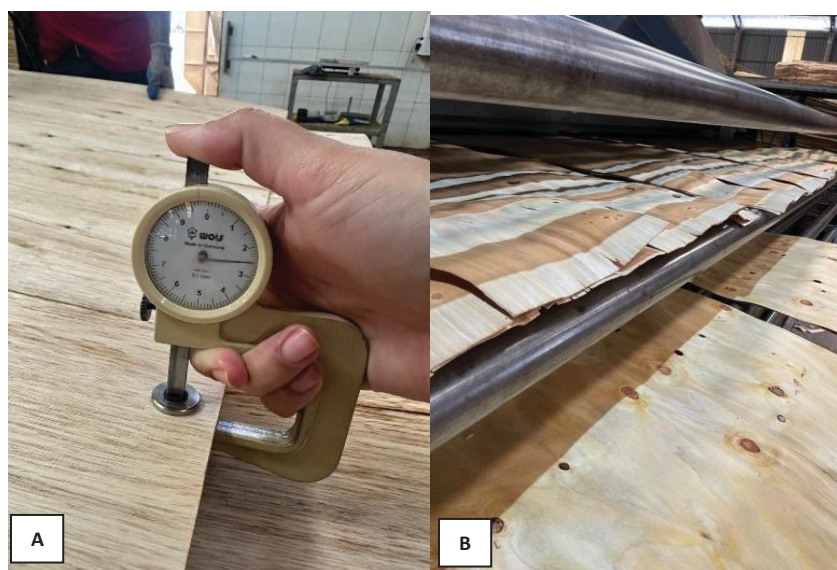
FONTE: A autora (2024).

Após o desligamento do tanque de vapor e da chegada da temperatura das toras para aproximadamente 50°C, o material foi encaminhado ao torno para laminação. As toras de *Eucalyptus dunnii* foram inicialmente aquecidas com um

comprimento de 5,5 m e, posteriormente, cortadas em seções de 2,65 m para o processo de laminação. As lâminas utilizadas neste estudo foram produzidas com espessura de 2,6 mm, largura de 1,28 m e comprimento de 2,52 m.

O processo de secagem das lâminas seguiu os parâmetros específicos da fábrica para cada espécie, com o objetivo de reduzir a umidade para 5% a 8%, garantindo a qualidade adequada do material.

FIGURA 10 - MEDIÇÃO DA ESPESSURA E SECAGEM DE LÂMINAS



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: A: medição de espessura das lâminas; B: secagem das lâminas.

3.2.2. Processo de produção dos painéis

As lâminas preparadas na laminadora em Teixeira Soares - PR foram transportadas para a unidade fabril em Curitiba, onde ocorreu o processo de fabricação dos painéis compensados.

Para a produção foi escolhida a dimensão mais comercializada pela fábrica para painéis estruturais, sendo de 2,40 m de comprimento, 1,20 m de largura e espessura de 12 mm, e constituídos por cinco camadas.

A normativa NBR 17002 (ABNT, 2021) determina que para painéis de uso estrutural devem ser amostradas no mínimo 32 chapas para ensaios de caracterização, porém, como o presente estudo visa analisar e comparar diferentes composições com caráter exploratório, para os 4 tratamentos propostos no

delineamento experimental (TABELA 9) foram confeccionados 12 painéis, sendo 03 painéis ou repetições por tratamento.

TABELA 9 - DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DOS PAINÉIS COMPENSADOS PUROS E EM COMBINAÇÃO DE *Pinus spp.* e *Eucalyptus dunnii*.

Tratamento	Espécie	Composição das lâminas
1	100% <i>Pinus spp.</i>	PPPPP
2	Combinação <i>Pinus spp.</i> e <i>Eucalyptus dunnii</i>	PEPEP
3	100% <i>Eucalyptus dunnii</i>	EEEEEE
4	Combinação <i>Eucalyptus dunnii</i> e <i>Pinus spp.</i>	EPEPE

FONTE: A autora (2025).

3.2.3. Preparação da batida de cola

O adesivo utilizado na produção dos painéis foi a resina fenol-formaldeído, com teor de sólidos de 54,7% e viscosidade Brookfield de 622 cP, conforme laudo técnico do fornecedor da resina. Conforme procedimento da fábrica, estas análises também foram realizadas *in loco*.

O preparo da batida de cola foi realizado em bateadeira industrial e para todos os tratamentos, e consistiu em formulação similar à utilizada na primeira etapa desta pesquisa, ou seja, 58% de resina fenólica, 22% de extensor à base de trigo e 19% água, gerando um teor de sólidos de 32%. Adicionalmente nesta etapa foi utilizado produto preservante com função cupinicida (1%).

FIGURA 11- PREPARAÇÃO DA BATIDA DE COLA



FONTE: A autora (2024).

Essa proporção foi preparada visando atingir a característica desejada de viscosidade e manter o teor de sólidos já praticado na indústria, de forma a assegurar a colagem entre as lâminas e o desempenho final do painel compensado.

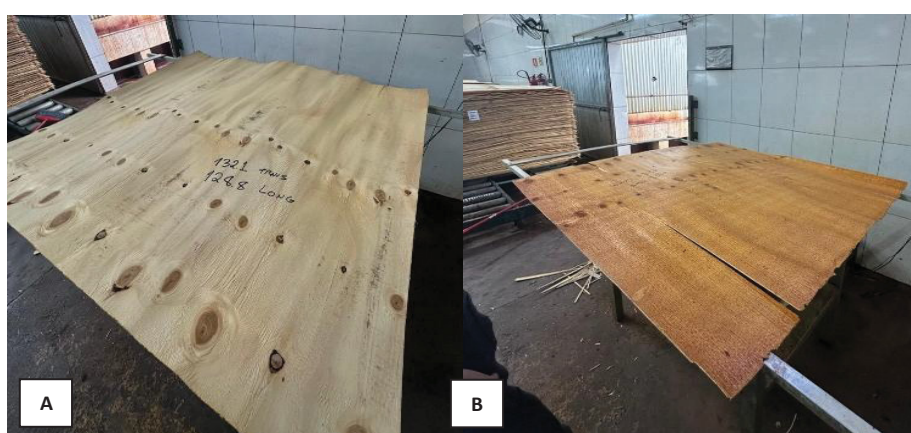
O preservativo foi incorporado ao adesivo conforme a categoria de uso 02 e 03 para painéis de fechamento ou travamento de *wood frame*, como requerido na NBR 16143 (ABNT, 2024) – Preservação de Madeiras. O preservativo utilizado foi a base de Ciflutrina e seguiu os parâmetros indicados pelo fornecedor.

Após a homogeneização dos componentes foi determinada a viscosidade da batida de cola em copo Ford 8, a qual resultou em um tempo de escoamento de 246 segundos.

3.2.4. Montagem dos painéis

Primeiramente as lâminas foram classificadas e seccionadas de acordo com seu uso ou posição, ou seja, miolo ou capas. Em seguida o adesivo foi aplicado por meio de uma passadeira de rolos, em linha de cola dupla. A gramatura foi controlada com auxílio de uma balança digital, obtendo-se uma média de 384 g/m² para todas as composições (equivalente a uma linha de cola simples de 192 g/m²).

FIGURA 12 - PROCESSO DE APLICAÇÃO DO ADESIVO



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: A: teste de gramatura da lâmina, lâmina sem adesivo; B: lâmina após aplicação do adesivo.

Após a aplicação do adesivo, os painéis compensados de 5 lâminas foram montados e seguiram para a etapa de assemblagem, conforme a FIGURA 13.

FIGURA 13 - MONTAGEM DOS PAINÉIS COMPENSADOS

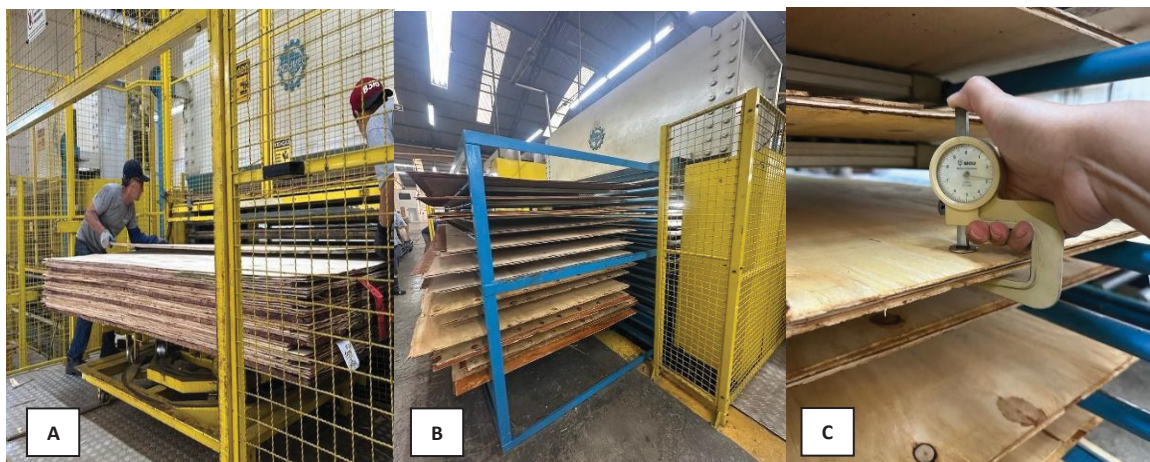


FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: A: lâmina entrando na passadeira de cola; B: lâmina após a aplicação da cola; C: montagem do compensado.

O tempo de assemblagem foi de 40 minutos e contemplou a etapa de pré-prensagem com duração de 7 minutos sob uma pressão de 3 kgf/cm². Em seguida, os painéis foram submetidos ao processo de prensagem a temperatura de 130°C, com uma pressão de 12 kgf/cm² e por um tempo total de prensagem de 12 minutos. O carregamento e o fechamento da prensa foram realizados dentro de um tempo máximo de 2 minutos.

FIGURA 14 - PRENSAGEM DOS PAINÉIS COMPENSADOS



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: A: carregamento de prensa; B: painéis prensados; C: conferência de espessura na saída da prensa.

Após a prensagem os painéis foram conduzidos ao estoque onde foram resfriados e condicionados, seguindo, então, para o esquadrejamento e lixamento para seccionamento e calibração de espessura, obtendo-se as dimensões comerciais de 12 x 1200 x 2400 mm.

FIGURA 15 - PAINÉIS APÓS PROCESSO DE ESQUADREJAMENTO E LIXAMENTO



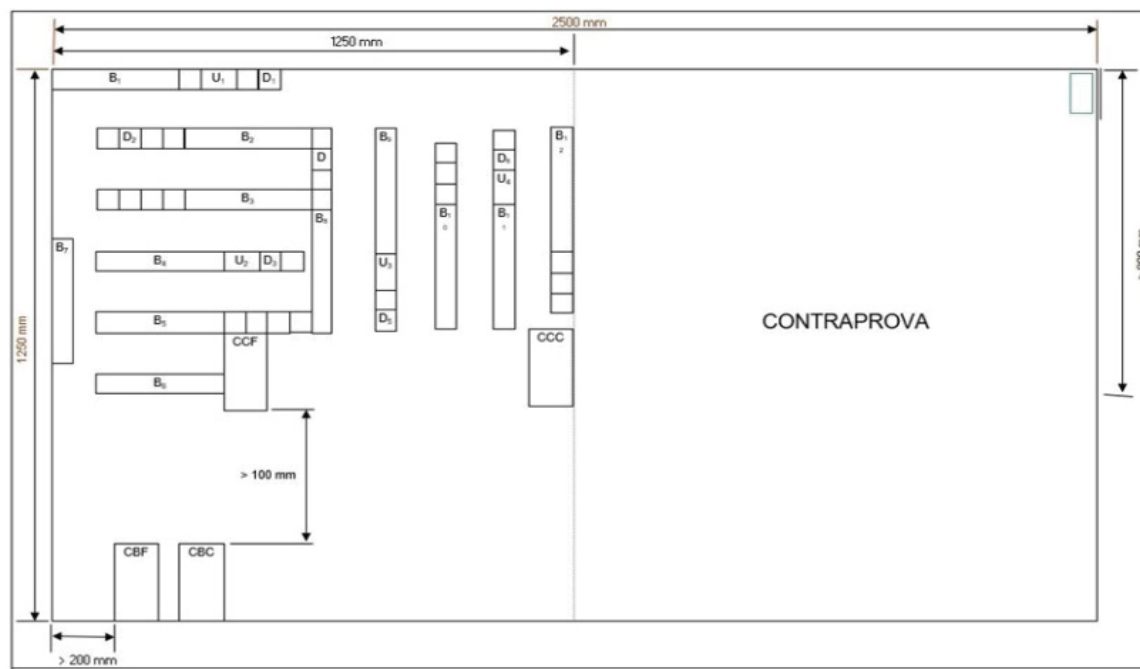
FONTE: A autora (2024).

3.2.5. Avaliação dos painéis compensados

Após a produção industrial, os painéis foram encaminhados ao Laboratório de Painéis de Madeira da UFPR, onde foram realizados os ensaios físicos e mecânicos, a fim de verificar sua conformidade com os requisitos para compensado estabelecidos pela norma NBR 16936 (ABNT, 2023) – *Edificações em Light Wood Frame*.

A confecção dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Usinagem da Madeira, seguindo as dimensões e posições especificadas pela norma NBR 17002 (ABNT, 2021) - Compensado - Requisitos e métodos de ensaio.

FIGURA 16 - ESQUEMA DE CORTE PARA OS ENSAIOS DE PAINÉIS COMPENSADOS



FONTE: NBR 17002 (ABNT, 2021).

LEGENDA: B1 a B6: Flexão longitudinal; B7 a B12: Flexão transversal; U1 a U4: Teor de umidade; D1 a D6: Densidade; CBF: Colagem em corpo de prova da borda do painel em água fria; CCF: Colagem em corpo de prova do centro do painel em água fria; CBC: Colagem em corpo de prova da borda do painel em ciclos de fervura; CCC: Colagem em corpo de prova do centro do painel em ciclos de fervura; CBE: Colagem em corpo de prova da borda do painel em ebulição; CCE: Colagem em corpo de prova do centro do painel em ebulição;

Foram extraídas amostras para a realização dos ensaios de densidade, teor de umidade, absorção de água, inchamento e recuperação da espessura e flexão estática conforme a norma NBR 17002 (ABNT, 2021), além de cisalhamento na linha de cola, que seguiu as recomendações da norma NBR 12466 1 e 2 (ABNT, 2012). As dimensões e quantidade dos corpos de prova por ensaio, painel e amostragem total estão apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 – ENSAIOS, DIMENSÕES E AMOSTRAGEM DOS CORPOS DE PROVA.

Ensaio	Dimensão (cm)	Nº de amostras por painel	nº amostra total
Flexão longitudinal	5 x 29	6	72
Flexão transversal	5 x 29	6	72
Densidade	5 x 5	6	72
Umidade	5 x 24	4	48
Inchamento	6 x 1	8	96
Absorção	7,5 x 2,5	5	60
Cisalhamento	8,5 x 2,5	30	360

FONTE: A autora (2024).

FIGURA 17 - CORPOS DE PROVA CORTADOS PARA OS ENSAIOS



FONTE: A autora (2025).

3.2.5. Análise estatística e dos resultados

Após a conclusão dos ensaios, procedeu-se à análise estatística dos dados com o objetivo de identificar diferenças significativas entre os tratamentos. Empregou-se a análise de outliers, homogeneidade de variância e análise de variância (ANOVA), seguida pelo teste de comparações múltiplas de Tukey quando rejeitada a hipótese de igualdade. Todas as análises foram realizadas no programa Statgraphics adotando-se nível de confiabilidade de 95%.

Os resultados obtidos foram confrontados com os requisitos mínimos estabelecidos para painéis compensados estruturais pela NBR 16936 (ABNT, 2023), a qual remete a metodologia da NBR 17002 (ABNT, 2021) para desempenho físico e

mecânico. Adicionalmente, o ensaio de cisalhamento na linha de cola que avaliou a qualidade da colagem dos painéis foi comparado com o requisito da NBR ISO 12466-2 (ABNT, 2012) – *Madeira Compensada – Qualidade de Colagem – Parte 2: Requisitos*. No caso de compensados destinados a aplicações estruturais, como chapas de fechamento e travamento em sistemas *Light Wood Frame*, a NBR 16936 (ABNT, 2023) estabelece que a colagem deve atender aos requisitos da Classe 3. Para painéis destinados a aplicações estruturais, a normativa NBR 17002 (ABNT, 2021) estabelece que os ensaios de resistência à flexão estática devem atender aos critérios de desempenho previstos em seu Anexo F, bem como aos requisitos estabelecidos pelas normas EN 789 e EN 1058. Contudo, no presente trabalho, a análise será realizada exclusivamente com base nos critérios definidos no Anexo F da referida norma brasileira.

A TABELA 11 mostra os requisitos para painel compensado estrutural conforme a norma NBR 16936 (ABNT, 2023).

TABELA 11 - REQUISITOS DA NBR 16936 (ABNT, 2023) PARA PAINEL COMPENSADO ESTRUTURAL.

Especificação	Valor característico do compensado		Critério/ Método de ensaio
	9 mm a 12 mm	18 mm a 25 mm	
Índices de umidade	< 18%		PS1 ABNT NBR 17002
Resistência à flexão no sentido longitudinal	>18 N/mm ²	> 15 N/mm ²	ABNT NBR 17002
Resistência à flexão no sentido transversal	> 10 N/mm ²	> 10 N/mm ²	ABNT NBR 17002
Inchamento da chapa (espessura)	< 10%		ABNT NBR 17002
Qualidade de colagem	Classe 3 – 01 pré-tratamento básico e um 01 pré-tratamento adicional		ABNT NBR ISO 12466-1

FONTE: NBR 16936 (ABNT, 2023) – Edificações em *Light Wood Frame*.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises e resultados dos compensados produzidos com as lâminas de *Eucalyptus dunnii* de toras aquecidas e do *Pinus spp.*, puros e combinados, assim

como a comparação com os requisitos da normativa brasileira de *Light Wood Frame* (NBR 16936:2023) são apresentados a seguir.

3.3.1. Massa específica e teor de umidade e dos painéis

A TABELA 12 apresenta os resultados médios de massa específica e teor de umidade dos painéis.

TABELA 12 - RESULTADOS MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE UMIDADE DOS PAINÉIS COMPENSADOS DE *Eucalyptus dun nii* E *Pinus spp.* PUROS E COMBINADOS

Tratamento	Massa específica aparente (g/cm ³)	Teor de umidade (%)
1 - PPPPP	0,518 d (6,98)	11,77 a (3,63)
2 - PEPEP	0,557 c (6,79)	9,91 c (5,37)
3 - EPEPE	0,648 b (4,70)	11,15 b (2,55)
4 - EEEEE	0,772 a (2,50)	8,44 d (7,44)

NOTA: P: *Pinus spp.*; E: *Eucalyptus dun nii*. Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação em percentual.

A análise dos resultados de massa específica apresentou diferenças significativas entre todos os tratamentos. O painel composto exclusivamente por *Eucalyptus dun nii* apresentou a maior média de massa específica, enquanto o painel produzido exclusivamente com *Pinus* registrou a menor massa específica. Nas composições híbridas, observou-se que o painel contendo maior proporção de lâminas de *Eucalyptus* também apresentou massa específica superior.

Esse aumento na massa específica está diretamente relacionado a influência da massa específica da espécie de *Eucalyptus*. De acordo com Pereyra (1994), entre outros fatores, a espécie influencia diretamente a densidade do compensado. Em complemento, Bodig e Jayne (1982) *apud* Iwakiri *et al.* (2009) relatam que a densidade da madeira também possui uma relação direta com a resistência mecânica de painéis compensados. Painéis estruturais com alta resistência só podem ser construídos com madeiras de maior densidade e, portanto, de maior resistência mecânica. Sendo assim, o aumento da massa específica proporcionado pelo uso da madeira de

Eucalyptus é favorável para aplicações em construções *wood frame*, uma vez que contribui para o incremento da resistência mecânica dos painéis.

Em relação ao teor de umidade também foram observadas diferenças significativas entre todos os tratamentos. O painel composto exclusivamente por *Pinus spp.* apresentou o maior teor de umidade, enquanto o painel produzido apenas com *Eucalyptus dunnii* registrou o menor valor. Entre os painéis híbridos, verificou-se que aqueles com lâminas de *Pinus spp.* posicionadas na linha de cola também apresentaram maior teor de umidade em comparação aos que continham *Eucalyptus* na mesma posição. Essa maior umidade observada tanto nos painéis exclusivamente de *Pinus* quanto nos híbridos com *Pinus* na linha de cola pode ser explicada pelas diferenças intrínsecas entre as duas espécies, especialmente no que se refere à porosidade, química e comportamento higroscópico. O *Pinus* apresenta características que favorecem a absorção de água, resultando em valores de umidade superiores aos observados para o *Eucalyptus dunnii*. De acordo com Jankowsky e Galvão (1979), embora a temperatura e a umidade relativa sejam os principais fatores que determinam a umidade de equilíbrio da madeira, a composição química também exerce influência significativa no fenômeno de adsorção de água. Os autores destacam que o aumento do teor de extrativos tende a reduzir a umidade de equilíbrio. Esse comportamento explica, em parte, os menores valores de umidade observados para o *Eucalyptus*, espécie que geralmente apresenta maiores teores de extrativos em comparação ao *Pinus*.

Ao comparar os resultados obtidos para o teor de umidade dos painéis, observa-se que as médias das composições testadas estão em conformidade com o limite máximo estabelecido pela NBR 17002 (ABNT, 2021), que é de 18%, sendo o teor de umidade uma variável crucial, pois influencia diretamente nas propriedades físicas e mecânicas do material, especialmente na sua estabilidade dimensional.

3.3.2. Absorção de água e inchamento e recuperação da espessura

Os valores médios para as propriedades de absorção d'água e inchamento e recuperação em espessura são apresentados na TABELA 13.

TABELA 13- RESULTADOS MÉDIOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAMENTO E RECUPERAÇÃO EM ESPESSURA DOS PAINÉIS COMPENSADOS DE *Eucalyptus dunnii* E *Pinus spp.* PUROS E COMBINADOS

Tratamento	Absorção de água (%)	Recuperação ¹ (%)	Inchamento ² (%)	Inchamento + recuperação (%)
1 - PPPPP	71,18 a (5,44)	2,44 a (11,71)	6,10 b (2,70)	8,54 c (3,45)
2 - PEPEP	73,35 a (6,06)	3,25 a (18,40)	6,49 b (9,61)	9,74 b (1,40)
3 - EPEPE	61,84 b (5,49)	2,61 a (27,81)	6,80 b (10,70)	9,41 b (1,62)
4 - EEEEE	54,05 c (7,96)	3,27 a (8,22)	8,77 a (11,81)	12,04 a (2,87)

P: *Pinus spp.*; E: *Eucalyptus dunnii*. ¹ Recuperação da espessura; ² Inchamento em espessura. Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação em percentual.

A análise da propriedade de absorção de água revelou diferença estatística significativa entre os tratamentos, sendo que as composições que utilizaram *Pinus spp.* nas faces apresentaram valores superiores e estatisticamente iguais entre si, por outro lado, o painel composto integralmente por *Eucalyptus dunnii* registrou o menor valor, sendo este estatisticamente inferior aos demais. Essa diferença é explicada em virtude da maior densidade do *Eucalyptus*, e consequentemente menor porosidade, o que dificultou a absorção de água.

Em relação ao inchamento, apenas os painéis formados exclusivamente por *E. dunnii* apresentaram diferenças estatísticas em relação aos demais. Este resultado pode estar associado ao fato da maior densidade desta espécie em comparação com o *Pinus* (TABELA 5), e principalmente pelas elevadas tensões de crescimento e anisotropia de contração. Quanto ao inchamento acrescido da recuperação em espessura, observou-se que o tratamento composto exclusivamente por *Eucalyptus dunnii* apresentou a maior taxa de variação dimensional, resultado explicado pela maior densidade e anisotropia desta espécie. Em contrapartida, os painéis produzidos com 100% de lâminas de *Pinus spp.* mostraram-se estatisticamente mais estáveis em relação a todos os tratamentos.

Em sua pesquisa, Kazmierczak *et al.* (2017) verificaram que há uma influência das características das lâminas de *E. dunnii* que interferem no IR, esse fato está relacionado às características anatômicas da madeira dessa espécie e à qualidade

inferior das lâminas (presença de nós). De acordo com Pereyra (1994), durante a prensagem dos compensados ocorre um aumento da densidade e a geração de tensões internas, as quais influenciam a estabilidade dimensional do painel na direção da compressão. Quando o produto absorve água e sofre inchamento, parte dessas tensões internas é liberada, o que explica por que, após a secagem, o compensado não recupera integralmente sua espessura original. Assim, o inchamento em espessura dos painéis compensados é composto por dois fatores: o inchamento decorrente da absorção de água e aquele associado à liberação das tensões geradas durante a prensagem.

O resultado obtido neste estudo contrasta com os resultados de Kazmierczak (2012), que observou menor valor de inchamento em espessura para painéis compostos integralmente por *E. dunnii*. No entanto, de forma similar aos dados relatados por Kazmierczak (2012), as médias obtidas para os demais tratamentos indicam variações pouco expressivas na estabilidade dimensional dos painéis.

Ao se comparar os valores médios de inchamento com os limites estabelecidos pela norma NBR 17002 (ABNT, 2021), observa-se que todos os tratamentos atenderam ao requisito técnico, que estabelece um valor máximo de 10% para o inchamento em espessura. Painéis que apresentam maior absorção de água, tendem a sofrer variações dimensionais mais significantes, o que pode comprometer seu desempenho em aplicações estruturais, especialmente em sistemas *Light Wood Frame*, nos quais a estabilidade dimensional é fundamental para evitar deformações.

De maneira geral, ainda que as diferenças entre os tratamentos tenham sido específicas para algumas propriedades, observa-se que a escolha da espécie e sua posição na montagem do painel influenciam aspectos importantes do desempenho físico, especialmente em condições de variação de umidade. Isso reforça a necessidade de seleção adequada da espécie e da configuração das lâminas quando se visa à produção de compensados para uso estrutural em sistemas *Light Wood Frame*, nos quais a estabilidade é essencial para garantir durabilidade e segurança.

3.3.3. Propriedades mecânicas dos painéis

3.3.3.1. Flexão estática

Na TABELA 14 estão apresentados os valores médios de módulo de ruptura e módulo de elasticidade obtidos no ensaio de flexão estática a partir das diferentes composições propostas neste capítulo.

TABELA 14 - RESULTADOS MÉDIOS DOS MÓDULOS DE RUPTURA E DE ELASTICIDADE À FLEXÃO ESTÁTICA DOS PAINÉIS COMPENSADOS DE *Eucalyptus dunnii* E *Pinus spp.* PUROS E COMBINADOS.

Tratamento	Módulo de ruptura (N/mm ²)		Módulo de elasticidade (N/mm ²)	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1 - PPPPP	26,06 b (30,46)	20,66 b (16,47)	3135,32 c (22,31)	1661,44 b (21,47)
2 - PEPEP	26,74 b (31,05)	35,17 a (8,94)	3115,17 c (36,13)	3217,96 a (11,54)
3 - EPEPE	57,20 a (19,91)	22,76 b (19,06)	7909,78 b (13,55)	1507,10 b (19,98)
4 - EEEEE	55,92 a (17,63)	34,20 a (15,50)	9392,57 a (12,22)	3415,45 a (11,96)

P: *Pinus spp.*; E: *Eucalyptus dunnii*. Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação em percentual.

A análise estatística dos resultados de flexão estática revelou diferenças significativas entre os tratamentos para os módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE), tanto na direção longitudinal quanto transversal às fibras.

Os resultados do sentido longitudinal revelaram que o tratamento composto por *Eucalyptus dunnii* nas camadas secas e *Pinus spp.* na linha de cola (miolo cola) apresentou o melhor desempenho mecânico, registrando valores máximos de MOR de 57,2 N/mm² e MOE de 7.909,78 N/mm², no entanto, estatisticamente igual ao tratamento composto com 100% *Eucalyptus dunnii*. No sentido transversal, o tratamento no qual *Pinus spp.* foi utilizado nas camadas secas e *Eucalyptus dunnii* na linha de cola apresentou valores de MOR de 35,17 N/mm² e MOE de 3.217,96 N/mm², resultados estatisticamente semelhantes aos do painel composto integralmente por *Eucalyptus dunnii*, que apresentou MOR de 34,20 N/mm² e MOE de 3.415,45 N/mm². Esse comportamento assemelha-se aos resultados apresentados por Iwakiri *et al.* (2000), que observaram que, chapas mistas produzidas com lâminas de *Pinus* na superfície apresentaram melhores valores de MOE e MOR transversal às fibras do que chapas com lâminas de *Eucalyptus* na mesma posição. Segundo os autores, essa

diferença está relacionada à maior resistência conferida pelas lâminas de eucalipto dispostas no sentido longitudinal na segunda camada superior e inferior, o que contribui significativamente para o desempenho mecânico global do painel. Ressalta-se, entretanto, que nos dois sentidos o painel constituído exclusivamente por *Eucalyptus dunnii* também apresentou desempenho elevado, com resultados próximos aos verificados nos tratamentos híbridos. O desempenho superior observado nas combinações entre as espécies pode ser atribuído à maior densidade do *Eucalyptus dunnii*, característica que contribui diretamente para o aumento da resistência à flexão estática dos painéis compensados. Almeida (2011) afirma que a interpretação dos resultados de flexão não deve ser feita de forma isolada, devendo considerar a quantidade e a espessura das lâminas, bem como a espécie e a idade das árvores que originaram as lâminas.

Os resultados encontrados para os painéis integralmente de *Eucalyptus dunnii* são inferiores aos encontrados por Pereyra (1994) e Zaeger e Ziger (2007).

Embora a ABNT NBR 16936 (ABNT, 2023) não estabeleça requisitos para o módulo de elasticidade (MOE), todas as composições avaliadas atenderam aos valores mínimos de resistência à flexão (MOR) exigidos pela norma. Para painéis com espessura entre 9 e 12 mm, o requisito é superior a 18 N/mm² no sentido longitudinal e superior a 10 N/mm² no sentido transversal; para espessuras entre 18 e 25 mm, o requisito longitudinal é superior a 15 N/mm² e superior a 10 N/mm² no sentido transversal. Assim, todas as composições foram consideradas adequadas para uso estrutural em painéis compensados.

A combinação entre as duas espécies explorou de forma conjunta suas propriedades individuais, resultando em um incremento de 119,5% na resistência à flexão longitudinal em comparação ao painel composto exclusivamente por lâminas de *Pinus spp.* Esses resultados evidenciam o potencial do uso combinado de *Eucalyptus* e *Pinus* na composição de painéis estruturais, especialmente quando se busca otimizar tanto a resistência quanto a rigidez dos produtos em diferentes direções de carregamento.

3.3.3.2. Cisalhamento da linha de cola

A TABELA 15 apresenta os valores médios obtidos no ensaio de cisalhamento da linha de cola a partir de diferentes pré-tratamentos dos corpos de prova.

TABELA 15- RESULTADOS MÉDIOS DA RESISTÊNCIA DA LINHA DE COLA AO CISALHAMENTO DOS PAINÉIS COMPENSADOS DE *Eucalyptus dunnii* E *Pinus spp.* PUROS E COMBINADOS.

Tratamento	Água fria		Fervura 72 horas	
	Cisalhamento (MPa)	Falha (%)	Cisalhamento (MPa)	Falha (%)
1 - PPPPP	0,89 a (21,82)	44	0,78 a (19,65)	47
2 - PEPEP	0,91 a (28,21)	40	0,79 a (26,09)	50
3 - EPEPE	1,02 a (31,84)	39	0,71 a (35,14)	52
4 - EEEEE	0,87 a (31,99)	20	0,50 b (80,26)	34

P: *Pinus spp.*; E: *Eucalyptus dunnii*. Médias seguidas de mesma letra, na mesma coluna, são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação em percentual.

Os resultados de resistência ao cisalhamento demonstraram que, sob condição de imersão em água fria, não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos. Entretanto, após fervura por 72 horas, o tratamento produzido exclusivamente com lâminas de *Eucalyptus dunnii* apresentou desempenho significativamente inferior em relação aos demais, evidenciando menor resistência da linha de cola sob condição severa de umidade e temperatura.

Os dados indicam o potencial da combinação entre as duas espécies, aproveitando as características específicas de cada uma para otimizar a qualidade da colagem em diferentes condições de exposição. Os painéis compostos integralmente por *Pinus* e aqueles fabricados com composições híbridas atenderam aos requisitos normativos para uso estrutural, conforme estabelecido nas normas ABNT NBR 12466-1 (ABNT, 2012) e NBR 16936 (ABNT, 2023), tanto nos ensaios de resistência ao cisalhamento em água fria quanto após 72 horas de fervura.

Os painéis produzidos exclusivamente com lâminas de *Eucalyptus dunnii* não atenderam aos critérios de resistência à colagem estabelecidos para a Classe 2 e 3,

que exige desempenho na tensão média de cisalhamento superior a 1 MPa, sem requisito para ruptura coesiva aparente da madeira; ou 0,6 a 1,0 MPa de tensão média de cisalhamento, com ruptura coesiva aparente superior a 40%; ou 0,4 a 0,6 MPa de tensão média de cisalhamento, com ruptura coesiva aparente superior a 60%; ou 0,2 a 0,4 MPa de tensão média de cisalhamento, com ruptura coesiva aparente superior a 80%, avaliados em dois tratamentos (um básico e um adicional). Essa limitação pode ser atribuída à maior densidade da madeira de *E. dunnii*, a qual pode dificultar a penetração do adesivo nas camadas, comprometendo a formação da linha de cola — conforme observado por Iwakiri *et al.* (2007). Também foi verificado por Rocha *et al.* (2024), que o *Eucalyptus* possui maior densidade e em muitos casos pode apresentar dificuldades na absorção do adesivo e na compactação dos painéis, ocasionando redução de resistência na linha de cola. Esse comportamento pode explicar as maiores resistências na maioria dos painéis com composição mistas de *Eucalyptus* com outra espécie.

Os resultados obtidos neste trabalho corroboram com os resultados de Pereyra (1994), Kazmierczak (2012) e Zaeger e Ziger (2007), que também relataram desempenho insatisfatório de painéis fabricados integralmente com *E. dunnii* quanto à resistência da linha de colagem.

3.4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- Os painéis compostos exclusivamente por *Eucalyptus dunnii* apresentaram menor teor de umidade e maior massa específica.
- Todos os tratamentos atenderam ao limite máximo de inchamento em espessura da chapa de até 10% estabelecido pela NBR 16936 (ABNT, 2023).
- Todos os tratamentos atenderam aos requisitos mínimos da NBR 16936 (ABNT, 2023) para resistência a flexão estática.
- Na avaliação da qualidade de colagem, os painéis produzidos exclusivamente com lâminas de *Eucalyptus dunnii* não atenderam aos critérios de resistência

estabelecidos para as Classes 2 e 3, enquanto os demais tratamentos alcançaram os requisitos normativos.

- Painéis de *Pinus spp.* e composições combinadas de *Pinus spp.* e *Eucalyptus dunnii* atenderam plenamente aos requisitos normativos da NBR 16936 (ABNT, 2023).

Os resultados confirmam o potencial técnico de painéis híbridos de *Pinus spp.* e *Eucalyptus dunnii* para aplicação em sistemas construtivos do tipo *Light Wood Frame*. O uso combinado das espécies se mostra uma solução promissora, conciliando leveza, estabilidade e resistência, além de ampliar a aplicabilidade industrial do *Eucalyptus dunnii*. Embora os painéis integralmente de *Eucalyptus dunnii* apresentem excelente desempenho mecânico, suas limitações em resistência da linha de cola indicam a necessidade de ajustes no processo de colagem.

CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

Com base na análise dos resultados deste trabalho, pode-se concluir para o capítulo 02:

De modo geral, os resultados demonstram que o aquecimento das toras de *Eucalyptus dunnii* influenciou suas propriedades físicas e químicas. O tratamento térmico promoveu redução significativa da densidade básica e tendência de redução dos teores de extrativos solúveis, além de melhorar o acabamento superficial das lâminas. Apesar do aumento na ocorrência de rachaduras de topo e da perda de rendimento na laminação, o aquecimento contribuiu para maior estabilidade dimensional dos painéis compensados, reduzindo a absorção de água e o inchamento. Do ponto de vista mecânico, o processo não comprometeu o desempenho estrutural, tendo inclusive favorecido a resistência à flexão estática, enquanto a resistência da linha de cola permaneceu acima dos limites normativos. Assim, conclui-se que o aquecimento de toras de *Eucalyptus dunnii* constitui uma alternativa tecnicamente viável para a produção de compensados estruturais conforme a NBR 16936 (ABNT, 2023), justificando a continuidade dos estudos e o aprimoramento do processo industrial visando maior rendimento e controle de defeitos.

Com base na análise dos resultados deste trabalho, pode-se concluir para o capítulo 03:

Os painéis compensados produzidos com *Eucalyptus dunnii* e *Pinus spp.* apresentaram desempenho compatível com as exigências normativas para aplicação em sistemas construtivos do tipo *Light Wood Frame*. Observou-se que os painéis compostos exclusivamente por *Eucalyptus dunnii* apresentaram maior massa específica e menor teor de umidade, refletindo características intrínsecas da espécie. Todos os tratamentos atenderam aos limites requeridos de inchamento em espessura e aos requisitos mínimos de resistência à flexão estática estabelecidos pela NBR 16936 (ABNT, 2023), evidenciando adequada estabilidade dimensional e desempenho mecânico para uso estrutural. No entanto, a avaliação da qualidade de colagem indicou que os painéis produzidos exclusivamente com lâminas de *Eucalyptus dunnii* não atenderam plenamente aos critérios normativos para as

Classes 2 e 3, apontando a necessidade de ajustes no processo de colagem. As composições híbridas de *Pinus spp.* e *Eucalyptus dunnii* apresentaram desempenho técnico equilibrado, combinando resistência mecânica, estabilidade dimensional e conformidade com os requisitos normativos de colagem. Dessa forma, o uso combinado das duas espécies configura-se como uma alternativa tecnicamente viável e promissora, ampliando a aplicabilidade industrial do *Eucalyptus dunnii* e contribuindo para a diversificação da matéria-prima destinada à produção de painéis compensados estruturais.

Por fim, os resultados reforçam a importância do aprimoramento dos processos industriais, especialmente no que se refere à colagem de painéis produzidos integralmente com *Eucalyptus dunnii*, visando potencializar seu desempenho e viabilizar sua aplicação plena em sistemas construtivos industrializados em madeira no contexto da construção sustentável. Nesse contexto, sugere-se, para trabalhos futuros, o desenvolvimento e a avaliação de formulações adesivas específicas adaptadas às características do *Eucalyptus dunnii* e recomenda-se a investigação mais aprofundada do impacto do tratamento de aquecimento nas propriedades químicas da madeira.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, O. J. R. de. **Métodos para controle das rachaduras de topo em toras de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden, visando a produção de lâminas por desenrolamento**. 1986. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.
- ALMEIDA, N. F. de. **Avaliação da qualidade da madeira de um híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de lâminas e manufatura de compensados**. 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- ALMEIDA, R. R.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; JANKOWSKY, I. P. Produção de lâminas a partir da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 19–28, jun. 2004.
- ARRUDA, L. M.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. S.; MELO, R. R. Estudo preliminar das propriedades de compensados produzidos com lâminas de paricá modificadas termomecanicamente. **Ciência da Madeira**, v. 2, n. 1, p. 29–42, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo setorial 2022: ano base 2021**. Curitiba, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. Norma técnica do sistema wood frame é publicada! Curitiba, 2023. Disponível em: <https://abimci.com.br/norma-tecnica-do-sistema-wood-frame-e-publicada/>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17002:2021** — Compensado: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-1:2012** — Madeira compensada: qualidade de colagem. Parte 1: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-2:2012** — Madeira compensada: qualidade de colagem. Parte 2: requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 16143:2024** — Preservação de madeiras: sistema de categorias de uso. Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16936:2023** — Edificações em *light wood frame*. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO CATARINENSE DE EMPRESAS FLORESTAIS. **Anuário estatístico de base florestal para o estado de Santa Catarina 2022 (ano-base 2021)**. Florianópolis: ACR, 2022.

ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESAS DE BASE FLORESTAL. **Estudo setorial 2022**. Curitiba: APRE, 2022.

BALDWIN, R. F. **Plywood and veneer-based products: manufacturing practices**. San Francisco: M. Freeman, 1995. 388 p.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Produção de compensados com 11 espécies do gênero *Eucalyptus*: avaliação das propriedades físicas e mecânicas. **Scientia Forestalis**, n. 63, p. 65–78, 2003.

BORTOLETTO JÚNIOR, G.; GARCIA, J. N. Bending strength and stiffness properties of OSB and plywood panels. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 563–570, jul./ago. 2004.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 17 dez. 2025.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D. Efeito da vaporização de toras na redução dos defeitos associados a tensões de crescimento de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.15, n. 4, p. 431-440, 2005.

CAMPOS, P. F. **Light Steel Framing: uso em construções habitacionais empregando a modelagem virtual como processo de projeto e planejamento**. 2014. 196 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CASTRO, R. C. M. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados: light steel framing**. 2005. 255 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

CONEGLIAN, A. ; SEVERO, E. T. D. ; BATISTA, W. R. ; PEREIRA, I. M. ; GOMES, I. S. . Rendimento e classificação das lâminas de *Eucalyptus grandis* W. Hill utilizando dois tratamentos térmicos. **ESPACIOS (CARACAS)** , v. 38, p. 14-19, 2017.

CRESPO, E. A. **Tensão de crescimento e suas consequências no desdobro e secagem do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna***. 2000. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2000.

DÜNDAR, T.; KORKUT, N.; ÜNSAL, Ö. The effect of boiling time on the surface roughness of rotary-cut veneers from Oriental beech (*Fagus orientalis* L.). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 199, n. 1–3, p. 119–123, 2008.

EMBRAPA FLORESTAS. O Eucalipto.. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto>. Colombo, 2019. Acesso em: 20 de mai 2023.

ESPÍNDOLA, L. R. **O wood frame na produção de habitação social no Brasil**. 2017. 331 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

F.A.O. *El eucalipto en la repoblación forestal*. Roma: FAO, 1981. Disponível em: <https://www.fao.org/4/AC459S/AC459S14.htm>. Acesso em: 2023

FILHO, E. P.; SANTOS, P. E. T. Considerações sobre o plantio de *Eucalyptus dunnii* no Estado do Paraná. Colombo: Embrapa, 2005. (Comunicado Técnico, 141).

FOELKEL, C.E.B. 1977. **Constituição química da madeira**. Viçosa. MG, CENIBRA/UFV, 60P.

FREITAS, T. P. **Colagem e soldagem de madeira termorretificada de *Fraxinus excelsior***. 2019. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

GASPARIN, Felipe José. **Composição de módulo popular de wood frame e madeira mineralizada**. 2018. 61 p. Monografia (Especialização em Gerenciamento de Obras). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

HSE, C. Y.; KUO, M. L. Influence of extractives on wood gluing and finishing: a review. **Forest Products Journal**, v. 38, n. 1, p. 52–56, 1988.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Programa setorial da qualidade de painéis MDF e MDP. Informativo XIV**. Brasília: IBÁ, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2022**. Brasília: IBÁ, 2022.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2024**. Brasília: IBÁ, 2024.

IWAKIRI, S.; KEINERT JÚNIOR, S.; PRATA, J. G.; ROSSO, S. Produção de painel compensado estrutural de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, 2007.

IWAKIRI, S.; MANHIÇA, A. A.; RAMIREZ, M. G. L.; MATOS, J. L. M.; BONDUELLE, G. M.; PRATA, J. G. Avaliação da qualidade de painéis compensados de *Pinus maximinoi*, *Pinus oocarpa* e *Pinus tecunumannii* com diferentes composições estruturais. **Ciência Florestal**, v.22, n.2, p. 315-321, abri-jun, 2012.

IWAKIRI S.; MATOS, J. L. M.; FERREIRA, E. S.; PRATA J. G.; TRIANOSKI, R. Produção de painéis compensados estruturais com diferentes composições de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 569–576, 2012.

IWAKIRI, S.; MATOS, J.L.M. de; LIMA, A.J.M. de; FERREIRA, E.S.; BATISTA, D.C.; ROMÃO, S.A.A. Produção de painéis compensados de *Pinus* tropicais colados com resina fenolformaldeído. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 3, p. 669-673, jul./set. 2009.

IWAKIRI, S.; NIELSEN, I. R.; ALBERTI, R. A. R. Avaliação da influência de diferentes composições de lâminas em compensados estruturais de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 19–24, jul./dez. 2000.

IWAKIRI, S.; OLANDOSKI, D. P.; LEONHARDT, G.; BRAND, M. A. Produção de chapas de madeira compensada de cinco espécies de pinus tropicais. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 2, p. 71–77, 2001.

IWAKIRI, S.; PEREIRA, S.J.; NISGOSKI, S. Avaliação da qualidade de colagem em compensados de *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus robusta*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 6, n. 1, p. 45-50, jan./dez. 1999

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R. *Painéis de madeira reconstituída*. 2. ed. Curitiba: FUPEF, 2020.

JAEGER, P.; ZIGER M. Avaliação das propriedades mecânicas de painéis compensados de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus dunnii/Pinus taeda*. **Cerne** v. 13, n. 3, p. 329–338, 2007.

JANKOWSKY, I. P. Manufatura de painéis compensados com madeira de *Eucalyptus spp.*: resultados preliminares. **Circular Técnica IPEF**, n. 82, p. 1–4, 1979.

JANKOWSKY, I. P.; AGUIAR, O. J. R. de. Manufatura de painéis compensados com *Eucalyptus*: caracterização de diversas espécies. **Floresta**, v. 14, n. 1, 1983. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v14i1.6308>.

JANKOWSKY, I. P.; GALVÃO, A. P. Influência do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira. **IPEF**. Piracicaba, 1979. 33 p.

JI, Y.; QI, Y.; ZHU, R.; MA, H.; ZHANG, Y.; YU, W. Thermophysical molding treatments on thick wood veneer. **Polymers**, v. 14, e3516, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14173516>

JUIZO C. G. F.; ZEN L. R.; KLITZKE W.; FRANÇA M. C.; CREMONEZ V. C.; KLITZKE R. J. Propriedades tecnológicas da madeira de eucalipto submetida ao tratamento térmico . **Nativa**, Sinop, v.6, n. 5, p. 537-542, set./out. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i5.5666>

JÚNIOR, C. R. C.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. T. M. L.. **Uso da madeira na construção civil**. Projectus, v. 2, n. 4, p. 79-93, 2017.

JÚNIOR, D. L.; COLODETTE, J. L. Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira [S. l.]**, v. 33, n. 76, p. 429–438, 2013. DOI: 10.4336/2013.pfb.33.76.528. Disponível em: <https://pfb.sede.embrapa.br/pfb/article/view/528>. Acesso em: 17 dez. 2025.

KAZMIERCZAK, S. **Qualidade de painéis de madeira compensada fabricados com lâminas de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus urograndis***. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2012.

KAZMIERCZAK, S.; HILLIG, E.; IWAKIRI, S. Painéis Compensados Fabricados com Lâminas de Três Espécies de Eucaliptos. **Floresta e Ambiente**, Seropédica , v. 24, e00111614, Rio de Janeiro, 2017.

LATORRACA, J. V. F. **Estudo da viabilidade do uso da espécie *Eucalyptus dunnii* (Maid) na manufatura de painéis de madeira-cimento**. 1996. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

LIMA, V. de S.; NASCIMENTO, S. L.; SANTOS, M. C.; DIAS, J. M. S.; NASCIMENTO, B. L. M. Avaliação geográfica e econômica das indústrias de compensado no Brasil. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 8, n. 4, p. 14162–01e, 2022.

MASS, B. H.; TAVARES, S. F. Quantidade de resíduos de construção na obra de uma habitação de LSF comparada com uma em alvenaria convencional. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v. 2, p. 41, 2017. Disponível em: <https://revistas.ifpr.edu.br/index.php/mundietg/article/view/1155/1020>. Acesso em: 17 dez 2025.

MOLINA, J. C.; CALIL JÚNIOR, C. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 31, n. 2, p. 143–156, 2010.

PAESE, M. C. B. **Análise de sistemas construtivos em madeira implantados na região de Curitiba** – Paraná. 2012. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A.R.; HIGA, R. C. V., SHIMIZU, J. Y. et al. Características de madeiras de algumas espécies de eucaliptos plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PEREYRA, O. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus dunnii* na manufatura de painéis compensados**. 1994. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

PETTERSEN, R. C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. (ed.). *The chemistry of solid wood*. Washington, DC: American Chemical Society, 1984. p. 56–126.

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

PIZZOL, V. D.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. Caracterização elástica de compensados de madeira utilizados e reutilizados em fôrmas através de excitação por impulso. **Matéria**, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0264>.

PRATA, J. G. **Desempenho de um sistema de qualidade de uma fábrica de painéis compensados**. 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

RESENDE, E. B.; FARIA, L. C. S.; FERREIRA, E. F.; FERREIRA, T. A. A. Uso de wood frame na construção civil no Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15818>.

REZENDE, J. C. **Estudo experimental da ligação de placas de compensado estrutural com perfis do sistema construtivo *light steel framing***. 2019. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

ROCHA, C. D. **Efeito da vaporização na madeira de *Eucalyptus grandis* sobre suas propriedades químicas e resistência natural a fungos e cupins**. 2011. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

ROCHA, M. P. da. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria prima para serrarias**. 186 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2000.

ROCHA, G. C., MORAES, W. S., MORAES, T. P. E., BARRETO, M. I. S. B., MARCHESAN, R., MONTEIRO, T. C., & MORAES, C. B. Madeira de clones de *Eucalyptus* como matéria prima para a produção de painéis compensados. **Scientia Forestalis**, v. 52, e3926, 2024.

ROCHA, M. P.; TOMASELLI, I. Efeito do modelo de desdobro na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 70–83, 2002.

RODRIGUES, P. L. M.; SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; PELOZZI, M. M. A.; LATORRACA, J. V. F. Physical Properties of Wood from Steamed *Eucalyptus grandis* Logs. **Floresta e Ambiente**, vol.25, n1, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.019515>

ROZAS MELLADO, E. C. E. **Contribuição ao desenvolvimento tecnológico para a utilização de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* (Hill Ex Maiden) na geração de produtos com maior valor agregado**. 1993. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

SANTOS, P. E. T. Cultivo do eucalipto. Colombo: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1155567/1/EmbrapaCultivoDoEucalipto2014.pdf>. Acesso em: 17 dez 2025.

SATHRE, R.; GUSTAVSSON, L. Using wood products to mitigate climate change: external costs and structural change. **Applied Energy**, v. 86, n. 2, p. 251–257, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.007>.

SEVERO, E. T. D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem da madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid**. 1998. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Efeito da pré-vaporização em algumas propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus dunnii*, **Cerne**, vol. 7, n. 2, pp. 35-42, 2001.

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Efeito do tratamento de vaporização em toras e madeira serrada de *Eucalyptus dunnii* sobre a flexão estática. **Revista Floresta**. V. 29, n. 12. 1999.

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Vaporização no alívio das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus dunnii* de duas procedências. **Scientia Agraria**, v. 1, n. 1–2, p. 29–32, 2000.

SHESHMANI, S. Effects of extractives on some properties of bagasse/high density polypropylene composite. **Carbohydrate Polymers**, v. 94, p. 416–423, 2013.

SHIMIZU, J. *Pinus na silvicultura brasileira*. Colombo: Embrapa Florestas, 2008.

SJOSTROM, E.; ALÉN, R. **Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking**. New York: Springer, 1998. p. 37–77.

SOARES, A. C. M. Construções de residências sustentáveis em wood frame no Brasil: vantagens e desvantagens do método construtivo. **Rebena – Revista Brasileira de Ensino e Aprendizagem**, v6, p.373 -390. 2023. Disponível em: <https://rebena.emnuvens.com.br/revista/article/view/120/109>. Acesso em: 17 de dez 2025.

SOARES, A. K.; CADEMARTORI, P. H. G.; SANTOS, P. S. B.; GATTO, D. A. Efeito dos extrativos no inchamento das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Corymbia citriodora*. *Special Issue — II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira*, v. 6, n. 3, 2015.

SOUZA, M. A. M. **Deformação residual longitudinal causada pelas tensões de crescimento em clones de híbridos de *Eucalyptus***. 2002. 72 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

SUGAHARA, E. S. **Influência do tratamento térmico em painéis OSB produzidos com madeira de eucalipto em diferentes composições de camadas**. 181f. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2024.

TAPPI — TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi standard methods**. Atlanta: TAPPI, 2000–2002.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; PÁDUA, F. A. Deformação residual longitudinal e tangencial em seis clones de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 12, n. 3, p. 279–286, 2006.

UNEP — UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Building materials and the climate: constructing a new future*. 2023.

USDA — UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: U.S. Department of Agriculture, 2010. 463 p.

VALVERDE, A. E. L.; VALVERDE, S. R.; ALVARENGA, A. P.; MARQUES, G. M.; MENDONÇA, F. M.; OLIVEIRA, P. R. S. Cadeia produtiva de celulose. In: REZENDE, J. B. Cadeias produtivas do complexo agroindustrial de florestas plantadas em Minas Gerais: estrutura e dinâmica. Viçosa, MG: EPAMIG, 2012. p. 71-92

VIANA, L. D. **Comparativo de custos dos sistemas construtivos wood frame e concreto armado para edifício utilizando BIM 5D**. 2020. 113 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

VIEIRA, M.C., BRITO, E.O., GONÇALVES, F.G. Evolução econômica do painel compensado no Brasil e no mundo. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 277-285. 2012.

WANG, L.; TOPPINEN, A.; JUSLIN, H. Use of wood in green building: a study of expert perspectives from the UK. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 350–361, 2014.