



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá**

**ESTEFANI SUANA SUGAHARA**

**Influência do tratamento térmico em painéis OSB produzidos com madeira de eucalipto  
em diferentes composições de camadas**

Guaratinguetá  
2024

**Estefani Suana Sugahara**

**Influência do tratamento térmico em painéis OSB produzidos com madeira de eucalipto  
em diferentes composições de camadas**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia e  
Ciências do Campus de Guaratinguetá,  
Universidade Estadual Paulista, para obtenção  
do título de Doutora em Engenharia na área de  
Materiais.

Orientadora

Profa. Dra. Cristiane Inácio de Campos

Coorientador

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

Guaratinguetá  
2024

S947i Sugahara, Estéfani Suana  
Influência do tratamento térmico em painéis OSB produzidos com madeira de eucalipto em diferentes composições de camadas / Estéfani Suana Sugahara - Guaratinguetá, 2024.  
181 f : il.  
Bibliografia: f. 157-179  
  
Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.  
  
Orientadora: Profª. Drª. Cristiane Inácio de Campos  
Coorientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho  
  
1. Painéis de madeira. 2. Poliuretanas. 3. Construção de madeira. 4. Eucalipto. I. Título.  
CDU 691.11(043)

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Esta tese desenvolveu um produto para sistemas construtivos sustentáveis e relaciona-se com o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável: Construção de infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar inovação. Seu impacto esperado apresenta relevância científica, de inovação, tecnológica, ambiental, social, econômica e de internacionalização.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This thesis developed a product for sustainable construction systems and is related to the Sustainable Development Goal: Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation. Its expected impact has scientific, innovation, technological, environmental, social, economic and internationalization relevance.



*ESTÉFANI SUANA SUGAHARA*

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“DOUTORA EM ENGENHARIA”

PROGRAMA: ENGENHARIA  
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Documento assinado digitalmente  
 MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES  
Data: 16/02/2024 09:03:16-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves**  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente  
 CRISTIANE INACIO DE CAMPOS  
Data: 08/02/2024 16:24:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS**  
Orientador – UNESP

Documento assinado digitalmente  
 ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO  
Data: 09/02/2024 17:56:17-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO**  
Universidade Federal de São Carlos

Documento assinado digitalmente  
 MARILIA DA SILVA BERTOLINI  
Data: 09/02/2024 18:54:49-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. MARILIA DA SILVA BERTOLINI**  
UNESP

Assinado de forma digital  
por Alfredo Manuel  
Pereira GERALDES DIAS  
Data: 2024.02.12  
15:21:01 Z

**Prof. Dr. ALFREDO MANUEL PEREIRA GERALDES DIAS**  
Universidade de Coimbra

Documento assinado digitalmente  
 JULIO CESAR MOLINA  
Data: 08/02/2024 16:37:48-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA**  
USP

FEVEREIRO de 2024

## **DADOS CURRICULARES**

### **ESTEFANI SUANA SUGAHARA**

|                   |                                                                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NASCIMENTO</b> | 08/11/1990 - Fernandópolis, São Paulo, Brasil                                                          |
| <b>FILIAÇÃO</b>   | Mario Shizuo Sugahara<br>Marta Elizabete Suana                                                         |
| <b>2008/2013</b>  | Graduação em Engenharia Civil<br>Universidade Brasil, UNIVBRASIL, Brasil.                              |
| <b>2013/2014</b>  | Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho<br>Universidade Brasil, UNIVBRASIL, Brasil.      |
| <b>2016/2018</b>  | Mestrado em Engenharia Civil<br>Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil. |
| <b>2022/2023</b>  | Doutorado - Período Sanduíche<br>Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.                           |
| <b>2019/2024</b>  | Doutorado em Engenharia<br>Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.      |

Dedico este trabalho em memória aos meus avós David Suana e Julieta de Paula Suana, as pessoas mais amáveis desse mundo. Que sempre estiveram comigo e que, mesmo sem estudo, me ensinaram muitas das coisas mais importantes que já aprendi.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a quem devo o que tenho, o que sou, e o que há de vir.

Agradeço a toda minha *família* e *amigos*, pelo amor, carinho, apoio incondicional e compreensão pelas minhas faltas.

Agradeço aos meus orientadores no Brasil, *Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cristiane Inácio de Campos* e *Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho*, por me aceitarem, acreditarem no meu potencial e pela amizade, confiança, paciência, suporte, aconselhamento, direcionamento para oportunidades e por todos os conhecimentos compartilhados ao longo desses anos.

Agradeço ao *Prof. Dr. Alfredo Manuel Pereira Geraldias Dias*, meu supervisor no exterior, pelo aceite, confiança no meu trabalho, receptividade, acolhida, oportunidades e por ter oferecido todo o suporte necessário para que minhas experiências pessoal e profissional durante o Doutorado Sanduíche ocorressem da melhor forma possível.

Agradeço a *Faculdade de Engenharia e Ciências*, UNESP - Câmpus de Guaratinguetá e a *Universidade de Coimbra* em nome de todos os seus docentes e funcionários por todo auxílio prestado, pelo apoio à minha formação e execução deste trabalho, suporte para publicações e participação em eventos.

Agradeço ao Instituto de Ciências e Engenharia, UNESP - *Campus Itapeva* e seus funcionários, em especial ao Assistente de Suporte Acadêmico, *Juliano Rodrigo de Brito (in memorian)*, o qual colaborou com a execução da parte experimental de minhas pesquisas desde a época do mestrado.

Agradeço ao SerQ - *Centro de Inovação e Competências da Floresta*, em especial ao *Dr. André Manuel Alves Dias*, o qual com muita paciência me mentoreou, compartilhou comigo muito do seu tempo, conhecimento, orientações, me direcionou para ótimas oportunidades e foi companheiro de vários momentos.

Agradeço a todo o Departamento de Engenharia Civil da FEG-UNESP e a *Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marcia Regina de Feitas*, pelas oportunidades e pela supervisão durante o Estágio de Docência.

Agradeço à *Prof<sup>a</sup>. Dra. Michelle Leali Costa*, *Dr. Luis Felipe de Paula Santos*, grupo de pesquisa de *Compósitos Avançados e Materiais Carbonosos*, *Prof. Dr. André Christoforo*, *Prof. Dr. Juarez Benigno Paes*, *Prof. Dr. Fausto Freire*, *Dr. João Claudio Bassan de Moraes*, *Dr. Guilherme Barbirato*, *Dr. Matheus Cabral* e *Dr. Luiz Sergio Vanzela* por toda colaboração.

Agradeço especialmente à *Fernanda Malato Praxedes*, *Jean Uchoa Teixeira* e *Ana Eliza Palazzo*, por todos os momentos compartilhados e a todos amigos que fiz em Guaratinguetá.



Agradeço a todos os amigos que tive a oportunidade de conhecer durante o período desafiador do Doutorado Sanduíche em Coimbra, em especial à *Rita Bandeira*, *Carolina Hissa*, *Thercia Balbino* e *Thauane Selva*, que foram minha família longe de casa e partilharam comigo momentos, motivação, cafés e lágrimas (de tristeza e alegria).

Agradeço as empresas *Imperveg* e *Vale do Cedro* pela doação dos materiais utilizados na realização desta pesquisa.

Agradeço a *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* - Brasil (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Agradeço a todos que auxiliaram de forma direta ou indireta na confecção deste trabalho.

## **APOIO FINANCEIRO**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

## **FINANCIAL SUPPORT**

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento; porque é melhor a sua mercadoria do que artigos de prata, e maior o seu lucro que o ouro mais fino. É árvore de vida para os que dela tomam, e são bem-aventurados todos os que a retêm.”

Provérbios 3,13-14.18.

## RESUMO

Os painéis à base de madeira têm apresentado crescente aplicação na construção civil, especialmente em sistemas construtivos do tipo light frame conforme especificações da ABNT NBR 16936:2023. Constatada a escassez de estudos que visam produzir e avaliar os efeitos do tratamento térmico de painéis OSB (*Oriented Strand Board*), justifica-se esta proposta como inovadora do ponto de vista científico e tecnológico, visto que utiliza materiais alternativos e emprega tratamento térmico em substituição a tratamentos químicos preservativos da madeira. Neste estudo foram produzidos painéis OSB com lascas de madeira de eucalipto e adesivo poliuretano à base de mamona, com e sem tratamento térmico (a 175° e 200° C), com variação da composição de matéria-prima nas três camadas do painel nas proporções: 25:50:25 e 30:40:30. Foram avaliadas a cinética de degradação térmica dos materiais, a partir de técnicas de Termogravimetria e Calorimetria Exploratória Diferencial, e as propriedades físicas (densidade aparente, umidade, inchamento em espessura após imersão em água por 24h, e absorção de água), propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência à flexão, adesão interna e resistência ao arrancamento de parafuso em superfície e topo) e a resistência ao ataque de cupins (*Cryptotermes* e *Nasutitermes*) dos painéis. Foi realizada a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) em perspectiva *cradle-to-gate* para quantificar os potenciais impactos ambientais usando o método ReCiPe H em termos de dez categorias de impacto. Os resultados das propriedades físicas e mecânicas foram analisados estatisticamente e comparados com as classes de uso indicadas pela Norma EN 300:2006 e com a literatura, e indicaram que o tratamento térmico melhorou as propriedades físicas, tornando a superfície dos painéis mais hidrofóbica e reduziu a interação com água, assim como não diminuiu as propriedades mecânicas a níveis inferiores aos recomendados. A variação de porcentagens de partículas nas camadas não evidenciou diferença significativa na maioria das análises realizadas, indicando que todas as porcentagens estudadas podem ser adotadas sem comprometimento no desempenho físico-mecânico do painel. Todos os tratamentos estudados são compatíveis com a classificação como OSB/4 segundo a EN 300:2006 (painéis estruturais de suporte de carga pesada para uso em condições úmidas) apresentando excelente desempenho estrutural para qualquer composição de camadas e temperatura avaliadas. O tratamento térmico não majorou a resistência ao ataque de cupins. Entretanto, a combinação de madeira de eucalipto e adesivo de mamona para produção de OSB demonstrou resistência natural ao ataque de cupins, compatível com os painéis comerciais disponíveis no mercado brasileiro, mesmo sem utilização de aditivos químicos para aumentar a durabilidade. Na LCA, a versão experimental dos painéis

(tratada termicamente) obteve melhor desempenho em 7 de 10 categorias de impacto ambiental e apresentou comportamento mais seguro nas categorias relacionadas à saúde humana se comparados com painéis tradicionais.

**Palavras-chave:** Painéis OSB; Madeira de eucalipto; Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona; Tratamento térmico; Propriedades físicas; Propriedades mecânicas; LCA.

## ABSTRACT

Wood-based panels have been increasingly used in civil construction, especially in light frame construction systems according to ABNT NBR 16936:2023 specifications. Having noted the scarcity of studies that aim to produce and evaluate the effects of heat treatment of OSB (Oriented Strand Board) panels, this proposal is justified as innovative from a scientific and technological point of view, as it uses alternative materials and employs heat treatment instead to wood preservative chemical treatments. In this study, OSB panels were produced with eucalyptus wood chips and castor-based polyurethane adhesive, with and without heat treatment (at 175° and 200 °C), with variation in the raw material composition in the three layers of the panel in the proportions: 25:50:25 and 30:40:30. Were evaluated the kinetics of thermal degradation of materials, using Thermogravimetry and Differential Scanning Calorimetry techniques, the physical (apparent density, moisture content, thickness swelling after 24h, and water absorption), and mechanical properties (modulus of elasticity, static parallel bending, internal adhesion and resistance to withdrawal of screws on the surface and top) and the resistance to termite attack (*Cryptotermes* and *Nasutitermes*) of the panels. A Life Cycle Assessment (LCA) was also carried out from a cradle-to-gate perspective to quantify potential environmental impacts using the ReCiPe H method in terms of ten impact categories. The results of the physical and mechanical properties were statistically analysed and compared with the use classes indicated by the European Standard EN 300:2006 and with the literature and indicated that the heat treatment improved the physical properties, making the surface of the panels more hydrophobic and reduced interaction with water, as well as it did not reduce the mechanical properties to levels below those recommended. The variation in percentages of particles in the layers did not show a significant difference in most of the analyses carried out, indicating that all percentages studied can be adopted without compromising the physical-mechanical performance of the panel. All treatments studied are compatible with classification as OSB/4 according to EN 300:2006 (heavy duty load-bearing boards for use in humid conditions) presenting an excellent structural profile for any layer composition and temperature evaluated. Heat treatment did not increase resistance to termite attack. However, the combination of eucalyptus wood and castor oil adhesive for the production of OSB demonstrated natural resistance to termite attack, compatible with commercial panels available on the Brazilian market, even without the use of chemical additives to increase durability. In the LCA, the experimental panels (heat treated) obtained better results in 7 of 10 environmental

impact categories and presented more safe behaviour in categories related to human health if compared with traditional panels.

**Keywords:** OSB panels; Eucalyptus wood; Castor oil polyurethane resin; Heat treatment; Physical properties; Mechanical properties; LCA.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 - Artigo: Thermal treatment of OSB panels.....                                     | 30  |
| Figura 2 - Aplicação de Painéis OSB na construção civil.....                                | 33  |
| Figura 3 - Principais agentes de degradação e reações na madeira exposta à natureza .....   | 35  |
| Figura 4 - Fontes de documentos para a palavra-chave " <i>Oriented Strand Board</i> " ..... | 40  |
| Figura 5 - Co-ocorrência de todas as palavras-chave das publicações.....                    | 42  |
| Figura 6 - Principais tipos de painéis de madeira.....                                      | 59  |
| Figura 7 - Proporção em valor de exportação dos produtos florestais em 2019 .....           | 61  |
| Figura 8 - Produção de painéis OSB .....                                                    | 63  |
| Figura 9 - IMPERVEG® AGT 1315.....                                                          | 83  |
| Figura 10 - Principais etapas para realização do estudo.....                                | 84  |
| Figura 11 - Fluxograma de trabalho .....                                                    | 85  |
| Figura 12 - Preparo dos strands .....                                                       | 86  |
| Figura 13 - Densidade: esquema de medições .....                                            | 87  |
| Figura 14 - Curva de carga-deflexão dentro da faixa de deformação elástica .....            | 90  |
| Figura 15 - Representação esquemática do ensaio de flexão .....                             | 91  |
| Figura 16 - Aparato para realização do ensaio de adesão interna .....                       | 92  |
| Figura 17 - Representação esquemática do ensaio de arrancamento de parafuso .....           | 93  |
| Figura 18 - Teste de alimentação forçada com cupins de madeira seca.....                    | 94  |
| Figura 19 - Teste de alimentação forçada com cupins subterrâneos .....                      | 97  |
| Figura 20 - Artigo: Study of the Influence of Heat Treatment on OSB... ..                   | 99  |
| Figura 21 - Materiais utilizados na produção dos painéis .....                              | 105 |
| Figura 22 - Fabricação do OSB .....                                                         | 108 |
| Figura 23 - Tratamento térmico dos painéis.....                                             | 109 |
| Figura 24 - Curva TGA/DTG - Madeira .....                                                   | 111 |
| Figura 25 - Curva TGA/DTG - Adesivo .....                                                   | 112 |
| Figura 26 - Propriedades Físicas: Densidade e Teor de Umidade.....                          | 114 |
| Figura 27 - Propriedades Físicas: Inchamento 24 h e Absorção de água .....                  | 115 |
| Figura 28 - Propriedades Mecânicas: MOE-pa e MOE-pe .....                                   | 117 |
| Figura 29 - Propriedades Mecânicas: MOR-pa e MOR-pe .....                                   | 118 |
| Figura 30 - Propriedades Mecânicas: PS-t e PS-s .....                                       | 119 |
| Figura 31 - Propriedades Mecânicas: IB .....                                                | 120 |
| Figura 32 - Cupins de madeira seca: Resumo dos resultados.....                              | 126 |



|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 33 - Cupins de madeira seca: Gráficos de Pareto.....                          | 128 |
| Figura 34 - Cupins de madeira seca: Efeitos principais e interação dos fatores ..... | 129 |
| Figura 35 - Cupins subterrâneos: Resumo dos resultados .....                         | 130 |
| Figura 36 - Cupins subterrâneos: Gráficos de Pareto .....                            | 132 |
| Figura 37 - Cupins subterrâneos: Interação de fatores significativos.....            | 132 |
| Figura 38 - Artigo: Environmental Evaluation of Experimental... ..                   | 135 |
| Figura 39 - Limites do sistema dos painéis OSB .....                                 | 143 |
| Figura 40 - Contribuições relativas - H_OSB .....                                    | 148 |
| Figura 41 - Contribuições relativas - G_OSB .....                                    | 149 |

## **LISTA DE QUADROS**

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1 - Processos de modificação térmica e suas condições de processamento ..... | 39  |
| Quadro 2 - Resumo dos trabalhos .....                                               | 48  |
| Quadro 3 - Etapas da LCA .....                                                      | 80  |
| Quadro 4 - Indicadores de categoria de impacto ambiental utilizados.....            | 140 |
| Quadro 5 - Comentários e fontes de dados/procedimentos utilizados no LCI .....      | 143 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Classificação: principais resultados para " <i>Oriented Strand Board</i> " .....  | 41  |
| Tabela 2 - Principais palavras-chave relacionadas com " <i>Oriented Strand Board</i> " ..... | 43  |
| Tabela 3 - Número total de documentos encontrados .....                                      | 43  |
| Tabela 4 - Palavras-chave para a pesquisa combinada.....                                     | 44  |
| Tabela 5 - Número de documentos selecionados na pesquisa combinada .....                     | 45  |
| Tabela 6 - Métricas Scopus .....                                                             | 46  |
| Tabela 7 - Ensaio de biodegradação: Tratamentos avaliados .....                              | 94  |
| Tabela 8 - Tratamentos analisados .....                                                      | 109 |
| Tabela 9 – Ensaio realizado.....                                                             | 110 |
| Tabela 10 - Resultados do teste de Tukey sobre a influência da temperatura (T).....          | 122 |
| Tabela 11 - Resultados do teste de Tukey sobre a influência das camadas.....                 | 124 |
| Tabela 12 - Inventário global de dados por unidade funcional .....                           | 144 |
| Tabela 13 - Potenciais Impactos Ambientais para 1 m <sup>3</sup> de OSB.....                 | 147 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|                       |                                                                                                     |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABNT                  | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                                            |
| AD                    | Anderson-Darling                                                                                    |
| ANOVA                 | Análise de variância                                                                                |
| ASTM                  | <i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)       |
| CC                    | Mudanças climáticas                                                                                 |
| CCA                   | Arseniato de Cobre Cromatado                                                                        |
| CCB                   | Borato de Cobre Cromatado                                                                           |
| CM                    | Teste de comparações múltiplas                                                                      |
| Comp                  | Composição (camadas)                                                                                |
| Cps                   | Corpos-de-prova                                                                                     |
| <i>Cradle-to-gate</i> | Processos desde a extração da matéria-prima (berço) até a fase de produção (portão da fábrica)      |
| CV                    | Coeficiente de variação                                                                             |
| D                     | Densidade                                                                                           |
| DSC                   | Calorimetria Exploratória Diferencial                                                               |
| EN                    | <i>European Standard</i> (Norma Europeia)                                                           |
| <i>et al.</i>         | "entre outros", tradução livre do latim usada para citar artigos escritos por mais de três autores. |
| FD                    | Esgotamento Fóssil                                                                                  |
| FE                    | Eutrofização de água doce                                                                           |
| FEG                   | Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá                                                            |
| FET                   | Ecotoxicidade de água doce                                                                          |
| FF                    | Resina fenol-formaldeído                                                                            |
| HDF                   | <i>High Density Fiberboard</i>                                                                      |
| HT                    | Toxicidade humana                                                                                   |
| IB                    | Resistência à Tração Perpendicular ou Adesão Interna                                                |
| ISO                   | <i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização) |
| LCA                   | Avaliação do Ciclo de Vida ( <i>Life Cycle Assessment</i> )                                         |
| MC                    | Teor de Umidade                                                                                     |
| MDI                   | Resina Metileno difenil diisocianato                                                                |

|           |                                                                      |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|
| MDF       | <i>Medium Density Fiberboard</i>                                     |
| MDP       | <i>Medium Density Particleboard</i>                                  |
| ME        | Eutrofização marinha                                                 |
| MLC       | Madeira Laminada Colada                                              |
| MPa       | Mega Pascal - unidade de medida utilizada para Tensão                |
| MOE-pa    | Módulo de elasticidade na direção paralela                           |
| MOE-pe    | Módulo de elasticidade na direção perpendicular                      |
| MOR-pa    | Módulo de Resistência à Flexão Estática na direção paralela          |
| MOR-pe    | Módulo de Resistência à Flexão Estática na direção perpendicular     |
| NBR       | Norma Técnica Brasileira                                             |
| OD        | Destruição da camada de ozônio                                       |
| ODS       | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável                             |
| ONGs      | Organizações não governamentais                                      |
| ONU       | Organização das Nações Unidas                                        |
| OSB       | <i>Oriented Strand Board</i>                                         |
| OSSB      | <i>Oriented Structural Straw Board</i>                               |
| POF       | Formação de oxidante fotoquímico                                     |
| PS-s      | Resistência ao Arrancamento de Parafuso - Superfície                 |
| PS-t      | Resistência ao Arrancamento de Parafuso - Topo                       |
| PU-Mamona | Resina Poliuretana a base de óleo de mamona                          |
| T         | Temperatura                                                          |
| T1        | Tratamento 1, Temperatura 0 °C, Composição do painel (%): 25:50:25   |
| T2        | Tratamento 2, Temperatura 0 °C, Composição do painel (%): 30:40:30   |
| T3        | Tratamento 3, Temperatura 175 °C, Composição do painel (%): 25:50:25 |
| T4        | Tratamento 4, Temperatura 175 °C, Composição do painel (%): 30:40:30 |
| T5        | Tratamento 5, Temperatura 200 °C, Composição do painel (%): 25:50:25 |
| T6        | Tratamento 6, Temperatura 200 °C, Composição do painel (%): 30:40:30 |
| T7        | Tratamento 7, Painéis comerciais                                     |
| TA        | Acidificação terrestre                                               |
| TET       | Ecotoxicidade terrestre                                              |
| TGA       | Termogravimetria                                                     |
| TS        | Teor de Inchamento após 24 h                                         |
| UF        | Resina ureia-formaldeído                                             |

|       |                                |
|-------|--------------------------------|
| UNESP | Universidade Estadual Paulista |
| VOC   | Compostos orgânicos voláteis   |
| WA    | Absorção de água               |

## SUMÁRIO

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                  | <b>24</b> |
| 1.1 INTRODUCTION.....                                                      | 26        |
| 1.2 OBJETIVOS .....                                                        | 28        |
| <b>1.2.1 Objetivos gerais .....</b>                                        | <b>28</b> |
| <b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>                                    | <b>28</b> |
| 1.3 ESTRUTURA DA TESE .....                                                | 29        |
| <b>2 REVISÃO SISTEMÁTICA E BIBLIOMÉTRICA.....</b>                          | <b>30</b> |
| 2.1 RESUMO DO CAPÍTULO .....                                               | 31        |
| 2.2 INTRODUÇÃO.....                                                        | 31        |
| 2.3 METODOLOGIA.....                                                       | 34        |
| 2.4 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO E MODIFICAÇÃO DA MADEIRA .....                 | 34        |
| 2.5 TRATAMENTO TÉRMICO.....                                                | 37        |
| 2.6 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA .....                                            | 40        |
| 2.7 REVISÃO SISTEMÁTICA .....                                              | 48        |
| 2.8 LACUNAS IDENTIFICADAS .....                                            | 54        |
| 2.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOMÉTRICA.....                       | 55        |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                       | <b>57</b> |
| 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....                                                 | 57        |
| 3.2 SISTEMAS <i>LIGHT FRAME</i> .....                                      | 58        |
| 3.3 PAINÉIS DE MADEIRA - PANORAMA INDUSTRIAL.....                          | 59        |
| 3.4 PAINÉIS OSB .....                                                      | 61        |
| <b>3.4.1 Painéis OSB - Panorama brasileiro .....</b>                       | <b>63</b> |
| 3.5 REFERENCIAL TEÓRICO .....                                              | 64        |
| <b>3.5.1 Fatores inerentes ao processo de produção.....</b>                | <b>64</b> |
| <b>3.5.2 Propriedades mecânicas.....</b>                                   | <b>66</b> |
| <b>3.5.3 Propriedades físicas.....</b>                                     | <b>68</b> |
| <b>3.5.4 Tratamentos preservativos, durabilidade e biodegradação .....</b> | <b>69</b> |
| <b>3.5.5 Madeira para painéis de partículas .....</b>                      | <b>74</b> |
| <b>3.5.6 Resinas para painéis de partículas.....</b>                       | <b>76</b> |
| <b>3.5.7 Avaliação do Ciclo de Vida .....</b>                              | <b>78</b> |
| 3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                      | 82        |
| <b>4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>                                 | <b>83</b> |

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1 MATERIAIS .....                                                                         | 83        |
| 4.1.1 Madeira .....                                                                         | 83        |
| 4.1.2 Adesivo.....                                                                          | 83        |
| 4.2 MÉTODOS .....                                                                           | 84        |
| 4.2.1 Preparo dos <i>strands</i> .....                                                      | 86        |
| 4.2.2 Execução dos ensaios físicos e mecânicos .....                                        | 87        |
| 4.2.2.1 Ensaios físicos .....                                                               | 87        |
| 4.2.2.1.1 Densidade ( <i>D</i> ) .....                                                      | 87        |
| 4.2.2.1.2 Teor de umidade ( <i>MC</i> ) .....                                               | 88        |
| 4.2.2.1.3 Teor de inchamento após 24h ( <i>TS</i> ).....                                    | 88        |
| 4.2.2.1.4 Absorção de água ( <i>WA</i> ).....                                               | 89        |
| 4.2.2.2 Ensaios mecânicos.....                                                              | 89        |
| 4.2.2.2.1 Módulo de Elasticidade ( <i>MOE</i> ) .....                                       | 89        |
| 4.2.2.2.2 Flexão estática paralela ( <i>MOR-pa</i> ) e perpendicular ( <i>MOR-pe</i> )..... | 90        |
| 4.2.2.2.3 Resistência à tração perpendicular ou adesão interna ( <i>IB</i> ) .....          | 91        |
| 4.2.2.2.4 Resistência ao Arrancamento de Parafuso ( <i>PS-s</i> e <i>PS-t</i> ) .....       | 92        |
| 4.2.3 Execução dos ensaios de biodegradação.....                                            | 93        |
| 4.2.3.1 Resistência a térmitas de madeira seca (alimentação forçada).....                   | 94        |
| 4.2.3.2 Resistência a térmitas subterrâneas (alimentação forçada) .....                     | 95        |
| 4.2.3.3 Ensaios de biodegradação - Análises estatísticas .....                              | 97        |
| <b>5 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS OSB .....</b>                                    | <b>99</b> |
| 5.1 RESUMO DO CAPÍTULO.....                                                                 | 100       |
| 5.2 INTRODUÇÃO.....                                                                         | 100       |
| 5.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....                                                                | 105       |
| 5.3.1 Materiais.....                                                                        | 105       |
| 5.3.2 Métodos .....                                                                         | 106       |
| 5.3.2.1 Caracterização da Degradação Térmica dos Materiais.....                             | 106       |
| 5.3.2.2 Produção do OSB .....                                                               | 106       |
| 5.3.2.3 Tratamento térmico do OSB.....                                                      | 109       |
| 5.3.2.4 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas .....                                | 110       |
| 5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                            | 111       |
| 5.4.1 Caracterização térmica das matérias primas .....                                      | 111       |
| 5.4.1.1 TGA.....                                                                            | 111       |
| 5.4.1.2 DSC .....                                                                           | 113       |



|                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4.2 Avaliação das propriedades físicas .....              | 113        |
| 5.4.3 Avaliação das propriedades mecânicas .....            | 116        |
| 5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....                                | 121        |
| 5.6 CONSIDERAÇÕES .....                                     | 124        |
| <b>6 RESISTÊNCIA AO ATAQUE DE TÉRMITAS .....</b>            | <b>126</b> |
| 6.1 TÉRMITAS DE MADEIRA SECA .....                          | 126        |
| 6.2 TÉRMITAS SUBTERRÂNEAS .....                             | 130        |
| 6.3 CONSIDERAÇÕES .....                                     | 133        |
| 6.3.1 Térmitas de madeira seca ( <i>Cryptotermes</i> )..... | 133        |
| 6.3.2 Térmitas subterrâneas ( <i>Nasutitermes</i> ) .....   | 133        |
| 6.3.3 Observações gerais .....                              | 134        |
| <b>7 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS PAINÉIS OSB .....</b>          | <b>135</b> |
| 7.1 RESUMO DO CAPÍTULO .....                                | 136        |
| 7.2 INTRODUÇÃO.....                                         | 136        |
| 7.3 EXPERIMENTAL .....                                      | 139        |
| 7.3.1 Definição do objetivo e escopo .....                  | 140        |
| 7.3.2 Estudo de caso.....                                   | 141        |
| 7.3.3 Descrição do Produto e Sistema em Avaliação .....     | 142        |
| 7.3.4 Inventário do Ciclo de Vida.....                      | 144        |
| 7.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                            | 147        |
| 7.4.1 Síntese dos resultados.....                           | 151        |
| 7.5 CONSIDERAÇÕES .....                                     | 153        |
| <b>8 CONCLUSÕES GERAIS DA TESE .....</b>                    | <b>154</b> |
| <b>9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>             | <b>156</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                    | <b>157</b> |
| <b>APÊNDICE A – DSC do adesivo .....</b>                    | <b>180</b> |
| <b>APÊNDICE B – Isoterma do adesivo a 120°C .....</b>       | <b>181</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A otimização do sistema de construção está aumentando devido à necessidade de redução de custos e minimização de resíduos (CABRAL *et al.*, 2015). Somado a isso observa-se que o desenvolvimento de materiais tecnológicos e sustentáveis vem apresentando cada vez mais relevância no setor da construção civil e diversas organizações mundiais indicam preocupação com o bem-estar do homem a partir da melhor qualidade de vida.

Tais fatos vão ao encontro com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), em especial com o Objetivo 9: Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação, o qual destaca o desenvolvimento sustentável tanto no âmbito da economia, quanto do bem-estar humano (UN, 2022).

Dentre os produtos que auxiliam na industrialização da construção com característica tecnológica e sustentável, destacam-se os painéis de madeira, que apresentam crescente aplicação em diversos segmentos. Além de se relacionarem com um menor impacto ambiental associado à fixação de carbono e substituição de materiais não renováveis (KOKUBUN, 2014).

Em sistemas construtivos leves como o *Wood* e *Steel Frame*, amplamente utilizados em países da América do Norte são utilizados painéis OSB (*Oriented Strand Board*) em funções de vedação, contraventamento, piso e cobertura (IFBQ, 2018).

De acordo com a FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação entre 2016 e 2020 o consumo mundial de painéis do tipo OSB aumentou aproximadamente 26%, comprovando a relevância e consolidação do uso deste tipo de produto no setor da construção civil (FAO, 2022).

O aumento da demanda por produtos à base de madeira na indústria da construção se relaciona com o apelo atual por materiais de reduzido impacto ambiental, uso de sistemas construtivos leves, menor geração de resíduos e tempo de execução (POZZER *et al.*, 2020).

Adicionado a isto, espera-se um grande aumento no consumo brasileiro de componentes construtivos derivados de madeira, impulsionado pela revisão e criação de normas (ABIMCI, 2021) como a ABNT NBR 16936 - Edificações em *light wood frame* (ABNT, 2023), publicada em julho de 2023, que representa um importante passo para a solidificação do sistema construtivo no Brasil (CREA, 2023), se apresentando como uma alternativa viável que concilia custo, sustentabilidade e desempenho, para viabilizar a construção de moradias em larga escala objetivando reduzir o déficit habitacional (ABIMCI, 2021).

Assim, torna-se imprescindível que no desenvolvimento de novos painéis, estes apresentem características tecnológicas compatíveis com a dos materiais tradicionalmente utilizados.

No Brasil os painéis OSB comerciais são produzidos apenas com madeira de Pinus (FERRO *et al.*, 2018). No entanto, diante da possibilidade de aumento da demanda, a madeira de eucalipto mostra-se como boa alternativa ao pinus para a confecção de painéis, visto que o eucalipto também é uma madeira de reflorestamento, apresenta rápido crescimento e possui uma diversidade de espécies, apresentando potencial para atender aos requisitos tecnológicos necessários (GUIMARÃES JÚNIOR, 2008).

Outro fator importante pertinente à produção de painéis é com relação à toxicidade dos produtos utilizados na fabricação, visto que o mobiliário e os materiais de construção são as principais fontes de poluição do ar no interior dos ambientes. Desta forma, é importante identificar quais as fontes e intensidade das emissões perigosas de forma a removê-las (LIANG *et al.*, 2014).

Os principais *hotspots* ambientais da produção brasileira de OSB se relacionam com o adesivo (a resina MDI - metileno difenil diisocianato) e o tratamento preservativo (cupinicida piretróide), recomendando que novas pesquisas explorem outros tipos de tratamentos (FERRO *et al.*, 2018).

Em justificativa ao crescente mercado de painéis destaca-se a importância do estudo dos impactos da adoção de métodos de produção alternativos, de modo a avaliar a capacidade de novos painéis em serem resistentes a esforços, a agentes degradadores, com reduzidos impactos ambientais, que tenham potencial para serem produzidos em escala industrial e que garantam propriedades compatíveis com as especificações normativas da EN 300 (BSI, 2006), podendo ser aplicados com segurança como componente construtivo.

A maioria dos estudos avalia apenas as propriedades físicas e mecânicas dos painéis de madeira. No entanto, para produzir materiais mais sustentáveis é essencial quantificar os seus impactos ambientais podendo ser utilizada, para esta finalidade, ferramentas como a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), que permite quantificar e comparar os impactos ambientais dos materiais e das soluções construtivas (SUGAHARA *et al.*, 2023).

E diante dos possíveis ataques de xilófagos que podem reduzir a durabilidade e segurança dos compósitos de madeira, os processos de biodegradação também devem ser investigados (NICACIO *et al.*, 2022).

Com base no panorama exposto, foi realizada ampla revisão bibliométrica com objetivo de validar o ineditismo do presente estudo. Neste contexto, o presente trabalho avaliou painéis

OSB produzidos com madeira de reflorestamento de eucalipto e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona submetidos a tratamento térmico pós produção. Como principais diferenciais para este estudo destacam-se: i) a maior resistência mecânica da madeira de eucalipto em relação ao pinus (SERPA *et al.*, 2003), ii) a não utilização de adesivo à base de formaldeído, que apresenta característica cancerígena (GARZÓN BARRERO, 2015), iii) a utilização de tratamento térmico em substituição a tratamentos químicos preservativos da madeira, que apresentam potencial toxicidade (FERRO, 2013).

## 1.1 INTRODUCTION

Optimization of the construction system is increasing due to the need to reduce costs and minimize waste (CABRAL *et al.*, 2015). Added to this, it is observed that the development of technological and sustainable materials has become increasingly relevant in the construction sector and several global organizations indicate concern for human well-being through a better quality of life.

These facts are in line with the Sustainable Development Goals of the United Nations (UN), in particular with Goal 9: Build resilient infrastructure, promote sustainable industrialization and foster innovation, which highlights sustainable development both in the scope of the economy, as well as human well-being (UN, 2022).

Among the products that help in the industrialization of construction with technological and sustainable characteristics, wood panels stand out, which are increasingly used in various segments. In addition to being related to a lower environmental impact associated with carbon fixation and replacement of non-renewable materials (KOKUBUN, 2014).

In light construction systems such as Wood and Steel Frame, widely used in North American countries, OSB (Oriented Strand Board) panels are used for wall, flooring and roofing systems (IFBQ, 2018).

According to FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, between 2016 and 2020, the global consumption of OSB panels increased by approximately 26%, proving the relevance and consolidation of the use of this type of product in the civil construction sector (FAO, 2022).

The growth in demand for wood-based products in the construction industry is related to the current appeal for materials with reduced environmental impact, use of lightweight construction systems, and reduced waste generation and execution time (POZZER *et al.*, 2020).

Added to this, a large raise in Brazilian consumption of wood-based construction components is expected, driven by the review and creation of standards (ABIMCI, 2021) such as ABNT NBR 16936 - Light wood frame construction (ABNT, 2023) published in July 2023 and which represents an important step towards solidifying the construction system in Brazil (CREA, 2023). And it presents itself as a viable alternative that combines cost, sustainability, and performance, to enable the construction of large-scale housing with the aim of reducing the housing deficit (ABIMCI, 2021).

Therefore, it is essential that when developing new panels, they present technological characteristics compatible with those of traditionally used materials.

In Brazil, commercial OSB panels are produced only with *pine* wood (FERRO *et al.*, 2018). However, given the possibility of increased demand, *eucalyptus* wood appears to be a good alternative to *pine* for making panels, as *eucalyptus* is also a reforestation wood, presents rapid growth and has a diversity of species, having the potential to meet the necessary technological requirements (GUIMARÃES JÚNIOR, 2008).

Another important factor pertinent to the production of panels is related to the toxicity of the products used in manufacturing, as furniture and construction materials are the main sources of air pollution inside environments. It is important to identify the sources and intensity of dangerous emissions in order to remove them (LIANG *et al.*, 2014).

The main environmental hotspots of Brazilian OSB production are related to the adhesive (MDI resin - methylene diphenyl diisocyanate) and preservative treatment (pyrethroid termiticide), recommending that further research explore other types of treatments (FERRO *et al.*, 2018).

In justification of the growing panel market, the importance of studying the impacts of adopting alternative production methods is highlighted, in order to evaluate the capacity of new panels to be resistant to mechanical efforts, to degrading agents, with reduced environmental impacts, which have potential to be produced on an industrial scale and guarantee properties compatible with the normative specifications of EN 300 (BSI, 2006), and can be safely applied as a construction component.

Most studies only evaluate the physical and mechanical properties of wood panels. However, to produce more sustainable materials it is essential to quantify their environmental impacts and tools such as Life Cycle Assessment (LCA) can be used for this purpose, which allows the environmental impacts of materials and construction solutions to be quantified and compared (SUGAHARA *et al.*, 2023).

And given the possible attacks by xylophages that can reduce the durability and safety of wood composites, biodegradation processes must also be investigated (NICACIO *et al.*, 2022).

Based on the above, an extensive bibliometric review was carried out with the aim of validating the novelty of the present study. In this context, the present work evaluated OSB panels produced with eucalyptus reforestation wood and castor oil-based polyurethane adhesive subjected to post-production heat treatment. The main differences for this study include: i) the greater mechanical resistance of *eucalyptus* wood compared to *pine* (SERPA *et al.*, 2003), ii) the non-use of formaldehyde-based adhesive, which has a carcinogenic characteristic (GARZÓN BARRERO, 2015), iii) the use of heat treatment to replace chemical treatments to preserve wood, which show potential toxicity (FERRO, 2013).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos gerais

O objetivo principal deste projeto foi estudar o desempenho de painéis OSB produzidos com lascas de madeira de eucalipto e resina poliuretana à base de mamona com duas diferentes proporções de partículas nas camadas e submetidos a tratamento térmico, visando verificar o potencial para ser utilizado como componente construtivo com finalidades estruturais.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a cinética de degradação térmica dos materiais utilizados na fabricação dos painéis;
- b) Avaliar os desempenhos físico, mecânico e a resistência ao ataque de cupins (*Cryptotermes* e *Nasutitermes*) dos painéis para os tratamentos realizados;
- c) Avaliar duas diferentes temperaturas de tratamento térmico (175° e 200°C) ;
- d) Avaliar a influência da variação da composição de materiais nas 3 camadas nas proporções: 25:50:25 e 30:40:30 (em massa);
- e) Comparar os resultados obtidos com as classes de uso indicadas pela EN 300:2006;
- f) Analisar os resultados estatisticamente e com estudos correlatos encontrados na literatura;
- e
- g) Realizar a Avaliação do Ciclo de Vida dos painéis

### 1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese divide-se em 8 capítulos, sendo o Capítulo 1 referente à introdução, justificativa e objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 relata o artigo: “*Thermal treatment of OSB panels: A systematic and bibliometric overview*” (SUGAHARA *et al.*, 2022), o qual trata-se de uma revisão sistemática e bibliométrica que demonstra a relevância e valida a originalidade desta pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica.

O Capítulo 4 contém o detalhamento do preparo da matéria-prima e a metodologia utilizada para execução dos ensaios realizados para avaliação das propriedades físicas, mecânicas e biodegradação dos painéis fabricados.

O Capítulo 5 apresenta o artigo: “*Study of the influence of heat treatment on OSB panels produced with eucalyptus wood in different layer compositions*” (SUGAHARA *et al.*, 2022b), o qual detalha os materiais e procedimentos metodológicos adotados para a produção e caracterização das matérias primas e dos painéis, o tratamento térmico efetuado e os resultados obtidos na avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis OSB produzidos neste trabalho.

O Capítulo 6 apresenta detalhadamente os resultados alcançados no estudo da resistência ao ataque de térmitas das espécies *Cryptotermes* e *Nasutitermes*.

O Capítulo 7 se refere ao artigo: “*Environmental Evaluation of Experimental Heat-treated Oriented Strand Board*” (SUGAHARA *et al.*, 2024) onde foram quantificados os potenciais impactos ambientais relacionados à produção experimental dos painéis, utilizando a LCA numa perspectiva do berço ao portão e comparou os resultados com painéis tradicionais e dados da literatura.

O Capítulo 8 apresenta as considerações gerais do trabalho e o capítulo 9 reúne sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO SISTEMÁTICA E BIBLIOMÉTRICA

Neste capítulo é apresentado o conteúdo derivado do artigo intitulado “*Thermal treatment of OSB panels: a systematic and bibliometric overview*” de Sugahara, E. S., Arroyo, F. N., de Campos, C. I., Botelho, E. C., Christoforo, A. L., Costa, M. L., & Lahr, F. A. R. publicado na revista *European Journal of Wood and Wood Products* v. 80, n. 6, p. 1293-1307, 2022, doi:10.1007/s00107-022-01849-9 (SUGAHARA *et al.*, 2022), o qual consiste em uma revisão sistemática e bibliométrica referente a um dos temas principais desta pesquisa, o tratamento térmico em painéis OSB (Figura 1).

Figura 1 - Artigo: Thermal treatment of OSB panels...

European Journal of Wood and Wood Products  
https://doi.org/10.1007/s00107-022-01849-9

### REVIEW ARTICLE



## Thermal treatment of OSB panels: a systematic and bibliometric overview

Estefani Suana Sugahara<sup>1</sup> · Felipe Nascimento Arroyo<sup>2</sup> · Cristiane Inácio de Campos<sup>1</sup> · Edson Cocchieri Botelho<sup>1</sup> · André Luis Christoforo<sup>2</sup> · Michelle Leali Costa<sup>1</sup> · Francisco Antonio Rocco Lahr<sup>3</sup>

Received: 29 November 2021 / Accepted: 3 June 2022

© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2022

### Abstract

Given the need for durable and low-maintenance products, thermal modification has emerged as an environmentally friendly alternative, replacing chemical treatments. Although the literature reports a large number of articles related to the wood thermal treatment, nevertheless there is a much smaller number related to the thermal treatment of Oriented Strand Board (OSB) panels, which are scarce, limited or contradictory. This panel is used as a building material for internal and covered exterior functions in roofs, walls, floors, structural elements and other uses, currently being widely studied. Therefore, this research aims to present a bibliometric and systematic literature review on heat treatment of OSB panels published between 2000 and 2020 in the Scopus database, through extensive bibliographic review and using a simple and integrative systematic, containing its metrics and main findings. It was found that, despite the progressive growth of interest from the scientific community in relation to wood modification, thermal-based modifications still have much less studies compared to other techniques. At the end, gaps, opportunities and potential areas for future research related to thermal modification of panels are presented.

**Keywords** Oriented strand Board · Heat Treatment · Thermal modification · Thermally modified · Thermally treated · Bibliometric analysis

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022).



## 2.1 RESUMO DO CAPÍTULO

Diante da necessidade de produtos duráveis e de baixa manutenção, a modificação térmica surgiu como uma alternativa ecologicamente correta, substituindo os tratamentos químicos. Embora a literatura registre um grande número de artigos relacionado ao tratamento térmico da madeira, ainda assim há um número muito menor relacionado ao tratamento térmico de painéis Oriented Strand Board (OSB), que são escassos, limitados ou contraditórios. Este painel é utilizado como material de construção para funções internas e externas em telhados, paredes, pisos, elementos estruturais e outros usos, sendo atualmente amplamente estudado. Portanto, este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliométrica e sistemática da literatura sobre tratamento térmico de painéis OSB publicados entre 2000 e 2020 na base de dados Scopus, por meio de ampla revisão bibliográfica e utilizando uma sistemática simples e integrativa, contendo suas métricas e principais resultados. Constatou-se que, apesar do progressivo crescimento do interesse da comunidade científica em relação à modificação da madeira, as modificações de base térmica ainda possuem muito menos estudos em comparação com outras técnicas. Ao final, são apresentadas lacunas, oportunidades e áreas potenciais para futuras pesquisas relacionadas à modificação térmica de painéis.

**Palavras-chave do capítulo:** *Oriented Strand Board*; Tratamento térmico; Modificação térmica; Modificado termicamente; Tratado termicamente; Análise bibliométrica.

## 2.2 INTRODUÇÃO

Como os padrões atuais de consumo não são sustentáveis a longo prazo, é fundamental aprimorar tecnologias aplicáveis a materiais renováveis (HILL, 2006) como a madeira, por exemplo, que é um dos materiais de construção mais antigos e que possui grande importância, visto que nenhum outro material pode ser aproveitado de maneiras tão diferentes. Dessa forma, a expertise para o trabalho com madeira foi evoluindo progressivamente e apresenta hoje padrões relevantes com requisitos rigorosos que garantem a base para sua qualidade (HERZOG *et al.*, 2004).

Deste modo, o interesse por materiais duráveis a partir de produtos de madeira modificada tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, principalmente devido à necessidade de redução da manutenção destes e em relação às preocupações com a sustentabilidade das construções, reduzindo o uso de preservativos tóxicos e considerando o ciclo de vida e energia incorporada de materiais. Consequentemente, a modificação da madeira

surgiu como uma alternativa ambientalmente correta para melhorar as propriedades intrínsecas da madeira, ampliando sua utilização, e possibilitando os pré-requisitos exigidos para sua aplicação (SANDBERG *et al.*, 2017).

Segundo Rowell (2006), como material de construção, a madeira tem sido utilizada desde o início da existência humana por ser renovável, amplamente disponível e barata, além de poder ser aplicada para uso em ambientes internos e externos. No entanto, por se tratar de um material biológico, a variabilidade sob mudanças de umidade e biodegradabilidade são suas desvantagens mais citadas (ICEL; BERAM, 2017). Como citado por Cappellazzi *et al.* (2020), é crucial que se desenvolvam dados sobre o uso adequado de produtos de madeira, bem como descobrir tratamentos potenciais para limitar o impacto da intrusão de umidade e os riscos biológicos como o ataque de fungos e cupins.

Diante disso, a indústria disponibiliza diversos tipos de produtos derivados da madeira, na forma de pranchas ou peças lineares, produzidas a partir de pequenos fragmentos de madeira colados e prensados entre si, com o objetivo de otimizar as propriedades da madeira da melhor maneira possível para sua aplicação (HERZOG *et al.*, 2004).

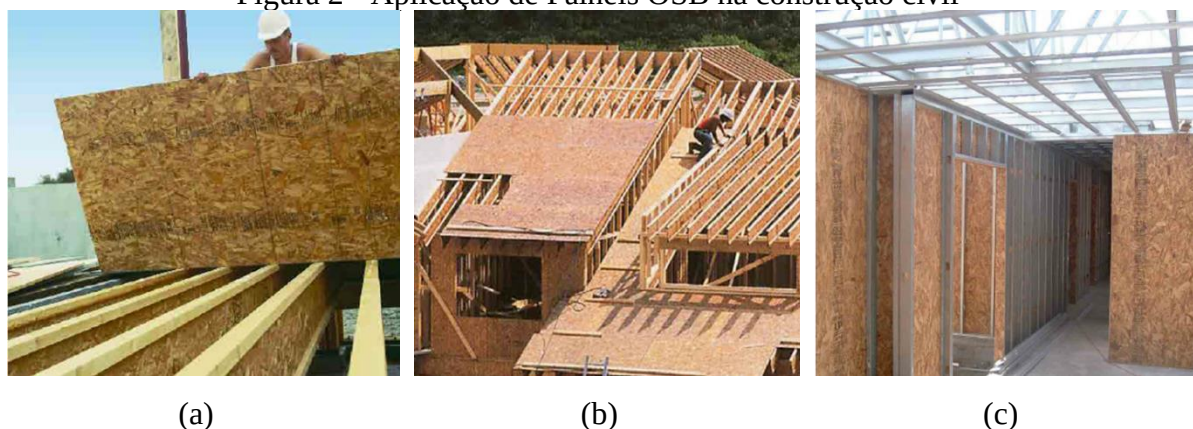
Dentre estes produtos, pode-se citar os painéis, que têm sido cada vez mais usados na indústria da construção, o que está relacionado à tendência contemporânea de escolha de materiais de baixo impacto ambiental e sistemas construtivos mais leves, com menor produção de resíduos e menor tempo de execução (POZZER *et al.*, 2020).

Um dos produtos de madeira mais utilizados na construção civil é o *Oriented Strand Board* (OSB). O OSB tem sido cada vez mais aceito no mercado da construção, sendo amplamente aplicado como painel estrutural ou não estrutural (WANG *et al.*, 2019) visto que apresenta excelentes propriedades tecnológicas, físicas e mecânicas (DEL MENEZZI *et al.*, 2008c; MENDES *et al.*, 2013c).

Este painel é composto comumente por três camadas de partículas de madeira longas e orientadas, de uma determinada forma e espessura, unidas por um adesivo onde as partículas das camadas externas são alinhadas e dispostas paralelamente ao comprimento do painel e a camada interna orientada, geralmente, na direção perpendicular à das partículas de madeira das camadas externas (BSI, 2006).

Na Figura 2 (Adaptada de LP CORP, 2021) podem ser observados painéis e vigas OSB (a), assim como a aplicação de painéis OSB em construções do tipo *Wood Frame* (b) e *Steel Frame* (c).

Figura 2 - Aplicação de Painéis OSB na construção civil



Fonte: Adaptado de LP CORP (2021).

A demanda por produtos à base de madeira, incluindo painéis, aumentou recentemente em todo o mundo com alcance do mercado global de painéis OSB esperado de US\$ 71,2 milhões até 2022 (BARBIRATO *et al.*, 2019). Somado a isso, a preocupação com o desenvolvimento sustentável tem causado mudanças significativas no campo da preservação da madeira (GÉRARDIN, 2016).

Isso levou a um grande desenvolvimento na indústria de modificação de madeira, impulsionado em parte por mudanças de uso, conscientização e restrições legais sobre o uso de madeira e produtos de madeira e produtos químicos prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, a indústria tem interesse em agregar valor à madeira serrada, aos subprodutos e, principalmente, no sentido de apoiar o desenvolvimento de uma sociedade sustentável diretamente ligada aos apelos internacionais sobre mudanças climáticas e atividades relacionadas reunidas no âmbito da Organização das Nações Unidas (SANDBERG *et al.*, 2017).

Como os processos de modificação de madeira e produtos de madeira encontram-se em vários níveis de avanço, os desafios devem ser superados para ampliar as diferentes aplicações industriais dos mesmos (SANDBERG *et al.*, 2017). E apesar de a literatura relatar diversos estudos com resultados expressivos a respeito do tratamento térmico para madeira maciça, comparativamente, poucos foram desenvolvidos sobre o tratamento térmico de painéis OSB tanto para pré como pós-tratamento (MENDES *et al.*, 2013a). Isso destaca a importância deste estudo do ponto de vista da indústria e da pesquisa.

Diante disso, inspirado pelos artigos de Wang *et al.* (2021) e Wasim *et al.* (2021), este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliométrica e sistemática da literatura sobre tratamento térmico de painéis OSB de pesquisas publicadas entre 2000 e 2020 na base de dados Scopus, a partir de uma extensa revisão bibliográfica e utilizando uma sistemática

simples e integrativa, contendo suas métricas e principais descobertas. Em conclusão, são apresentadas lacunas, oportunidades e áreas potenciais para pesquisas futuras.

## 2.3 METODOLOGIA

Este capítulo divide-se em seis seções principais após a seção metodológica. A primeira (2.4) apresenta uma breve revisão bibliográfica de modo a permitir uma compreensão sucinta de alguns dos principais processos de degradação e modificação da madeira. A segunda (2.5) aborda resumidamente o tratamento térmico da madeira. A terceira (2.6) contém os resultados da revisão bibliométrica obtida na busca pelas palavras-chave relacionando o processo de tratamento térmico em painéis OSB, suas métricas e mapeamento dos dados. A quarta (2.7) apresenta uma breve revisão sistemática dos artigos selecionados após a busca. A penúltima seção (2.8) relata lacunas, oportunidades e áreas potenciais de pesquisas futuras relacionadas à modificação térmica de painéis. Por fim, a última seção (2.9) contém as considerações da revisão efetuada.

A base de dados utilizada para essa investigação, a Scopus, trata-se de um banco de dados líder em pesquisas acadêmicas, e foram considerados apenas artigos dos últimos vinte anos, incluídos no período entre os anos 2000 e 2020 aplicando primeiro a palavra-chave “*Oriented Strand Board*”. Em seguida, para refinar ainda mais a busca, foi realizada uma nova busca utilizando a sigla “OSB” juntamente com os termos mais comuns encontrados para o processo de tratamento térmico para modificação de madeira, como por exemplo, “*Thermal modification*”, “*Thermally modified*”, “*Thermally treated*” and “*Thermal treatment*”.

As informações foram analisadas de forma sistemática e integrativa utilizando as métricas da ferramenta de análise de resultados de busca Scopus em conjunto com o *Virtual Operating System (VOS) viewer* (versão 1.6.15), a fim de desenvolver um mapeamento gráfico de rede a partir dos dados bibliográficos obtidos, usando diferentes técnicas bibliométricas.

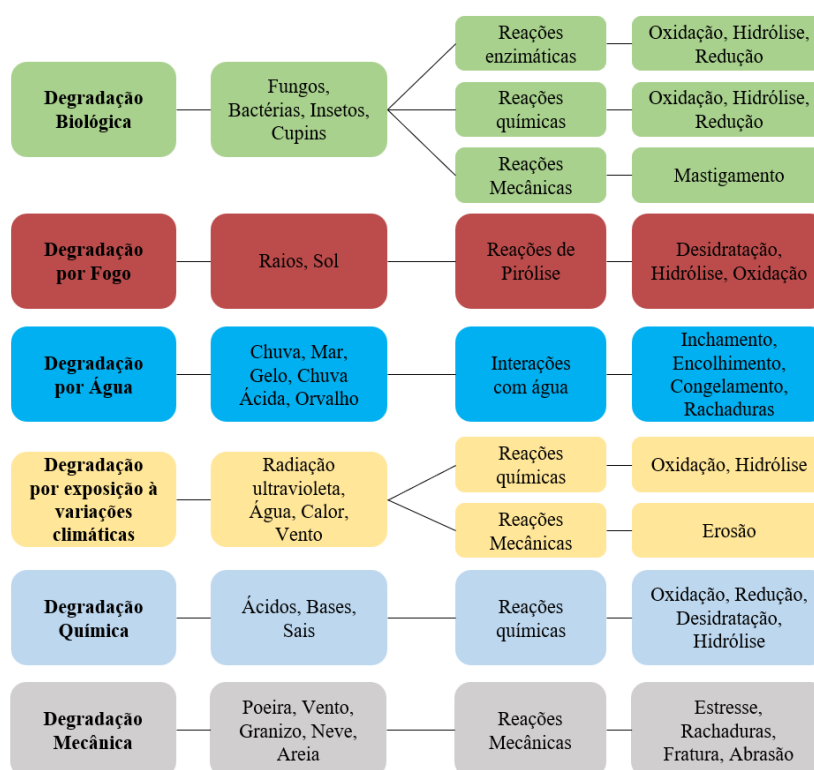
## 2.4 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO E MODIFICAÇÃO DA MADEIRA

Como a madeira é um produto natural que se origina de diferentes árvores individuais, limites são impostos ao seu uso e o material precisa ser transformado para adquirir a funcionalidade desejada. Assim a modificação é utilizada para superar as fragilidades da madeira serrada, laminada ou partículas de madeira usadas na produção de compósitos de madeira, melhorando as propriedades físicas, mecânicas ou estéticas que estão principalmente

relacionadas a variações de umidade, baixa resistência à biodeterioração contra fungos, cupins, brocas marinhas e irradiação UV, dureza e resistência ao desgaste (SANDBERG *et al.*, 2017).

De acordo com Rowell (1983), para produzir materiais à base de madeira com longa vida útil, é necessário interferir tanto quanto possível nos processos naturais de degradação e estes processos podem ocasionar diversas reações de degradação, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Principais agentes de degradação e reações na madeira exposta à natureza



Fonte: Adaptado de Rowell (1983).

A modificação da madeira pode envolver sobretudo a ação de agentes químicos, biológicos e físicos sobre o material, resultando em um aprimoramento da propriedade desejada durante a vida útil da madeira modificada, a qual não deve apresentar perda do desempenho aprimorado durante a sua vida útil, nem liberar substâncias tóxicas durante o serviço ou no final da vida após o descarte ou reciclagem (HILL, 2006).

No entanto, os métodos tradicionais de resistência ao apodrecimento e retardamento de fogo tratam o material com produtos químicos tóxicos ou corrosivos, que embora sejam eficazes em fornecer resistência ao apodrecimento e ao fogo, podem resultar em preocupações ambientais (ROWELL, 1983).

De acordo com Sandberg, Kutnar e Mantanis (2017) todos os tipos possíveis de tratamentos de madeira afetam o mecanismo de interação madeira-água. Os processos de

modificação da madeira podem envolver modificações ativas, que resultam em uma alteração da natureza química do material, ou uma modificação passiva, na qual resulta uma alteração nas propriedades sem alterar a química do material. A maioria dos métodos de modificação ativos investigados até agora envolveram a reação química de um reagente com grupos hidroxila do polímero da parede celular. Esses grupos hidroxila desempenham um papel fundamental na interação madeira-água ao mesmo tempo em que são os locais mais reativos.

A modificação química da madeira ocorre quando uma reação química de um agente ocorre com os constituintes poliméricos da madeira (lignina, hemiceluloses ou celulose), resultando na formação de uma ligação covalente estável entre o reagente e os polímeros de parede celular. Esses produtos químicos incluem diferentes tipos de isocianatos, epóxis, tais como etileno, propileno e óxido de butileno, e epóxis bifuncionais, anidridos tais como acético, butírico, ftálico, succínico, maleico, propiônico e anidrido butírico, cloretos de ácido, ácidos ceteno carboxílicos, formaldeído, acetaldeído, aldeídos bifuncionais, cloral, ácido ftalaldeído, sulfato de dimetila, cloretos de alquila, b-propiolactona e acrilonitrila (ROWELL, 2006).

Vários mecanismos de interação madeira-tratamento tendem a ocorrer ao mesmo tempo. Na modificação térmica, como um exemplo, partes dos polímeros de parede celular são alteradas, o que pode levar à reticulação, redução de grupos OH e clivagem indesejada das cadeias de polímero (SANDBERG *et al.*, 2017).

Os tratamentos preservativos, na sua grande maioria, são feitos com produtos químicos e divididos em dois grupos principais: os solúveis em água, como o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), o Quaternário de Cobre Amoniacal (ACQ) e o Borato de Cobre Cromatado (CCB) e os óleos-solúveis, como o creosoto, o naftenato de cobre, o quinolinolato de cobre e o óxido de tributilestanho (TBTO). A eficácia destes tratamentos não é avaliada apenas pela toxicidade dos produtos químicos para com os fungos e insetos, mas também pela penetração na madeira e quantidade retida no final do processo de tratamento. Sendo que o tratamento geralmente é realizado com o auxílio de uma autoclave à vácuo que utiliza pressão diferencial para forçar o preservativo a penetrar na madeira (SHMULSKY; JONES, 2011).

Para Terzi (2018) os conservantes à base de Boro disponíveis em várias formas, como compostos puros, minerais ou suas combinações, estão entre os biocidas mais promissores para a proteção da madeira contra a biodegradação por fungos, cupins, insetos e degradação térmica.

Todavia, conforme Han *et al.* (2012) poucos trabalhos combinaram conservantes à base de boro com partículas de madeira durante a fabricação de OSB para fornecer resistência a térmitas e ao apodrecimento dos produtos acabados. Acrescentando ainda que a opção mais promissora para os riscos de degradação moderada foi o uso de boratos resistentes à lixiviação,

como o borato de zinco durante a fabricação do painel, baseado na eficácia e baixa toxicidade deste produto químico em mamíferos.

No entanto, de acordo com Johansson (2005) apesar de a impregnação da madeira com substâncias químicas tóxicas para fungos e bactérias ser o método de preservação mais comumente utilizado, esta apresenta a grande desvantagem de ser tóxica para muitos outros organismos também. Desta forma, nas últimas décadas houve uma crescente conscientização ambiental que levou à proibição de diversos conservantes, o que abriu um novo mercado para formas ambientalmente corretas de proteger a madeira contra a degradação biológica e aumentar sua estabilidade dimensional.

Em consequência disso, observa-se que a área de modificação térmica de madeira vem se transformando e recebendo um interesse crescente na comunidade científica. No entanto, apesar disso, a modificação química da madeira ainda apresenta quase 50 vezes mais artigos do que a modificação de base térmica (SANDBERG *et al.*, 2017).

## 2.5 TRATAMENTO TÉRMICO

Segundo Navi e Sandberg (2011), o tratamento térmico é um processo de modificação de madeira que utiliza temperatura para promover uma degradação controlada da madeira, com o intuito de melhorar algumas de suas propriedades.

Além das vantagens ambientais, diversos estudos indicam que as principais vantagens da madeira tratada termicamente são a melhor repelência à água, a estabilidade dimensional aprimorada diante das variações de umidade (KAMDEM, PIZZI e JERMANNAUD, 2002; AYRILMIS e WINANDY, 2009; UNSAL *et al.*, 2010), e aumentos na resistência a degradação biológica sem o uso de conservantes químicos da madeira (KAMDEM, PIZZI e JERMANNAUD, 2002; ESTEVES e PEREIRA, 2009; ARO, BRASHAW e DONAHUE, 2014).

Porém, as altas temperaturas podem causar alterações na superfície da madeira e consequentemente a diminuição na capacidade adesiva (CHRISTIANSEN, 1990; AYRILMIS e WINANDY, 2009; GURLEYEN *et al.*, 2019). As propriedades mecânicas podem ser reduzidas, além ocorrer mudanças na cor para tons mais escuros (LOVRIĆ, ZDRAVKOVIĆ, POPADIĆ, 2017; CETERA *et al.*, 2018; GURLEYEN *et al.*, 2019).

Existem vários procedimentos para realizar a modificação térmica e as consequentes alterações de propriedades obtidas são altamente dependentes das variáveis envolvidas, como a espécie da madeira, tamanho e teor de umidade das amostras, temperatura, taxa de degradação

térmica, pressão, tipo de ambiente, atmosfera e duração do tratamento, sistemas fechados ou abertos, sistemas úmidos ou secos, uso de catalisadores, entre outros (HILL, 2006; KAMDEM *et al.*, 2002; SANDBERG *et al.*, 2017). Nos painéis OSB, este processo pode ser utilizado após a produção do painel (pós-tratamento) ou antes da fabricação do painel (pré-tratamento) nas partículas de madeira (MENDES *et al.*, 2013a).

Como resultado das alterações químicas induzidas termicamente nos constituintes macromoleculares, as propriedades físicas e biológicas da madeira são alteradas, sendo altamente dependentes do tratamento térmico empregado. Entre as principais alterações já relatadas, destacam-se melhorias na estabilidade dimensional, redução da higroscopicidade, melhor resistência ao ataque microbiológico, e reduções da tenacidade ao impacto, do módulo de ruptura e resistência à fratura e à abrasão reduzida, além da tendência para formação de fendas e rachaduras, nós se soltarem e o escurecimento do material (HILL, 2006).

Tanto o ambiente físico quanto o químico dentro da madeira mudam ao longo do processo de tratamento térmico. Os processos de modificação térmica são conduzidos principalmente em um ambiente seco com um gás inerte ou em um ambiente úmido com vapor em temperaturas de 160 a 240 °C. Nestas condições, as hemiceluloses são hidrolisadas e o índice de cristalinidade da celulose aumenta, mas a lignina é apenas ligeiramente afetada e a madeira degrada-se mais rapidamente quando aquecida por vapor ou água. A complexidade do processo aumenta à medida que a temperatura muda ao longo do processo.

Os produtos degradados agem como catalisadores para reações posteriores, e a umidade disponível para hidrólise e catalisadores se forma continuamente, movendo-se do interior para a superfície da madeira evaporando durante o tratamento (SANDBERG *et al.*, 2017).

A pirólise dos materiais lignocelulósicos que acontece a cerca de 270 °C ocorre porque os polímeros da parede celular sofrem reações com o aumento da temperatura liberando gases inflamáveis. A hemicelulose e os polímeros de celulose são degradados pelo calor muito antes da lignina, a qual contribui para a formação de carvão, gerando uma camada carbonizada que ajuda a isolar o composto de uma maior degradação térmica (ROWELL *et al.*, 1996).

Johansson (2005) afirmou que alguns artigos e patentes relacionados à melhoria da durabilidade e estabilidade dimensional da madeira utilizando apenas calor foram apresentados entre as décadas de 1940 e 1950, contudo, nenhum desses métodos resultou em um avanço comercial. No entanto, a partir da década de 1970 a investigação e utilização de diferentes técnicas comerciais de modificação térmica da madeira serrada ganhou força na Europa.

Estas técnicas e suas características principais estão resumidas no Quadro 1, onde pode-se observar que as características adotadas em cada processo são distintas, variando-se as faixas



de temperatura (80 a 220°C), duração (4 horas a mais de 2 semanas), pressão (atmosférica, vácuo, super atmosférica, 0,5 - 0,6 MPa), tipo de atmosfera utilizadas (vapor, vapor e ar aquecido, nitrogênio ou outro gás, óleos vegetais e vácuo).

Quadro 1 - Processos de modificação térmica e suas condições de processamento

| <i>Processo</i>                                | <i>Ano Ap.</i> | <i>Marcas registradas</i>                                                         | <i>Umid. Inic. (%)</i> | <i>Temp. (°C)</i>                  | <i>Duração processo (h)</i>                   | <i>Pressão (MPa)</i>             | <i>Atmosfera</i>                  | <i>Comentários</i>                                                                                             |
|------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>FDW</i>                                     | <i>1970</i>    | -                                                                                 | <i>10-30</i>           | <i>120-180</i>                     | <i>~15</i>                                    | <i>0.5-0.6</i>                   | <i>Vapor</i>                      | <i>Sistema fechado</i>                                                                                         |
| <i>Plato</i>                                   | <i>1980</i>    | <i>PlatoWood</i>                                                                  | <i>14-18</i>           | <i>15-180/<br/>170-190</i>         | <i>4-5/<br/>70-120<br/>Acima de 2 semanas</i> | <i>Pressão super atmosférica</i> | <i>Vapor saturado/ar aquecido</i> | <i>Processo de quatro etapas</i>                                                                               |
| <i>Thermo Wood</i>                             | <i>1990</i>    | <i>ThermoWood</i>                                                                 | <i>10 a verde</i>      | <i>130/<br/>185-215/<br/>80-90</i> | <i>30-70</i>                                  | <i>Atmosférica</i>               | <i>Vapor</i>                      | <i>Fluxo de vapor contínuo através da madeira em processamento que remove produtos de degradação voláteis</i>  |
| <i>Le Bois Perdure</i>                         | <i>1990</i>    | <i>Perdure</i>                                                                    | <i>Verde</i>           | <i>200-230</i>                     | <i>12-36</i>                                  | <i>Atmosférica</i>               | <i>Vapor</i>                      | <i>O processo envolve a secagem e aquecimento da madeira em vapor</i>                                          |
| <i>Retificação</i>                             | <i>1998</i>    | <i>Ratiwood<br/>Bois Rétiifié<br/>Réti<br/>Retibois<br/>Retitech<br/>Retifier</i> | <i>~12</i>             | <i>160-240</i>                     | <i>8-24</i>                                   | -                                | <i>Nitrogênio ou outro gás</i>    | <i>A atmosfera de nitrogênio garante um teor máximo de oxigênio de 2%</i>                                      |
| <i>OHT</i>                                     | <i>2000</i>    | <i>OHT</i>                                                                        | <i>10 a verde</i>      | <i>180-220</i>                     | <i>24-36</i>                                  | -                                | <i>Óleo vegetal</i>               | <i>Sistema fechado</i>                                                                                         |
| <i>TERMOVUOTO (thermo-vacuum treated wood)</i> | <i>2010</i>    | <i>VacWood</i>                                                                    | <i>0%</i>              | <i>160-220</i>                     | <i>Acima de 25</i>                            | <i>Vácuo 150-350 mbar</i>        | <i>Vácuo</i>                      | <i>Sistema fechado, secagem inicial a baixa temperatura a partir do teor de umidade inicial no cilindro TV</i> |

Fonte: Adaptado de Sandberg; Kutnar; Mantanis (2017).

Um grupo emergente de tratamentos de madeira envolve o uso combinado de temperatura e umidade através de processos termo-hidro e termo-hidromecânicos. Em uma definição ortodoxa, nenhum aditivo é usado nos processos além da água em combinação com

madeira, calor e forças externas para moldar a madeira. Procedimentos incluindo impregnação ou colagem são, no entanto, geralmente incluídos nesses processos de modificação (SANDBERG *et al.*, 2017).

Desta forma, pode-se observar potencial favorável da modificação térmica em alternativa aos tratamentos preservativos convencionais da madeira, visto que se consiste em um processo de baixo custo, que tem evoluído ao longo dos anos apresentando bons resultados e que possui vantagens ambientais.

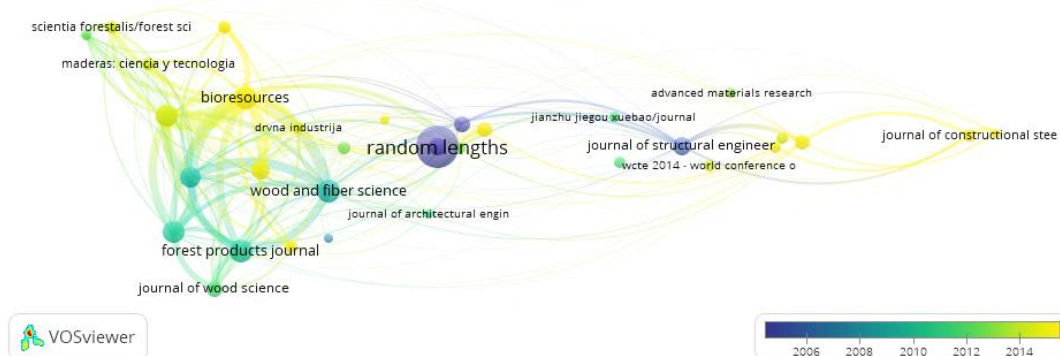
No entanto, apesar de a literatura relatar diversos estudos com resultados favoráveis à aplicação de tratamento térmico para madeira maciça, se comparados, poucos foram desenvolvidos sobre o tratamento térmico, tanto para pré como pós-tratamento, de painéis OSB para uso estrutural, indicando a necessidade de novas pesquisas que garantam sua efetividade (MENDES *et al.*, 2013a, 2013b)

## 2.6 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Esta seção contém os principais resultados bibliométricos extraídos do banco de dados Scopus e as redes criadas usando o visualizador do Sistema Operacional Virtual (VOS). Na busca inicial pela palavra-chave “*Oriented Strand Board*”, foram encontrados 1.030 artigos.

A Figura 4 expressa a rede distribuição das fontes dos documentos encontrados utilizando como filtro um número mínimo de 5 documentos por fonte, com um mínimo de 0 citações. Na Figura 4 a cor amarela expressa os documentos mais recentes e roxa, as publicações mais antigas. O tamanho dos círculos ilustra a fração da quantidade de trabalhos por fonte. Assim, das 340 fontes encontradas, 38 atingiram os critérios de busca estabelecidos.

Figura 4 - Fontes de documentos para a palavra-chave "*Oriented Strand Board*"



Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022).

Random Lengths foi a fonte com maior número de documentos encontrada, porém esta fonte integrou a base de dados da Scopus apenas no período entre os anos 1998 e 2000 e 2005

a 2007, sendo após isto a sua participação descontinuada na Scopus. Recentemente, durante os últimos 10 anos (período de 2010 a 2020) a fonte com maior número de documentos relacionados com a palavra-chave “*Oriented Strand Board*” foi a BioResources.

De acordo com a Scopus as 5 principais áreas de documentos encontrados são: Ciência de Materiais com 461 documentos e representando 23,5% do total de documentos, seguida por Engenharia (21,7%), Ciências Agrárias e Biológicas (14,9%), Engenharia Química (12,8%) e Negócios e Gestão (8,7%).

A Tabela 1 contém os quinze principais resultados para a palavra-chave “*Oriented Strand Board*” de acordo com a base de dados Scopus, por fonte, país e afiliação nas últimas 2 décadas (2000 a 2020).

Tabela 1 - Classificação: principais resultados para “*Oriented Strand Board*”

| R  | Fonte                                                | País                  | Afiliação                                           |
|----|------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| 1  | Random Lengths (114)                                 | Estados Unidos (285)  | Oregon State University (33)                        |
| 2  | Bioresources (33)                                    | Canada (130)          | The University of British Columbia (27)             |
| 3  | Forest Products Journal (33)                         | China (86)            | FPInnovations, Canada (21)                          |
| 4  | Wood and Fiber Science (31)                          | Brasil (49)           | Mississippi State University (18)                   |
| 5  | European Journal of Wood And Wood Products (27)      | Alemanha (44)         | Johns Hopkins University (17)                       |
| 6  | Holzforschung (27)                                   | Reino Unido (43)      | USDA Forest Products Laboratory (17)                |
| 7  | Wood Science and Technology (25)                     | Japão (40)            | Universidade de São Paulo - USP (16)                |
| 8  | Journal of Structural Engineering (20)               | Turquia (38)          | Nanjing Forestry University (16)                    |
| 9  | Wood Research (19)                                   | Austria (20)          | USDA Forest Service (15)                            |
| 10 | Pulp and Paper Week (18)                             | Republica Tcheca (20) | National Research Council Canada (15)               |
| 11 | Wood Markets Newsletter (17)                         | França (20)           | Universidade Federal de Lavras (14)                 |
| 12 | Journal of Wood Science (16)                         | Coreia do Sul (20)    | National Institute of Standards and Technology (14) |
| 13 | Holz Als Roh Und Werkstoff (15)                      | Australia (19)        | University of New Brunswick (13)                    |
| 14 | Holz Kurier (14)                                     | Polonia (16)          | Washington State University Pullman (13)            |
| 15 | Journal of Structural Engineering United States (14) | Indonesia (14)        | Forintek Canada Corporation (13)                    |

Por fonte, país e afiliação. Sendo: R = Ranking de acordo com o total de artigos. (\*) = Quantidade de documentos.

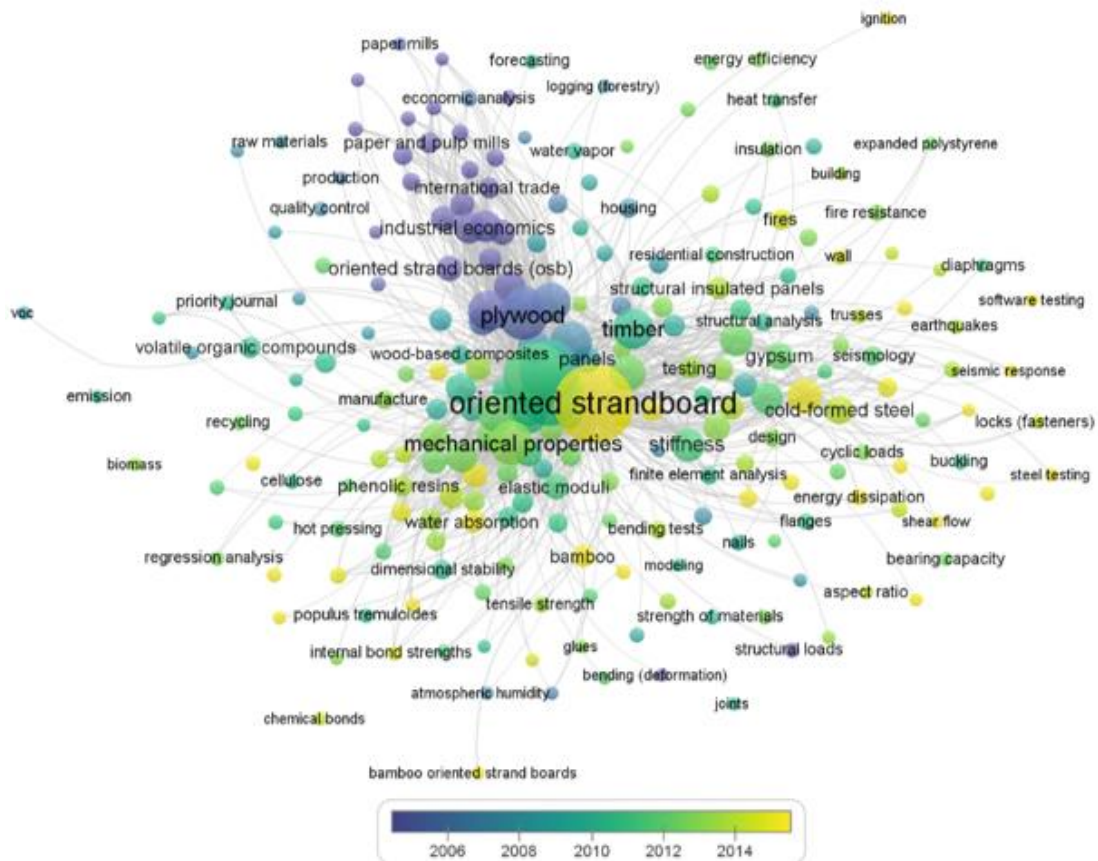
Fonte: Adaptado de Sugahara et al. (2022).

Assim, para a área de pesquisa de painéis do tipo *Oriented Strand Board*, o país com maior quantidade de documentos foram os Estados Unidos, seguido por Canadá, China, Brasil e Alemanha. A fonte com o maior número de documentos foi Random Lengths, precedendo Bioresources, Forest Products Journal, Wood and Fiber Science e European Journal of Wood

and Wood Products. Por fim, a Instituição com o maior número de documentos foi a Oregon State University, seguida pela University of British Columbia, FPInnovations, Mississippi State University e a Johns Hopkins University.

A rede das palavras-chave mais ocorrentes obtida dos periódicos selecionados relacionados à palavra-chave "*Oriented Strand Board*" é mostrada na Figura 5, onde a cor amarela expressa os documentos mais recentes e roxa, as publicações mais antigas. Foi adotado como filtro um número mínimo de 10 ocorrências de palavras-chave. Portanto, das 6.749 palavras-chave, 233 atenderam aos critérios. O tamanho dos círculos ilustra a fração da quantidade de ocorrências da palavra-chave.

Figura 5 - Co-ocorrência de todas as palavras-chave das publicações



Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022).

A Tabela 2 contém a classificação das quinze principais palavras-chave relacionadas com a palavra-chave pesquisada "*Oriented Strand Board*". Outras palavras-chave importantes encontradas são "*shear walls*" com 57 ocorrências, "*resins*" (55), "*composites*" (54), "*panels*" (40) e "*physical and mechanical properties*" (36).

Tabela 2 - Principais palavras-chave relacionadas com "Oriented Strand Board"

| <b>R</b> | <b>Palavra-chave</b>          | <b>Ocorrências</b> |
|----------|-------------------------------|--------------------|
| 1        | Oriented strandboard          | 371                |
| 2        | Wood products                 | 256                |
| 3        | <i>Oriented Strand Boards</i> | 208                |
| 4        | Wood                          | 208                |
| 5        | Plywood                       | 137                |
| 6        | <i>Oriented Strand Board</i>  | 105                |
| 7        | Mechanical properties         | 105                |
| 8        | Structural panels             | 103                |
| 9        | Timber                        | 95                 |
| 10       | Particle board                | 93                 |
| 11       | Lumber                        | 85                 |
| 12       | Building Materials            | 76                 |
| 13       | Studs (structural members)    | 66                 |
| 14       | Plywood                       | 65                 |
| 15       | Stiffness                     | 59                 |

Sendo: R = Ranking de acordo com o total de ocorrências.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022).

Em seguida, foi realizada uma nova busca combinada, substituindo a palavra-chave “Oriented Strand Board” pela sua sigla: “OSB” e correlacionando com as palavras-chave mais comuns encontradas para o processo de tratamento térmico para modificação de madeira, tais como: “*Thermal modification*”; “*Thermally modified*”; “*Thermally treated*” e “*Thermal treatment*”. Isso foi feito para refinar a busca e filtrar os trabalhos de acordo com o tema de interesse, e retornou os seguintes valores para cada correlação de palavras-chave pesquisadas, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Número total de documentos encontrados

| <b>Palavra-chave (*)</b>        | <b>País (*)</b> | <b>Afiliação (*)</b>                     |
|---------------------------------|-----------------|------------------------------------------|
| Oriented Strand Board (1030)    | USA (285)       | Oregon State University (33)             |
| OSB e Heat treatment (31)       | USA (9)         | Universidade de Brasília (6)             |
| OSB e Thermal modification (11) | Alemanha (5)    | Institute of Wood Technology Dresden (2) |
| OSB e Thermal treatment (33)    | Brasil (12)     | Universidade de Brasília (7)             |
| OSB e Thermally modified (8)    | Alemanha (3)    | Universidade de Brasília (2)             |
| OSB e Thermally treated (13)    | Brasil (7)      | Universidade de Brasília (5)             |

Sendo: (\*) = Número de documentos por país e afiliação com o maior número de publicações obtidos nos resultados da pesquisa usando a respectiva palavra-chave.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022).

O país com maior número de resultados combinados da busca com associação das palavras-chave foi o Brasil (12) e a Universidade de Brasília (20) foi a Instituição com maior número de trabalhos publicados nesta área de estudo.

Destaca-se que o Brasil surge com maior número de resultados possivelmente por ser um país tropical com elevada incidência de ataque de xilófagos na madeira e derivados da madeira, sendo necessária a realização de estudos no país visando aplicação da madeira na construção civil e indústria moveleira de modo a garantir maior segurança, durabilidade e qualidade. A Tabela 4 contém a classificação das quinze principais palavras-chave relacionadas à pesquisa combinada de todos os termos.

Tabela 4 - Palavras-chave para a pesquisa combinada

| R  | OSB e Heat treatment (*)          | OSB e Thermal modification (*)    | OSB e Thermal treatment (*)       | OSB e Thermally modified (*)      | OSB e Thermally treated (*)       |
|----|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1  | Heat treatment (12)               | Thermal modification (7)          | Oriented strandboard (11)         | Heat treatment (5)                | Heat treatment (7)                |
| 2  | Oriented strandboard (8)          | Dimensional stability (4)         | Heat treatment (10)               | Equilibrium moisture contents (4) | Thermal treatment (6)             |
| 3  | Dimensional stability (7)         | Equilibrium moisture contents (4) | Dimensional stability (7)         | Thickness swelling (4)            | Dimensional stability (5)         |
| 4  | Mechanical properties (6)         | Heat treatment (4)                | Thermal treatment (7)             | Oriented Strand Boards (3)        | OSB panels (5)                    |
| 5  | Oriented Strand Boards (5)        | Oriented Strand Boards (4)        | Oriented Strand Boards (6)        | Thermal modification (3)          | Thermal modification (5)          |
| 6  | Thermal treatment (5)             | Water absorption (4)              | Thermal modification (6)          | Wood (3)                          | Thickness swelling (5)            |
| 7  | Thickness swelling (5)            | Oriented strandboard (3)          | Wood (6)                          | Wood products (3)                 | Oriented Strand Boards (4)        |
| 8  | Water absorption (5)              | Thickness swelling (3)            | OSB (5)                           | Biodegradation (2)                | Oriented strandboard (4)          |
| 9  | Wood (5)                          | Wood products (3)                 | OSB panels (5)                    | Dimensional stability (2)         | Wood (4)                          |
| 10 | OSB panels (4)                    | Chemical modification (2)         | Thickness swelling (5)            | Fungi (2)                         | Equilibrium moisture contents (3) |
| 11 | Thermal modification (4)          | Internal bond strengths (2)       | Water absorption (5)              | Internal bond strengths (2)       | Mechanical properties (3)         |
| 12 | Bending strength (3)              | Mechanical properties (2)         | Wood products (5)                 | Mechanical properties (2)         | Wood products (3)                 |
| 13 | Equilibrium moisture contents (3) | Modulus of rupture (2)            | Equilibrium moisture contents (4) | Moisture (2)                      | Biodegradation (2)                |
| 14 | Fungi (3)                         | Moisture (2)                      | Mechanical properties (4)         | Oriented Strand Board (2)         | Forestry (2)                      |
| 15 | Laminated veneer lumber (3)       | Moisture determination (2)        | Adhesives (3)                     | Thermal treatment (2)             | Fungi (2)                         |

Sendo: R = Ranking de acordo com o total de ocorrências. (\*) = Número de ocorrências da palavra-chave.

Fonte: Adaptado de Sugahara et al. (2022).

Apenas as palavras “*Dimensional stability*”, “*Equilibrium moisture contents*”, “*Heat treatment*”, “*Mechanical properties*”, “*Oriented Strand Boards*”, “*Thermal modification*” e “*Thickness swelling*” aparecem para todos os termos pesquisados, demonstrando serem os termos mais utilizados para este campo de estudo.

As palavras “*Oriented strandboard*”, “*Thermal treatment*”, “*Wood*” e “*Wood products*” aparecem para quatro dos cinco termos pesquisados e as palavras “*Fungi*”, “*OSB panels*”, “*Water absorption*” aparecem para três dos cinco termos pesquisados e as outras palavras aparecem para apenas dois ou um dos termos pesquisados.

Após a busca, foram pré-selecionados artigos que estudaram temas relacionados a tratamento térmico de painéis OSB, excluindo documentos fora deste assunto. A seleção foi feita por meio da leitura do título, palavras-chave e resumo dos estudos. O resumo da quantidade de documentos encontrados para cada pesquisa é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Número de documentos selecionados na pesquisa combinada

| <b>Palavra-chave</b>         | <b>Total de ocorrências (*)</b> | <b>Documentos selecionados (*)</b> |
|------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| OSB and Heat treatment       | 31                              | 15                                 |
| OSB and Thermal modification | 11                              | 6                                  |
| OSB and Thermal treatment    | 33                              | 18                                 |
| OSB and Thermally modified   | 8                               | 6                                  |
| OSB and Thermally treated    | 13                              | 12                                 |

Sendo: (\*) = Quantidade de documentos.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022).

Alguns dos artigos pré-selecionados se repetiram nos resultados de pesquisa de diferentes palavras-chave. Assim, os trabalhos repetidos foram excluídos e apenas 20 trabalhos foram selecionados no total. Porém, entre esses artigos, quatro trabalharam com modificação térmica de *strands* e não modificação térmica de painéis, como o estudo de Paul *et al.* (2006) que usaram duas temperaturas diferentes de processo de tratamento térmico nos *strands* de madeira antes da prensagem a quente do OSB. Paul; Ohlmeyer e Leithoff (2007) estudaram a influência da temperatura da modificação térmica dos *strands* de madeira na perda de peso, teor de umidade de equilíbrio e resistência a fungos dos *strands* de OSB.

Pipíška *et al.* (2020) analisaram os efeitos das modificações dos *strands* (acetilados usando anidrido acético ou modificados termicamente a 180°C usando pressão atmosférica e ambiente de vapor superaquecido) nas propriedades físicas e mecânicas do OSB. Mendes *et al.* (2013c) relacionaram o efeito do pré-tratamento térmico em *strands* com o efeito de variáveis de produção nas propriedades físico-mecânicas dos painéis de OSB, visando melhorar sua estabilidade dimensional.

Assim, apenas os 16 artigos que realmente utilizaram algum tipo de (pós) tratamento térmico em painéis OSB estão listadas na Tabela 6. Para análise dos trabalhos foram utilizadas as Métricas Scopus, sendo os resultados organizados por número total de vezes que cada documento foi citado no Scopus, incluindo todas as citações (SC), a Citação *benchmarking* que mostra percentil de como as citações recebidas por este documento se comparam com a média de documentos semelhantes (P) e o *Field-Weighted Citation Impact* (FWC) que mostra quão bem este documento foi citado quando comparado a documentos semelhantes, onde um valor maior que 1,00 significa que o documento foi mais citado do que o esperado.

Tabela 6 - Métricas Scopus

| Ano  | Autor/(es)                            | Título                                                                                                                                                      | Revista                                           | (continua) |      |      |
|------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------|------|------|
|      |                                       |                                                                                                                                                             |                                                   | SC         | FWC  | P    |
| 2006 | Del Menezzi e Tomaselli               | Contact thermal post-treatment of oriented strandboard to improve dimensional stability: A preliminary study                                                | Holz als Roh- und Werkstoff                       | 58         | 3.39 | 93th |
| 2007 | Okino, Teixeira e Del Menezzi         | Post-thermal treatment of oriented strandboard (OSB) made from Cypress ( <i>Cupressus glauca</i> Lam.)                                                      | Maderas: Ciencia y Tecnologia                     | 39         | 8.73 | 98th |
| 2007 | Del Menezzi, Tomaselli e de Souza     | Non-destructive evaluation of thermally modified OSB: part 1- effect of the thermal treatment on the stress wave velocity                                   | Scientia Forestalis                               | 14         | 0.92 | 70th |
| 2008 | Del Menezzi e de Souza, <i>et al.</i> | Properties after weathering and decay resistance of a thermally modified wood structural board                                                              | International Biodeterioration and Biodegradation | 26         | 0.62 | 61th |
| 2008 | Del Menezzi e Ribeiro, <i>et al.</i>  | Effect of thermal post-treatment on some surface-related properties of oriented strandboards                                                                | Drvna Industrija                                  | 3          | 0.0  | 36th |
| 2009 | Del Menezzi <i>et al.</i>             | Thermal modification of consolidated oriented strandboards: Effects on dimensional stability, mechanical properties, chemical composition and surface color | European Journal of Wood and Wood Products        | 39         | 1.18 | 75th |
| 2009 | Santos <i>et al.</i>                  | Effect of the thermal treatment on the glue-line shear strength of OSB Panels                                                                               | Scientia Forestalis                               | 2          | 0.0  | 35th |



Tabela 6 - Métricas Scopus

| Ano  | Autor/(es)                                        | Título                                                                                                   | Revista                                    | (conclusão) |      |      |
|------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------|------|------|
|      |                                                   |                                                                                                          |                                            | SC          | FWC  | P    |
| 2010 | Unsal <i>et al.</i>                               | Effects of thermal modification on surface characteristics of OSB panels                                 | Wood Research                              | 12          | 0.69 | 63th |
| 2010 | Sinha, Gupta e Nairn                              | Effect of heat on the mechanical properties of wood and wood composites                                  | WCTE 2010                                  | 0           | 0.0  | 35th |
| 2013 | Mendes e Júnior, <i>et al.</i>                    | Effect of thermal treatment on properties of OSB panels                                                  | Wood Science and Technology                | 32          | 2.44 | 90th |
| 2013 | Mendes, Bortoletto Júnior e Garlet, <i>et al.</i> | Decay fungi resistance in thermally treated OSB panels                                                   | Cerne                                      | 3           | 0.0  | 33th |
| 2014 | Bonigut, Krug e Stuckenberg                       | Dimensional stability and irreversible thickness swell of thermally treated oriented strandboards (OSB)  | European Journal of Wood and Wood Products | 5           | 0.42 | 51th |
| 2014 | Aro <i>et al.</i>                                 | Mechanical and physical properties of thermally modified plywood and <i>Oriented Strand Board</i> panels | Forest Products Journal                    | 16          | 0.36 | 48th |
| 2018 | Cetera <i>et al.</i>                              | Physico-mechanical properties of thermally treated poplar OSB                                            | Forests                                    | 4           | 1.26 | 76th |
| 2018 | Direske <i>et al.</i>                             | Effects of MDI content on properties of thermally treated <i>Oriented Strand Board</i> (OSB)             | European Journal of Wood and Wood Products | 4           | *    | *    |
| 2019 | Silva <i>et al.</i>                               | Production and characterization of heat treated OSB made of <i>pinus taeda</i>                           | Acta Scientiarum - Technology              | 0           | *    | *    |

Sendo: \*= Data não informada; SC= Citações na Scopus; C/Y= Citações por ano; FWC= Field-Weighted Citation Impact; P=Percentil.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022).

Em relação ao ano de publicação, entre 2000 e 2010 foram publicados 9 artigos, enquanto entre 2010 e 2020 foram publicados 7. Os anos 2007, 2008, 2009, 2010, 2013, 2014 e 2019 tiveram todos 2 publicações cada um.

A pessoa com maior número de artigos como primeiro autor foi Del Menezzi com 5 trabalhos, entre eles: Del Menezzi e Tomaselli (2006), Del Menezzi, Tomaselli e de Souza (2007), Del Menezzi *et al.* (2008a), Del Menezzi *et al.* (2008b) e Del Menezzi *et al.* (2009).

A fonte com mais publicações é European Journal of Wood and Wood Products com três publicações sendo elas Del Menezzi *et al.* (2009); Bonigut; Krug; Stuckenberg (2014); e Direske *et al.* (2018), seguida por Scientia Forestalis com duas publicações: Del Menezzi, Tomaselli e de Souza (2007); e Santos *et al.* (2009).

Os três principais documentos mais citados foram: Del Menezzi e Tomaselli (2006), publicado no Journal Holz als Roh- und Werkstoff com 58 citações, seguido de Okino; Teixeira e Del Menezzi (2007) publicado em Maderas: Ciencia y Tecnologia e Del Menezzi *et al.* (2009) publicado no European Journal of Wood and Wood Products com 39 citações.

Foi encontrada a mesma ordem classificatória tanto para os documentos com maior FWC como Percentil, sendo o primeiro lugar de Okino; Teixeira e Del Menezzi (2007) com FWC 8,73 e P 98th, seguido por Del Menezzi e Tomaselli (2006) com FWC 3,39 e P 93th, e Mendes *et al.* (2013c) com FWC 2,44 e P 90th, este último trabalho publicado no Wood Science and Technology Journal.

## 2.7 REVISÃO SISTEMÁTICA

Esta seção apresenta uma revisão sistemática dos estudos selecionados que envolveram diferentes tipos de tratamento térmico em painéis OSB. O resumo detalhado dos artigos selecionados com seus autores, características de produção do painel, metodologia de tratamento térmico e as principais descobertas são mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 - Resumo dos trabalhos

(continua)

| <b>Trabalho</b>                | <b>Características de produção dos painéis</b>                                                                                                                                                                                                        | <b>Metodologia do tratamento térmico</b>                                                                                                                                     | <b>Principais descobertas dos autores</b>                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Del Menezzi e Tomaselli (2006) | OSB experimental. Pinus taeda com 8% de resina fenólica, sem parafina. Densidade nominal de 0,8 g/cm <sup>3</sup> . Espessura: 12,5mm. Camada única. Condições de prensagem a quente: 190 °C por 8 minutos com 60s de fechamento da prensa, a 3.2MPa. | Aquecimento em prensa de laboratório a 250 °C por 4, 7 e 10 minutos. Pressão aplicada de 0,17 kPa para fornecer o contato entre a placa de prensa e a superfície da amostra. | Quanto mais longos os tempos de processo, maior a redução do inchamento em espessura, teor de umidade de equilíbrio, absorção de água e densidade do OSB. A perda de peso foi inversamente proporcional às propriedades de inchamento e umidade. |

Quadro 2 - Resumo dos trabalhos

(continuação)

| <b>Trabalho</b>                    | <b>Características de produção dos painéis</b>                                                                                                                                                                                                                           | <b>Metodologia do tratamento térmico</b>                                                                                                                                                                | <b>Principais descobertas dos autores</b>                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Okino et al. (2007)</i>         | OSB experimental confeccionado com <i>Cupressus glauca</i> Lam, com 5 e 8% de resina ureia-formaldeído sem parafina e cloreto de amônio a 5% como catalisador. Espessura: 13mm. Três camadas. Condições de prensagem a quente: 175°C e 4,0 MPa de pressão por 8 minutos. | Tratados termicamente a 190°C por 12 minutos em prensa a quente de abertura única com pressão aplicada apenas para fornecer contato.                                                                    | Melhoria nas propriedades associadas à estabilidade dimensional e durabilidade contra fungos. As propriedades mecânicas não foram afetadas (dureza Janka carga máxima, adesão interna, módulo de ruptura, tensão paralela no limite proporcional e arrancamento de parafuso).                                    |
| <i>Del Menezzi, et al. (2007)</i>  | OSB comercial. <i>Pinus sp.</i> , Densidade nominal de 0,64 g/cm <sup>3</sup> , Espessura: 12,5mm. Três camadas. Resina fenol-formaldeído (camadas superficiais) e resina MDI (núcleo), parafina e inseticida.                                                           | Prensa laboratorial de abertura única. Dois níveis de temperatura (190 e 220 °C) e três diferentes tempos de prensagem (12, 16 e 20 minutos).                                                           | O tratamento térmico alterou as propriedades acústicas, reduziu a higroscopicidade e impôs a perda de massa nos painéis OSB. Temperaturas mais altas e tratamentos mais longos resultaram em mudanças mais frequentes tanto na velocidade de propagação da onda quanto no módulo de elasticidade dinâmico.       |
| <i>Del Menezzi, et al. (2008a)</i> | OSB comercial. <i>Pinus sp.</i> , Densidade nominal de 0,64 g/cm <sup>3</sup> , Espessura: 12,5mm. Três camadas. Resina de fenol-formaldeído (camadas superficiais) e resina MDI (núcleo), parafina.                                                                     | Pressão e calor foram aplicados, mas sem um alto nível de tensão de compressão (<17 kPa) em uma prensa laboratorial de abertura única. Temperatura de 190 a 220 °C e três tempos (12, 16 e 20 minutos). | O pós-tratamento térmico aumentou a resistência a fungos apodrecedores e intempéries. A propriedade mecânica altamente alterada foi a adesão interna e a menor foi o módulo de ruptura. No geral, a temperatura elevada em um tempo de tratamento mais longo resultou em melhores propriedades.                  |
| <i>Del Menezzi, et al. (2008b)</i> | OSB comercial. <i>Pinus sp.</i> , Densidade nominal de 0,64 g/cm <sup>3</sup> , Espessura: 12,5 mm. Três camadas. Resina de fenol-formaldeído (camadas superficiais) e resina MDI (núcleo).                                                                              | Prensa laboratorial. Dois níveis de temperatura (190 e 220 °C) e três tempos (12, 16 e 20 minutos).                                                                                                     | O tratamento térmico aumentou significativamente a estabilidade dimensional e melhorou a capacidade de prender os pregos e a rugosidade da superfície do OSB tratado. A temperatura foi o fator mais importante no controle das mudanças nas propriedades, enquanto o tempo de tratamento teve menor influência. |
| <i>Del Menezzi et al. (2009)</i>   | OSB comercial. <i>Pinus taeda</i> , densidade nominal de 0,64 g/cm <sup>3</sup> , Espessura: 12,7mm. Resina fenol-formaldeído (camadas superficiais) e resina MDI (núcleo), parafina e inseticida.                                                                       | Prensa laboratorial de abertura única com pressão aplicada <20 kPa. Dois níveis de temperatura (190 e 220 °C) e três tempos (12, 16 e 20 minutos).                                                      | Melhoria significativa da estabilidade dimensional. Pequena redução apenas no módulo de ruptura sem qualquer desvantagem em outras propriedades mecânicas. Sem alterações na densidade. O OSB ficou mais escuro, mais vermelho e perdeu o amarelo.                                                               |

Quadro 2 - Resumo dos trabalhos

(continuação)

| Trabalho                    | Características de produção dos painéis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Metodologia do tratamento térmico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Principais descobertas dos autores                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Santos et al. (2009)        | OSB comercial. <i>Pinus</i> sp., Densidade nominal de 0,64 g/cm <sup>3</sup> , Espessura: 12,5 mm. Três camadas. Resina de fenol-formaldeído (camadas superficiais) e resina MDI (núcleo).                                                                                                                                                                | Prensa laboratorial de abertura única com pressão aplicada de 17 kPa. Dois níveis de temperatura (190 e 220 °C) e três tempos (12, 16 e 20 minutos).                                                                                                                                                                                                              | O tratamento térmico reduziu ligeiramente a resistência da linha de cola de painel OSB. No entanto, o processo de lixamento eliminou esse efeito, além de aumentar a resistência ao cisalhamento da linha de cola para painel OSB em até 15%. Assim, os autores recomendam o lixamento superficial de painéis OSB tratados termicamente, como um método benéfico que melhora a qualidade da adesão. |
| Unsal et al. (2010)         | OSB comercial (fornecido por Kastamonu Integrated Wood Industry and Trade Inc. em Kocaeli, Turquia). Espessura: 12 mm.                                                                                                                                                                                                                                    | Forno controlado com sensibilidade de $\pm 1$ °C sob pressão atmosférica. Quatro níveis de temperatura (150, 170, 190 e 210 °C) e dois tempos (1 e 3 horas).                                                                                                                                                                                                      | A modificação térmica aumentou as características de rugosidade da superfície dos painéis OSB e diminuiu a molhabilidade. Os painéis de superfície mais lisa apresentaram maiores valores de ângulo de contato e essa propriedade aumentou com a temperatura e o tempo. A rugosidade e molhabilidade dos painéis OSB são uma questão importante para aplicações de pintura e revestimento.          |
| Sinha, Gupta e Nairn (2010) | OSB e outros 5 tipos de produtos à base de madeira.                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Forno convencional. Três níveis de temperatura (25, 100 e 200 °C) e dois tempos (1 e 2 horas). O forno foi pré-aquecido e quando a temperatura desejada foi atingida, as amostras foram inseridas no forno pelo período de exposição.                                                                                                                             | A exposição a altas temperaturas causou degradação da resistência. Resistência à flexão foi reduzida. O módulo de elasticidade foi afetado pela exposição à alta temperatura para compósitos à base de madeira, enquanto nenhuma redução de MOE foi observada para madeira sólida.                                                                                                                  |
| Mendes et al. (2013a)       | Strands (pré-tratamento) <i>Pinus taeda</i> L. densidade básica média de 0,47 g / cm <sup>3</sup> . OSB experimental (pós-tratamento) de <i>Pinus taeda</i> L. com 6% de adesivo fenol-formaldeído e parafina. Densidade nominal de 0,65 g/cm <sup>3</sup> . Espessura: 15,7mm. Três camadas. Condições de prensagem a quente: 453,15 K, 3,51 MPa, 8 min. | Pré-tratamento (strands): Forno elétrico laboratorial com atmosfera de nitrogênio. Iniciou-se com aquecimento do forno desde a temperatura ambiente até a temperatura desejada de 473,15 ou 513,15 K e assim, exposição por 60min. Pós-tratamento (OSB): Prensa hidráulica motorizada com baixa pressão aplicada (0,05 MPa) e temperatura de 493,15 K por 12 min. | O pré-tratamento a 513,15 K apresentou efeito mais proeminente nas propriedades do painel, resultando em aumento da estabilidade dimensional e diminuição das propriedades mecânicas. O pós-tratamento promoveu melhorias significativas na espessura, mas nenhuma variação significativa nas propriedades mecânicas.                                                                               |

Quadro 2 - Resumo dos trabalhos

(continuação)

| Trabalho                            | Características de produção dos painéis                                                                                                                                                                                                                                               | Metodologia do tratamento térmico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Principais descobertas dos autores                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mendes et al. (2013b)               | Strands (pré-tratamento) <i>Pinus taeda</i> L. densidade básica média de 0,473 g/cm <sup>3</sup> . OSB experimental (pós-tratamento). <i>Pinus taeda</i> L. com 6 ou 8% de adesivo de fenol-formaldeído e com ou sem cera. Três camadas. Densidade nominal de 0,65g/cm <sup>3</sup> . | Pré-tratamento (strands): Forno elétrico laboratorial. Atmosfera de nitrogênio. Temperaturas de 200 e 240°C, 60min. Pós-tratamento (OSB): Prensa hidráulica motorizada com baixa pressão aplicada (0,05 MPa), 220°C por 12min.                                                                                                                                                                                                                       | O pré-tratamento térmico a 240 °C apresentou potencial para inibir o ataque de fungos, sendo esse resultado devido às alterações químicas sofridas pela madeira. O pós-tratamento térmico não proporcionou melhora significativa na resistência biológica dos painéis OSB. A aplicação de parafina teve um efeito negativo na resistência dos painéis.                                                                                                                                   |
| Bonigut, Krug e Stuckenberg, (2014) | OSB experimental. Fabricado em <i>Pinus Sylvestris</i> . Densidade aparente de 0,62 - 0,63 g/cm <sup>3</sup> . 3, 4 e 5% de adesivo MDI e parafina. Espessura: 15 mm. Prensagem a 190 °C.                                                                                             | Câmara de tratamento térmico com método de "sandwich stacking" usando duas placas de alumínio entre os painéis. Dois níveis de temperatura (160 e 165 °C).                                                                                                                                                                                                                                                                                           | O tratamento térmico levou a uma redução do inchamento em espessura e do inchamento de espessura irreversível e este potencial de todas as variantes não foi totalmente esgotado após a imersão em água por 24 h. Os efeitos afetados pelas temperaturas máximas de tratamento para todas as propriedades foram melhores do que os produzidos pela diminuição da dosagem do agente hidrofóbico                                                                                           |
| Aro et al. (2014)                   | OSB experimental produzido a partir de uma mistura de espécies e adesivo MDI. Espessura: 11 mm.                                                                                                                                                                                       | Modificação térmica em forno a 140, 150, 160, 170 e 180 °C usando madeira entre os painéis para permitir uma transferência de calor e fluxo de ar mais eficazes. Uma folha de cobertura foi colocada no topo da pilha de painéis para proteger os painéis de borrifos de água. A pressão absoluta do vapor dentro do forno foi reduzida para 0,1 bar a 45 °C, e após a temperatura foi aumentada para a temperatura máxima e mantida por 60 minutos. | O inchamento em espessura de todos os tipos de painel aumentou substancialmente em temperaturas de tratamento mais altas. A força de fixação do parafuso de todos os painéis mostrou ser mais negativamente influenciada pelo aumento das temperaturas do que a força de fixação do prego. As propriedades mecânicas do OSB diminuíram com o aumento da temperatura, no entanto, o módulo de elasticidade e a adesão interna do OSB não se alteraram em um grau tão alto a 160 e 180 °C. |
| Cetera et al. (2018)                | OSB Comercial de Poplar. Densidade nominal de 0,59 g/cm <sup>3</sup> , Espessura: 15 mm.                                                                                                                                                                                              | Processo Termovuoto®, em um reator cilíndrico aquecido através de óleo diatérmico onde o calor é transferido por convecção e o vácuo é aplicado para redução do teor de oxigênio, eliminando compostos voláteis e vapor d'água. Temperatura de 190 °C por 2h.                                                                                                                                                                                        | Reduções significativas no inchamento, associadas à diminuição nas propriedades mecânicas. A cor escureceu e o comportamento hidrofóbico aumentou, enquanto o teste de intemperismo acelerado aumentou a molhabilidade.                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Quadro 2 - Resumo dos trabalhos

(conclusão)

| <b>Trabalho</b>       | <b>Características de produção dos painéis</b>                                                                                                                                                                               | <b>Metodologia do tratamento térmico</b>                                                                                                                                                                    | <b>Principais descobertas dos autores</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Direske et al. (2018) | OSB experimental de <i>Pinus sylvestris</i> L. Uma camada. 3, 4 e 5% de adesivo MDI. Espessura: 15 mm. Prensagem a 190 °C.                                                                                                   | Método "Sandwich stacking" em um forno térmico em escala de planta piloto sob pressão atmosférica (sistema aberto) e introdução de vapor saturado, usando duas temperaturas, 160 e 175 °C e duração de 4 h. | Diminuições significativas da resistência mecânica (módulo de ruptura, ligação interna) foram encontradas, especialmente a 175 °C. No entanto, sem alterações significativas para o módulo de elasticidade. O aumento do conteúdo de adesivo diminuiu a degradação mecânica resultante do tratamento térmico. Assim, podem ser produzidos OSB com propriedades físicas melhoradas (inchamento, higroscopicidade, absorção de água, encolhimento) sem diminuir as propriedades mecânicas. |
| Silva et al. (2019)   | OSB experimental. <i>Pinus taeda</i> com 8% de resina de fenol-formaldeído. Três camadas. Espessura: 15mm. Condições de prensagem a quente: 180°C e 540s de tempo de prensagem com dois alívios de pressão total após 3 min. | Pré-tratamento (strands) a 160 e 180 °C e Pós-tratamento (OSB) a 160, 180 e 200 °C por 3600s, sem reposição da atmosfera a 1 atm de pressão.                                                                | O tratamento térmico dos strands reduziu o desempenho físico e mecânico dos painéis. Os tratamentos térmicos não alteraram a densidade dos painéis. As propriedades mecânicas não apresentaram diferença estatística em relação ao controle. Assim, como afirmam os autores, o método é empregado de forma mais eficiente em painéis acabados.                                                                                                                                           |

Fonte: Adaptado de Sugahara et al. (2022).

Nessa pesquisa foram encontrados e selecionados artigos envolvendo diferentes tipos de tratamento térmico, efetuado com objetivo de melhorar propriedades diversas dos painéis OSB. Em seu trabalho, Del Menezzi e Tomaselli (2006) utilizaram o pós-tratamento térmico como um método para aumentar a estabilidade dimensional do OSB ao diminuir a higroscopicidade da madeira e liberar o estresse de prensagem a quente. Okino; Teixeira e Del Menezzi (2007) verificaram as propriedades físicas e mecânicas dos OSB, antes e após um tratamento térmico, e avaliaram a susceptibilidade das placas ao ataque de fungos.

Del Menezzi, Tomaselli e de Souza (2007) utilizaram avaliação não destrutiva para estimar os efeitos do tratamento térmico nas propriedades acústicas de painéis OSB comerciais. Del Menezzi e de Souza et al. (2008a) aplicaram pós-tratamento térmico em dois níveis de temperatura, com três diferentes tempos de aquecimento, usando uma prensa a quente e avaliaram a resistência ao apodrecimento contra fungos em OSB comerciais Del Menezzi et al. (2008b) estudaram o efeito do tratamento térmico na capacidade de fixação de pregos e dureza superficial de OSB comerciais. Del Menezzi et al. (2009) empregaram o pós-tratamento térmico

para melhorar a estabilidade dimensional, propriedades mecânicas, composição química e cor da superfície de painéis OSB comerciais.

Santos *et al.* (2009) estudaram o efeito do tratamento térmico na resistência ao cisalhamento da linha de cola de painéis OSB e o efeito do processo de lixamento nesta resistência. Unsal *et al.* (2010) avaliaram as propriedades de molhabilidade e rugosidade da superfície dos painéis OSB após o processo de modificação térmica. Sinha, Gupta e Nairn (2010) desenvolveram um modelo baseado em regressão estatística e o utilizaram para prever a perda de resistência da madeira e dos compósitos à base de madeira em função da temperatura de exposição térmica e do tempo de exposição.

Mendes *et al.* (2013a) analisaram o efeito do tratamento térmico de *strands* (pré-tratamento) e painéis (pós-tratamento) nas propriedades físicas e mecânicas do OSB. Mendes *et al.* (2013b) verificaram o efeito do pré e pós-tratamento térmico na resistência dos painéis OSB ao ataque de fungos apodrecedores e compararam essas duas formas de tratamento térmico com algumas variáveis de produção.

Bonigut; Krug; Stuckenberg (2014) investigaram as alterações pós-tratamento térmico do OSB nas propriedades de espessura, teor de umidade de equilíbrio e dimensões. Aro *et al.* (2014) trabalharam com OSB e dois tipos de compensado que foram termicamente modificados como pós-tratamento a 140, 150, 160, 170 e 180°C. Cetera *et al.* (2018) avaliaram o efeito do *thermo-vacuum treatment* nas propriedades físico-mecânicas do OSB. Direske *et al.* (2018) discutiram a influência do conteúdo de MDI nas propriedades mecânicas de painéis OSB de camada única pós-tratados termicamente. Finalmente, Silva *et al.* (2019) produziram e avaliaram propriedades físicas e mecânicas de OSB tratados termicamente sem substituição da atmosfera por um gás inerte.

De maneira geral, verificou-se que a madeira do gênero *Pinus spp.* foi utilizada na maioria dos estudos, totalizando 11 estudos. *Poplar sp.* e *Cupressus glauca Lam.*, entre outras madeiras não identificadas pelos autores, também foram utilizadas.

A maior utilização da madeira de pinus em estudos realizados no Brasil pode ser justificada pelas características adequadas que a madeira de pinus apresenta para a produção de painéis, em termos de densidade, porosidade e, também por ser proveniente de floresta plantada.

O adesivo mais utilizado foi o fenol-formaldeído (FF) utilizado em combinação ou não com o difenil diisocianato, o segundo mais citado. O adesivo de ureia-formaldeído (UF) também foi utilizado em um trabalho. Os adesivos dos demais trabalhos não foram indicados. O uso de adesivo FF na maior parte dos estudos justifica-se principalmente pela aplicação dos

painéis na construção civil onde o desempenho estrutural e maior resistência à umidade são fundamentais.

O tratamento térmico foi feito em prensa laboratorial (9 estudos), estufa com ou sem reposição de atmosfera (6 estudos) ou utilizando outra metodologia como o processo Termovuoto<sup>®</sup> (1 estudo).

Em relação as principais descobertas, em geral houve melhora nas propriedades físicas associadas à estabilidade dimensional como inchamento em espessura, teor de umidade de equilíbrio e absorção de água, e propriedades de durabilidade como resistência ao ataque de fungos. Porém, em relação às propriedades mecânicas, o comportamento dos resultados variou em função do método, temperatura, tempo, teor de adesivo, entre outras variáveis, não seguindo um padrão específico.

## 2.8 LACUNAS IDENTIFICADAS

A partir desta revisão abrangente, observou-se potencial favorável do tratamento térmico em alternativa aos tratamentos preservativos convencionais, visto que se consiste em um processo de baixo custo, que tem evoluído ao longo dos anos apresentando bons resultados e que possui vantagens ambientais.

No entanto ficou evidente que as pesquisas sobre tratamento térmico de painéis OSB ainda são muito limitadas. Existem muitas áreas potenciais que podem ser exploradas para pesquisas futuras sobre o tema.

Diante da necessidade de se produzir painéis derivados de madeira mais sustentáveis, devido à preocupação progressiva não só com qualidade e preço, mas também com os impactos sociais e ambientais de processos e produtos (GELDERMANN *et al.*, 2016), somado a uma possível escassez futura no fornecimento de madeira devido aos elevados volumes de produção (KLÍMEK *et al.*, 2018), o estudo da utilização de diversos tipos de recursos lignocelulósicos, incluindo resíduos, será inevitável (BARBIRATO *et al.*, 2020; MELO *et al.*, 2016; FIORELLI *et al.*, 2019; SUGAHARA *et al.*, 2019). Além disso, o uso de adesivos alternativos de origem renovável deverá crescer (BARBIRATO *et al.*, 2019; BUZO *et al.*, 2019)

Assim, ressalta-se que nesta pesquisa não foram identificados estudos que avaliaram os efeitos da modificação térmica em painéis OSB produzidos com adesivos alternativos de origem renovável, sem a presença de solventes e compostos orgânicos voláteis (VOC) em suas composições.



Da mesma forma não foram localizados trabalhos com painéis OSB produzidos com resíduos lignocelulósicos, outras espécies de madeira menos nobres ou provenientes de florestas plantadas como o eucalipto, por exemplo, mostrando-se áreas importantes que precisam ser abordadas em pesquisas futuras. Destaca-se que no Brasil, especialmente na região Sul e Sudeste, o uso de madeira de pinus e eucalipto para a produção de painéis de madeira compensada já está consolidado, entretanto, a única fábrica que comercializa painéis OSB no Brasil emprega somente madeira de pinus.

Apesar de alguns trabalhos utilizarem painéis OSB comerciais, não foi encontrado nenhum trabalho que comparasse as potenciais diferenças entre propriedades de painéis OSB comerciais e experimentais tratados termicamente, indicando se atingirão propriedades compatíveis com as encontradas nos painéis comerciais ou que comparassem a influência do tratamento térmico entre diferentes tipos de madeira ou adesivo.

Também não foram avaliadas propriedades relacionadas à durabilidade dos painéis OSB tratados termicamente a partir de técnicas que avaliem a resistência ao ataque de térmitas ou após exposição à métodos de envelhecimento acelerado ou natural. Dada a importância da avaliação destas propriedades também se recomenda a realização de estudos que assegurem sua utilização.

Também é sugerida a avaliação de diversos outros processos de tratamento térmico utilizando diferentes ambientes, tempos de exposição e níveis de temperatura no pós-tratamento de painéis. Além disso, a investigação de possíveis modificações na composição química, cor e características anatômicas é necessária para garantir que os painéis atendam aos requisitos de utilização, no aspecto estrutural, durabilidade e estética, garantindo que esses painéis possam ser utilizados com segurança na construção civil.

## 2.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Este capítulo apresentou uma revisão bibliométrica e sistemática abrangente, apresentando o estado da arte sobre o tratamento térmico de painéis OSB. Os artigos revisados neste estudo foram publicados entre os anos 2000 e 2020 em fontes de alta qualidade contidas na base de dados da Scopus.

Constatou-se que, apesar do progressivo crescimento do interesse da comunidade científica com relação à modificação de madeira, as modificações de base térmica ainda possuem muito menos estudos se comparadas as demais técnicas.

De forma similar observa-se que, apesar do grande número de publicações existentes na área de painéis OSB, ainda existe um pequeno número de estudos publicados que visam avaliar os efeitos do tratamento térmico em painéis, e com ainda menos obras que realizaram o tratamento térmico após sua fabricação. Também não foram encontrados estudos que utilizaram madeira de eucalipto na produção de painéis OSB.

Em relação às principais descobertas, observou-se que o comportamento dos resultados variou muito em função do método, temperatura, tempo, teor de adesivo, entre outras variáveis, não seguindo um padrão específico, sendo crucial que estas lacunas de conhecimento sejam preenchidas.

Portanto, conclui-se que, devido à escassez de estudos nesta área, este é considerado um campo de pesquisa promissor e que requer atenção, sendo indispensável a realização de estudos futuros com o propósito de desenvolver o conhecimento sobre o efeito do pós-tratamento térmico em painéis OSB, avaliando as consequências desse tipo de processo e garantindo a segurança dos produtos desenvolvidos com essa metodologia.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A madeira é uma das matérias-primas mais antigas empregadas na construção civil, sendo amplamente utilizada para várias aplicações devido suas ótimas propriedades (BUZO *et al.*, 2019), além de tratar-se de um material renovável e de baixo custo (PIPÍŠKA *et al.*, 2020).

Historicamente, a madeira foi utilizada inicialmente na forma sólida, na forma roliça ou de madeira serrada. No entanto, à medida que a disponibilidade de árvores de grande diâmetro diminuiu, somado ao custo cada vez maior de toras e madeira serrada, foi necessário que os gestores de recursos florestais mundiais buscassem maneiras de utilizar as árvores com mais eficiência. Isso deu início ao surgimento de novos produtos de madeira reconstituída concorrentes da madeira sólida, produzidos a partir de toras de menor diâmetro, resíduos de desbaste ou com defeitos como curvatura e torção e, também, de resíduos madeireiros provenientes de serrarias e indústrias de celulose e materiais reciclados (ROWELL, 2012).

As inovações tecnológicas na indústria da construção estão consistentemente relacionadas ao desenvolvimento e aplicação de novos materiais. No século XVIII, o ferro foi o material que impulsionou a revolução industrial; mais tarde, no século XX, o concreto armado despontou, tornando-se o principal material para fins estruturais.

No entanto, há uma tendência contemporânea por materiais de baixo impacto ambiental e sistemas construtivos industrializados mais leves, com menor produção de resíduos e menor tempo de execução. Nesse sentido, os painéis de madeira têm sido cada vez mais utilizados (POZZER *et al.*, 2020) uma vez que foram inseridos na classe de produtos que auxiliam a industrialização da construção civil podendo ser aplicáveis em paredes, pisos e telhados (CABRAL *et al.*, 2015).

Como vantagens dos compósitos derivados da madeira, além da oportunidade de utilizar madeiras consideradas menos nobres, pode-se também citar a possibilidade de desenvolvimento de compósitos com propriedades mais uniformes e até melhores do que as encontradas na madeira sólida original, além de conferir ou majorar propriedades específicas como baixa condutividade térmica, resistência ao fogo, melhor bio-resistência, ou aprimorar superfícies e geometrias para fins decorativos (ROWELL, 2012).

Nota-se também que o Brasil é um país de evidente vocação florestal, graças à avançada tecnologia silvicultural brasileira. Desta maneira espécies florestais exóticas, como *Pinus* e

*Eucalyptus*, adaptaram-se muito bem ao clima, promovendo alta produtividade (KRÜGER; LAROCA, 2009).

Assim, como a maioria dos segmentos industriais, a construção civil busca soluções que conciliem custo, sustentabilidade e desempenho, de modo que o mercado tem direcionado suas atenções para sistemas construtivos industrializados, para viabilizar a construção de moradias em larga escala (ABIMCI, 2021).

Todavia, o sucesso das ações que conduzem à diminuição de custos, aumento da produtividade e melhorias da qualidade nos processos de produção e produto final depende da evolução dos níveis de industrialização da construção (OLIVEIRA, 2002).

De tal modo, sistemas do tipo *Light frame* surgem como alternativas mais racionais e sustentáveis se comparados ao sistema tradicional de alvenaria utilizado no Brasil. A principal característica destes sistemas é o uso de uma estrutura de perfis leves, contraventados com placas estruturais de painéis de madeira do tipo OSB e compensado ou cimentícias, que unidas oferecem rigidez, forma e sustentação à edificação (PRODUCTS, 2013).

### 3.2 SISTEMAS *LIGHT FRAME*

Os painéis à base de madeira apresentam crescente aplicação na construção civil em sistemas *Light frame* (IFBQ, 2018). De acordo com o SNH (2017), os Sistemas Leves Tipo “*Light Wood Framing*” ou “Sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada com fechamento”, podem ser empregados em edificações unifamiliares, térreas ou assobradadas, isoladas ou geminadas, e em edificações multifamiliares de até 04 pavimentos.

O sistema é considerado sustentável devido ao uso de materiais ecológicos, como os painéis de madeira, que permitem melhor eficiência energética do sistema, possuem ótimo desempenho térmico e acústico, geram redução do desperdício de materiais, do consumo de água e da geração de resíduos, além da sua característica baixa emissão de CO<sub>2</sub> (PRODUCTS, 2013). Outras vantagens do sistema *Light frame* são leveza do sistema, limpeza do canteiro de obra, menor geração de resíduos e rapidez na execução da obra.

Em julho de 2023 foi publicada a norma brasileira ABNT NBR 16936 - Edificações em *light wood frame* (ABNT, 2023) e a publicação dessa norma gera expectativa de aumento do consumo per capita de produtos de maior valor agregado, abrindo portas para disseminação do *Wood Frame* (ABIMCI, 2021).

Acredita-se, portanto, que a publicação da norma brasileira de *Wood frame* aumentará a demanda por materiais aplicáveis a este sistema construtivo (ABNT, 2018), tornando

necessária a realização de novos estudos que visem aplicá-los em paredes, pisos, lajes e estruturas de telhado, exigindo assim que seja garantida a qualidade, padrões e isonomia destes. Acrescido a isso, em 2016 foi financiado pela Caixa Econômica Federal o primeiro prédio em *Wood Frame* do Brasil, após a experiência satisfatória na construção de casas destinadas ao programa Minha Casa Minha Vida com a tecnologia sustentável a seco, aumentando ainda mais o otimismo do setor (CAIXA, 2016).

Somado a esses fatos, de acordo com a ABIMCI (2021), o *Wood Frame* é uma alternativa viável que pode contribuir para ajudar a reduzir o déficit habitacional brasileiro, que em 2019 chegou a 7,79 milhões de moradias e, até 2030 haverá uma demanda de 30,7 milhões de residências, considerando o crescimento médio de 3% na formação de novas famílias.

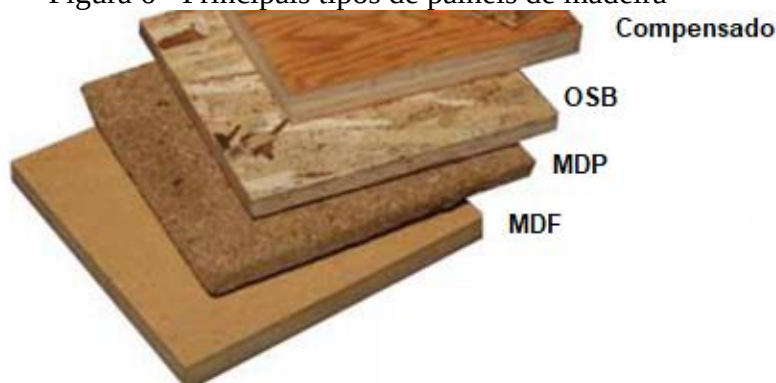
### 3.3 PAINÉIS DE MADEIRA - PANORAMA INDUSTRIAL

Referência mundial, o setor brasileiro de árvores cultivadas que inclui a fabricação de produtos como madeira, celulose, painéis de madeira, papel e produtos de papel, pisos laminados e carvão vegetal, registrou em 2019 uma receita bruta de R\$ 97,4 bilhões, um crescimento de 12,6% em relação ao ano anterior. Este setor gera emprego e renda para o Brasil, combinando atuação socialmente e ambientalmente responsável (IBA, 2020).

O segmento de painéis de madeira é referenciado como um setor tradicional brasileiro e, das 32 principais unidades brasileiras produtoras de painéis de madeira reconstituída, 28 delas situam-se nas regiões Sul e Sudeste, principalmente por sua ligação com os polos moveleiros ali localizados (IBA, 2020).

O segmento de painéis compósitos à base de madeira é uma categoria que compreende o compensado, OSB, painéis de partículas (MDP - *Medium Density Particleboard*) e painéis de fibra (MDF - *Medium Density Fiberboard*), ilustrados na Figura 6.

Figura 6 - Principais tipos de painéis de madeira



Fonte: Adaptado de FPL (2010).

De acordo com a FAO (2022) o consumo mundial de painéis OSB aumentou de 28.299.000 m<sup>3</sup> em 2016 para 35.566.000 m<sup>3</sup> em 2020, aproximadamente 26%. E em 2020, os quatro principais países produtores de OSB foram (por ordem do maior para o menor produtor, em 1000 m<sup>3</sup>) Estados Unidos (13713), Canadá (7491), Rússia (1626) e Romênia (1273).

Na balança comercial por produto do relatório da IBA - Indústria Brasileira de Árvores, em 2019 os painéis de madeira em conjunto com pisos laminados foram o terceiro produto de origem florestal mais comercializado, atrás apenas de celulose e papel (IBA, 2020).

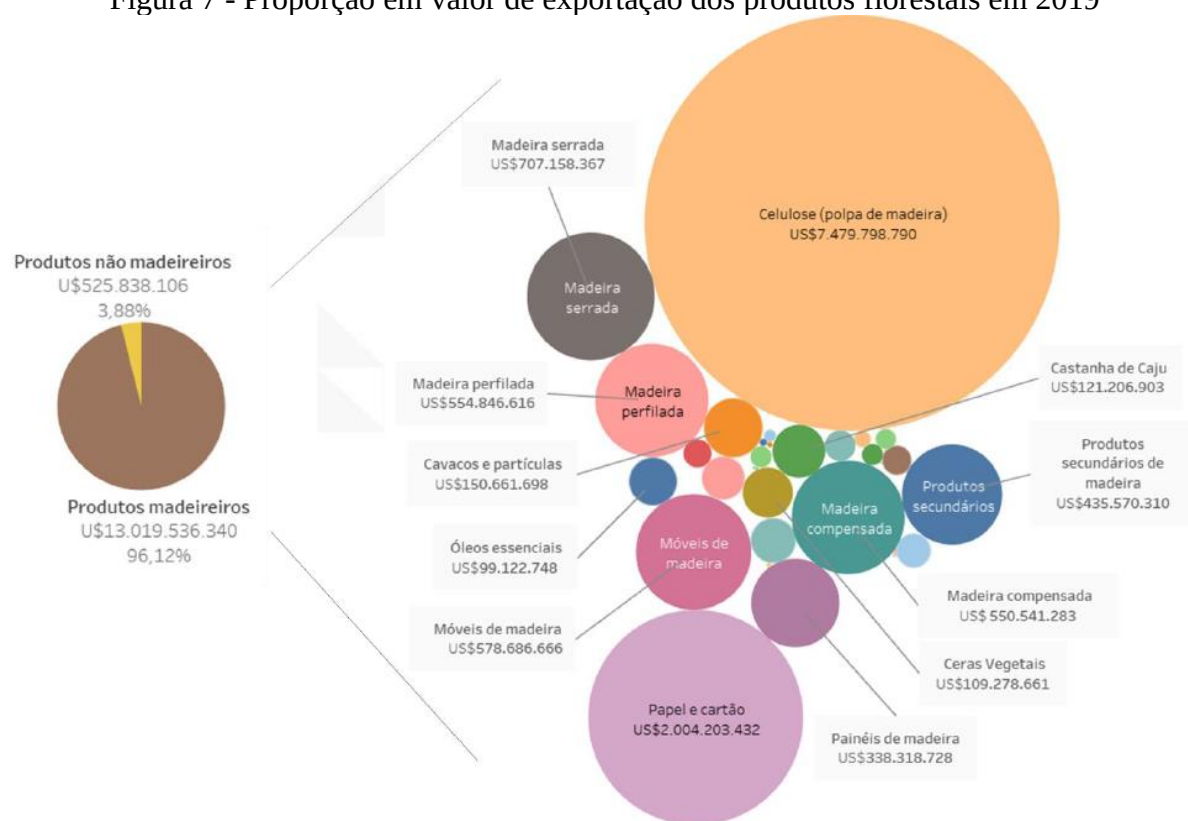
No entanto, a classe de painéis OSB ainda carece da criação de normas nacionais e estudos que fomentem seu uso.

O valor de produção (em mil reais) de painéis de partículas processados em 2017 no Brasil foi de 2.046.715,00, estando em sexto lugar em valor de produção, atrás de celulose, papel, painéis de fibra, madeira serrada e compensados (SNIF, 2019).

No setor de exportações, os painéis brasileiros de madeira tiveram como principais destinos em 2019 os Estados Unidos e México. E mesmo diante da desaceleração econômica mundial, o volume de vendas domésticas de painéis de madeira foi de 6,9 milhões de m<sup>3</sup>, mantendo-se relativamente estável em relação ao ano anterior (IBA, 2020).

Os painéis de madeira são considerados produtos florestais madeireiros. De acordo com o SNIF - Sistema Nacional de Informações Florestais, em 2019 a exportação brasileira de produtos florestais alcançou um patamar de US\$ 13,5 bilhões entre produtos madeireiros e não madeireiros (SNIF, 2019). Desse total, os painéis de madeira representam US\$ 338.318.728,00, sendo o oitavo produto mais exportado, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Proporção em valor de exportação dos produtos florestais em 2019



Fonte: SNIF (2021).

Acompanhando o crescimento apresentado, observa-se a necessidade cada vez maior de se desenvolver um material mais sustentável e racional, que atenda às necessidades do segmento industrial a que se destina, garantindo a mesma qualidade e durabilidade apresentada pelos materiais concorrentes.

Nesse contexto, muitas pesquisas sobre o desenvolvimento de materiais inovadores estão em andamento, pois observa-se que os consumidores estão cada vez mais preocupados, não apenas com qualidade e preço, mas também com os impactos sociais e ambientais dos produtos e processos (GELDERMANN *et al.*, 2016).

### 3.4 PAINÉIS OSB

Os termos compósito à base de madeira, produtos de madeira reconstituída e produtos engenheirados de madeira são usados para descrever materiais de madeira colados com um aglomerante. Entre os principais materiais compósitos à base de madeira podem ser destacados painéis de madeira compensada, OSB, MDP, MDF, HDF (*High Density Fiberboard*) e painéis de cimento-madeira; produtos de madeira estrutural como a madeira laminada colada (MLC), entre outros. Esses compósitos são usados para uma série de aplicações que incluem painéis

para usos internos e externos na construção civil, componentes de móveis, e estruturas portantes em edifícios (FPL, 2010).

Conforme define a norma europeia EN 300 - Oriented Strand Boards (OSB) - Definições, classificação e especificações (BSI, 2006), o OSB é um painel composto por várias camadas de partículas (*strands*) de madeira, longas e orientadas, de determinado formato e espessura, aglutinadas por um adesivo. As partículas das camadas exteriores são alinhadas e dispostas paralelamente ao comprimento da placa e as camadas interiores orientadas, geralmente, na direção perpendicular à das partículas de madeira das camadas exteriores.

O processo de produção do OSB ocorre sob calor e pressão e o produto resultante é um painel de construção estrutural, com densidade média de aproximadamente 650 kg/m<sup>3</sup>, sólido e uniforme, com alta resistência mecânica e resistência à água (FAO, 2021).

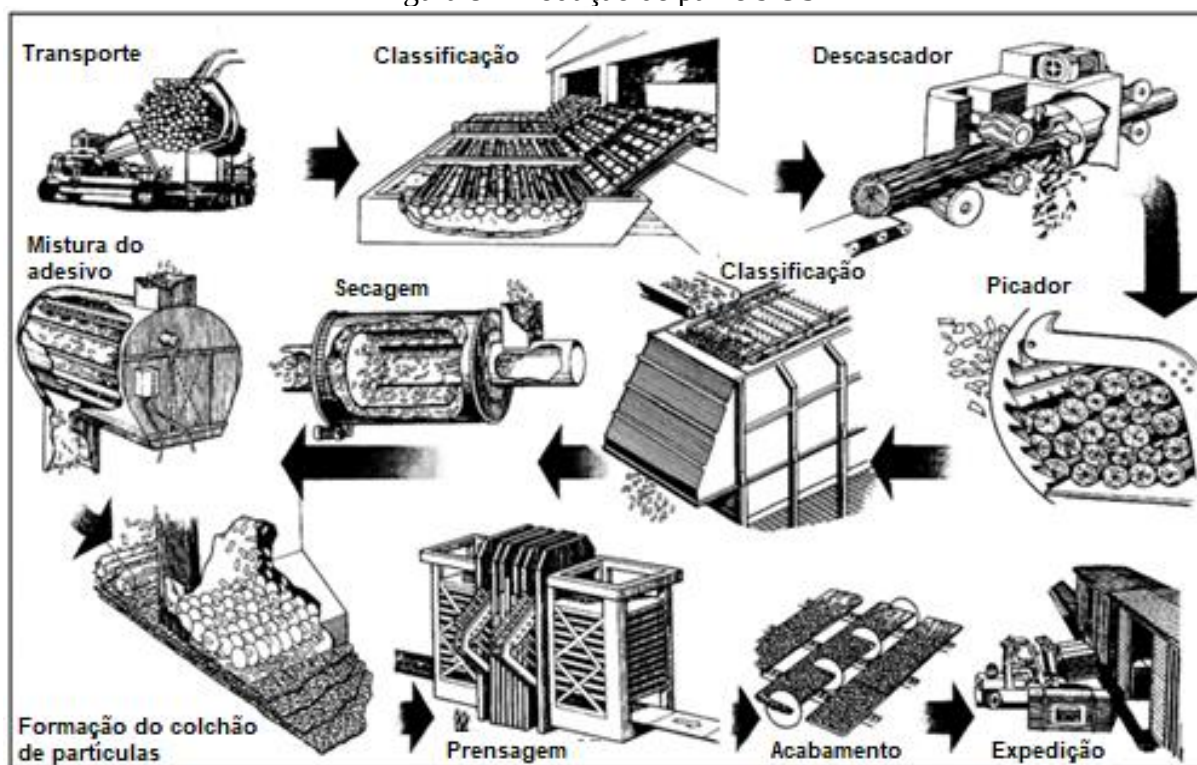
Os *strands* de madeira normalmente têm uma proporção (comprimento do fio dividido pela largura) de mínimo 3 e a orientação de diferentes camadas dá ao OSB suas características únicas, incluindo maior curvatura, força e rigidez. Alterações no tamanho dos *strands*, orientação e quantidade de camadas permitem que o OSB seja projetado para se adequar a diferentes usos. E com a evolução dos processos industriais, o desempenho dos produtos OSB foi melhorado sendo comparado ao da madeira compensada (FPL, 2010).

Na fabricação do OSB, as toras de madeira são descascadas e cortadas em partículas, chamadas *strands*. Os *strands* são peneirados, classificados, secos e misturados com adesivo, e as camadas são formadas alternando-se a orientação dos *strands*.

Uma vez que o colchão de partículas é formado, ele é prensado a quente, e segue para as etapas de acabamento, esquadrejamento e expedição conforme podemos observar no esquema representado na Figura 8.



Figura 8 - Produção de painéis OSB



Fonte: Adaptado de FPL (2010).

### 3.4.1 Painéis OSB - Panorama brasileiro

Segundo dados da FAO (FAO, 2022) a produção brasileira de painéis OSB em 2020 foi de 233 (mil m<sup>3</sup>), representando menos de 1% da produção mundial que atingiu 35922 (mil m<sup>3</sup>).

De acordo com Ferro *et al.* (2018), os OSB brasileiros são fabricados com madeira de reflorestamento obtidas de florestas de pinus, sendo que as principais diferenças identificadas entre o OSB produzido no Brasil em relação a outros países são relacionadas ao uso de termicida piretróide e tipos de resina.

As madeiras do gênero *Pinus* (densidade média de 0,35 a 0,45 g/cm<sup>3</sup>) são utilizadas para produção de painéis de partículas brasileiros, possibilitando a produção de painéis com adequada razão de compactação e área de contato entre as partículas (SALDANHA, 2004).

A Diretriz SINAT N°005 que fornece orientações para avaliação técnica de componentes para utilização em sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada, com fechamentos em painéis (Sistemas leves tipo *Light Wood Framing*) especifica que os painéis utilizados devem ser submetidos a tratamento químico preservativo ou outro que possua comprava eficiência (SINAT, 2017) com objetivo de evitar a biodeterioração provocada por fungos ou insetos xilófagos, muito comuns em países tropicais

como o Brasil, de modo a garantir sua segurança e durabilidade. Procedimento também exigido pela recém aprovada NBR 16936:2023 (ABNT, 2023).

Atualmente, no processo brasileiro de produção de OSB há a aplicação de termicida piretróide com a finalidade de aumentar a resistência da madeira ao ataque de organismos que causam sua decomposição, enquanto para outros países não há evidências sobre a aplicação desse produto químico. Além disso, mundialmente as resinas FF são comumente utilizadas para a adesão dos *strands* de OSB das camadas da superfície enquanto a resina MDI é usada para adesão de *strands* da camada de núcleo (FERRO *et al.*, 2018), o que indica um padrão de uso de materiais potencialmente nocivos ao homem e ao meio ambiente na fabricação do OSB convencional.

### 3.5 REFERENCIAL TEÓRICO

O conhecimento das propriedades dos compósitos de madeira é de importância crítica para seu uso adequado. Desta maneira, uma ampla gama de propriedades de engenharia é usada para caracterizar seu desempenho. Independentemente da matéria-prima utilizada na fabricação dos painéis à base de madeira, os compósitos produzidos fornecem desempenho em serviço uniforme e previsível, em grande parte como consequência da padronização e controle industrial durante sua fabricação (FPL, 2010).

Assim, a avaliação das propriedades também é imprescindível para a identificação de classes e indicações de uso, possibilitando sua comparação com valores determinados por documentos normativos e encontrados em materiais obtidos comercialmente.

#### 3.5.1 Fatores inerentes ao processo de produção

Vários fatores contribuem para a qualidade final dos painéis OSB. Dentre eles, destacam-se os inerentes à espécie da madeira e os inerentes ao processo, que podem estar relacionados à densidade dos painéis, razão de compactação, composição e orientação das camadas dos painéis, tipo e teores de adesivo, variações nos parâmetros de prensagem, entre outros (MENDES, 2010).

Os dois fatores mais importantes que controlam a densidade final de um painel são a densidade da matéria-prima e a compactação das partículas durante a prensagem à quente (KELLY, 1977). A razão de compactação, ou taxa de compressão, pode ser explicada pela relação entre a densidade do painel e a densidade da madeira e exerce um efeito acentuado em todas as propriedades dos painéis, em maior ou menor grau. Os valores admissíveis estão entre

1,3 e 1,6 para que haja um contato adequado entre partículas de madeira e o adesivo, levando a consolidação do painel à espessura final desejada (LOPES JUNIOR, 2020; MENDES, 2010).

Madeiras mais densas geram uma baixa razão de compactação, assim o emprego preferencial de espécies relativamente leves garante melhor contato superficial entre as partículas durante a operação de prensagem. Isso resulta em melhor utilização do adesivo, realizando uma boa colagem sem a necessidade de alterar outras variáveis do processo, como aumento do teor de adesivo, o que consequentemente aumenta também o custo de produção (KELLY, 1977; MENDES, 2010).

Painéis OSB manufacturados com madeira de baixa densidade apresentam, em geral, uma maior resistência à flexão e à adesão interna em relação aos confeccionados com madeira de alta densidade (LOPES JUNIOR, 2020). Entretanto, esses dados também podem sofrer influências do teor de resina, conforme concluíram estudos com painéis OSB produzidos com resíduos de madeira Balsa com diferentes adesivos (BARBIRATO *et al.*, 2020; HELLMEISTER, 2017).

De acordo com Fan e Enjily (2009), o OSB está sujeito a vários modos de tensão em seu amplo campo de uso. A estrutura do OSB e a orientação dos *strands* de madeira às tensões aplicadas são cruciais devido à grande diferença de resistência e rigidez entre as direções longitudinal e transversal dos *strands* de madeira.

O OSB pode ser visto como um material compósito ou mistura que compreende duas fases: adesivo e *strands* de madeira. No entanto as principais diferenças entre o OSB e os compósitos convencionais são que o OSB tem uma fração de volume muito maior de *strands* de madeira em comparação com a fração de fibras inseridas em compósitos convencionais e, também, com relação ao nível de rigidez mais próximo para as duas fases do OSB do que para os compósitos convencionais, onde a maior rigidez das fibras é um pré-requisito para o reforço, de modo que as fibras suportem a maior parte da carga. No OSB, por outro lado, a concentração de tensões pode ocorrer tanto nos *strands* de madeira quanto na resina, dependendo da orientação dos *strands* (FAN; ENJILY, 2009).

Desta maneira, Fan e Enjily (2009) constataram que o desempenho mecânico dos painéis OSB está diretamente relacionado à estrutura, orientação dos *strands* e processo de produção dos painéis (distribuição e porcentagem de material nas camadas e orientação dos *strands*), de modo que as características do produto final podem ser controladas pela porcentagem de componentes nas camadas e orientação dos *strands* de madeira.

Suzuki e Takeda (2000) verificaram em seu experimento que as propriedades de flexão dos painéis foram afetadas tanto pelo comprimento dos *strands*, quanto pela estrutura da

camada. As propriedades de flexão foram iguais nas direções paralela e perpendicular em painéis com proporção de camada superficial de 25%. Encontraram pequena diferença significativa para adesão interna, módulo de cisalhamento e resistência ao arrancamento de pregos e concluíram reiterando que mais estudos são necessários para examinar essas propriedades.

Uma vez que a madeira é um material ortotrópico, a orientação dos *strands* dentro do painel OSB tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas. Assim, Alldritt, Sinha e Miller (2014) estudaram a contribuição do alinhamento dos *strands* no desempenho de painéis OSB em propriedades de flexão, adesão interna e expansão linear. Seus resultados mostraram que os padrões de alinhamento dos *strands* podem ser modificados para atender às necessidades do produto, ou um padrão de alinhamento característico pode ser projetado para melhorar propriedades mecânicas desejadas específicas, enquanto talvez degrade outras propriedades mecânicas menos importantes e não necessárias para o produto de engenharia alvo.

### 3.5.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são normalmente as mais frequentemente usadas para avaliar os compósitos à base de madeira, sendo fundamentais especialmente para painéis com aplicação estrutural. O comportamento mecânico dos compósitos de madeira depende de uma variedade de fatores, incluindo espécies de madeira, regimes de manejo florestal, o tipo de adesivo usado para unir os elementos de madeira, geometria dos elementos de madeira (fibras, flocos, *strands*, partículas, lâminas, madeira serrada), densidade do produto final, distribuição das camadas, entre outros (FPL, 2010).

As propriedades elásticas e de resistência mecânica são os principais critérios utilizados para selecionar materiais ou estabelecer *design* ou especificações de produto. Propriedades elásticas incluem módulo de elasticidade (MOE) em flexão, tração e compressão. Propriedades de força geralmente relatadas incluem módulo de ruptura (MOR, resistência à flexão perpendicular e paralela à superfície), resistência à compressão, tração perpendicular à superfície (adesão interna), resistência de cisalhamento, arrancamento de parafuso e dureza (FPL, 2010).

De acordo com Dias *et al.* (2004), para uso estrutural, é necessário que sejam conhecidas as propriedades mecânicas do OSB, que variam segundo as três direções ortogonais, embora o material possa ser considerado ortotrópico numa escala macroscópica, uma vez que as propriedades relativas às duas direções na superfície do painel são relativamente próximas em

comparação com as propriedades verificadas na direção da espessura. Assim, em seu estudo, determinaram as propriedades mecânicas (resistência e módulo de elasticidade à flexão nas direções vertical, longitudinal e transversal e resistência e módulo de elasticidade ao cisalhamento ao longo da espessura) de painéis OSB produzidos no Brasil, seguindo as metodologias contidas nas normas norte-americanas da ASTM - *American Society for Testing and Materials*.

Seguindo esse princípio Barbirato *et al.* (2020), produziram painéis OSB de baixa densidade com resíduos de madeira balsa (*Ochroma Pyramidale*) e resina poliuretana à base de óleo de mamona, determinaram suas propriedades termo-físico-mecânicas e classificaram os painéis de acordo com a Norma Europeia EN 300:2002. Os resultados indicaram que os painéis com densidade de 400 kg/m<sup>3</sup> e teor de resina de 15% obtiveram um desempenho que os classifica como OSB tipo 1 - painéis de uso interno e não estrutural.

Pesquisadores também têm efetuado estudos inovadores com objetivo de avaliar propriedades mecânicas de painéis OSB, como Sartori e Tomasi (2013) que realizaram testes destrutivos de conexão entre diferentes tipos de painéis OSB e de gesso com pregos e grampos de madeira, para determinar como os diferentes sistemas se comportam e realizaram comparações entre os diferentes padrões. Os autores concluíram que a ductilidade e a dissipação das ligações feitas com pregos no painel OSB são maiores do que a realizada com grampos no painel de gesso e que todas as ligações investigadas são adequadas para utilização na construção de paredes de madeira em área sísmica.

Barbirato *et al.* (2019) avaliaram painéis OSB à base de resíduos de madeira balsa (*Ochroma Pyramidale*) aglomerados com resina poliuretana à base de óleo de mamona com diferentes densidades. Os painéis foram caracterizados preliminarmente por ensaios físicos e mecânicos para identificar a classe de aplicação deste material de acordo com as recomendações da norma EN 300:2002. Posteriormente, os painéis OSB foram caracterizados por testes de impacto de baixa velocidade. Os painéis com a densidade mais alta superaram os demais em termos de força de pico e energia de perfuração. Ambas as propriedades foram claramente influenciadas pela melhor compactação das partículas, que resultou também em melhores propriedades de flexão residual após o impacto.

### 3.5.3 Propriedades físicas

Assim como o conhecimento das propriedades mecânicas para indicação da utilização adequada dos painéis, o conhecimento das propriedades físicas também é muito importante, principalmente no que se relaciona à densidade, estabilidade dimensional e interação com água.

A madeira é um material higroscópico, devido ao fato de os polímeros da parede celular conterem grupos hidroxila e reagirem ao seu ambiente mudando de dimensão em resposta às mudanças na umidade relativa atmosférica. Em um ambiente que contém umidade, a madeira seca irá absorver a umidade até que esteja em equilíbrio com a atmosfera circundante (HILL, 2006).

Da mesma forma, a madeira saturada quando colocada em uma atmosfera de menor umidade relativa perderá umidade até que o equilíbrio seja alcançado. Caso a madeira seja colocada em um ambiente onde a umidade relativa é estável, ela atingirá um teor de umidade constante, conhecido como teor de umidade de equilíbrio. À medida que o vapor de água entra na parede celular da madeira, ele ocupa espaço, fazendo com que as dimensões da parede celular aumentem e, como consequência, a madeira aumenta de dimensão de forma anisotrópica (HILL, 2006).

Tais variações dimensionais podem comprometer a integridade e segurança dos painéis de madeira, sendo essencial sua determinação experimental.

Dessa maneira, Hellmeister (2017) produziu e caracterizou painéis com resíduo de madeira Balsa com diferentes resinas, UF, FF e PU-Mamona. Foram realizados ensaios físicos (inchamento em espessura, absorção de água e densidade aparente), mecânicos (flexão estática e adesão interna), microestruturais (MEV, FTIR, DRX e TG-DSC) e ensaios de condutividade térmica. Os resultados indicaram que os painéis produzidos, independentemente do tipo de resina avaliado nesse estudo, devem ser utilizados apenas em ambientes sem a presença de fontes de umidade, visto que de acordo com os resultados de absorção e inchamento em espessura após 24h de imersão todos os tratamentos avaliados não atenderam as recomendações do documento normativo EN 317:1993 que estabelece um máximo de 25% para Inchamento em Espessura de painéis OSB tipo 1.

Salem *et al.* (2018) avaliaram propriedades mecânicas, físicas e o teor de formaldeído de OSB de diferentes espessuras, produzidos com *Pinus sylvestris L.* e resina pMDI. As propriedades mecânicas e físicas obtidas para os painéis OSB atenderam aos requisitos padrão e todas as propriedades mecânicas e físicas foram afetadas significativamente pelo tipo e espessura dos painéis, exceto o inchamento em espessura após 24h e teor de formaldeído.

O objetivo do estudo de Silva *et al.* (2019) foi avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas e mecânicas de painéis OSB produzidos com *Pinus taeda* e adesivo à base de fenol-formaldeído e verificaram que o tratamento térmico causou melhoria significativa em propriedades físicas relacionadas ao inchamento em espessura dos painéis, sem comprometimento das propriedades mecânicas.

### 3.5.4 Tratamentos preservativos, durabilidade e biodegradação

Apenas a avaliação das propriedades mecânicas não é suficiente para classificar a empregabilidade de um produto de base biológica. É necessária a realização de estudos que avaliem os efeitos do ataque de organismos xilófagos no diagnóstico da qualidade dos materiais (PAES *et al.*, 2022).

Devido à sua estrutura anatômica e composição química, a madeira pode ser danificada por agentes de biodegradação, como exemplo, cupins, fungos, brocas marinhas (NICACIO *et al.*, 2022) e bactérias (FPL, 2010). No entanto, se tratada com técnicas adequadas para resistir à decomposição, a madeira pode durar centenas de anos (ROWELL, 2005).

Diante disso, os processos de biodegradação da madeira devem ser investigados, a fim de aplicar corretamente o material e reduzir custos e a geração de resíduos causados pela substituição de materiais deteriorados (NICACIO *et al.*, 2022).

Os agentes xilófagos (de biodegradação), como os cupins subterrâneos ou de solo, podem invadir os centros urbanos e deteriorar quaisquer objetos fabricados com madeira ou produtos de madeira, causando degradação irreversível. Dentre estes, indivíduos das espécies *Nasutitermes* (arbóreas ou subterrâneos) e *Cryptotermes* (madeira seca), por exemplo, podem ser citados como principais fontes de perdas de madeira (PAES *et al.*, 2022) causando problemas à madeira em serviço de significativa importância econômica (BROCCO *et al.*, 2019) e também afetando estrutura, possivelmente expondo as pessoas a riscos (PAES *et al.*, 2022).

Neste sentido, é imprescindível a aplicação de tratamentos preservativos de forma a proteger a madeira destes agentes. Em consonância a isso, a SINAT N°005 (SINAT, 2017), diretriz brasileira que fornece parâmetros para avaliação técnica de componentes para sistemas leves tipo *Light Wood Framing*, em concordância com a NBR 16936:2023 (ABNT, 2023) norma brasileira para edificações em *light wood frame*, determinam que os painéis utilizados devem obrigatoriamente ser submetidos a tratamento químico preservativo ou outro que venha

a comprovar eficiência contra ataques de organismos xilófagos, com base nos requisitos da norma ASTM D 3345 (ASTM, 1999).

Para Terzi (2018) preservativos de madeira à base de boro estão entre os considerados mais efetivos. No entanto, além dos tratamentos preservativos convencionais de impregnação química, existem outros tipos de tratamento, como o tratamento térmico, modificação térmica, ou termorretificação, que segundo Navi e Sandberg (2011), utiliza altas temperaturas para promover uma degradação controlada da madeira, principalmente das hemiceluloses, objetivando a melhoria de suas propriedades.

Neste tema, estudos tem objetivado conhecer a interferência do tratamento térmico nas propriedades da madeira, como o de Pessoa, Berti Filho e Brito (2006) que avaliaram a influência da termorretificação na resistência ao ataque de cupins de madeira seca na espécie de *Eucalyptus grandis*, evidenciando o potencial a ser explorado em futuras pesquisas.

Para Lovrić *et al.* (2017) a modificação térmica da madeira leva à diminuição do teor de umidade de equilíbrio e da hidrofiliabilidade da superfície do material tratado, majorando a estabilidade dimensional e provocando mudanças de cor, podendo reduzir as propriedades mecânicas. No entanto, melhora a resistência contra fungos e insetos xilófagos, tornando-a adequada para uso exterior, possibilitando ainda a substituição de espécies madeireiras por outras mais facilmente disponíveis, baratas ou cultivadas em plantações.

Pesquisadores como Brito *et al.* (2008), Pincelli, Brito e Corrente (2002), Windeisen, Strobel e Wegener (2007), entre outros, dedicaram especial atenção ao processo de modificação térmica da madeira, apontando o potencial favorável do tratamento térmico em alternativa aos tratamentos preservativos convencionais. No entanto, conforme Han *et al.* (2012), se comparado com a experiência industrial existente para tratamentos preservativos de madeira sólida e madeira compensada, o conhecimento existente relacionado a tratamentos preservativos para painéis OSB ainda é considerado ínfimo.

De forma semelhante nota-se que embora os painéis de madeira sejam produtos promissores para a indústria moveleira e de construção civil, ainda há poucas informações sobre a resistência das mesmas aos ataques de organismos deterioradores xilófagos (PAES *et al.*, 2022). No entanto, é claro que os produtos de madeira não atingirão seu maior potencial de uso até que sejam totalmente descritos e os processos que controlam suas propriedades de desempenho sejam totalmente compreendidos, de modo que seja possível manipular essas propriedades para alcançar o desempenho ideal desejado (ROWELL, 2005).

Segundo Silva *et al.* (2019) os painéis OSB podem ser submetidos a tratamentos conservantes que estendem sua vida útil e aumentam sua resistência contra intempéries e



agentes xilófagos. Dessa forma, em seu trabalho produziram OSB tratado termicamente a partir de *Pinus taeda* e resina FF e concluíram que o tratamento térmico dos painéis não afetou as propriedades mecânicas em relação ao tratamento controle.

Complementarmente a isso, de acordo com Belini *et al.* (2014), no desenvolvimento de painéis deve-se dar destaque aos ensaios relacionados à definição de uso e aplicabilidade final do produto, como os ensaios de durabilidade ao ataque biológico de fungos e cupins, fundamentais na definição de uso e aplicação do produto final. Em adição, Barrero (2015) afirmou que a avaliação da durabilidade e do desempenho de painéis não convencionais é necessária para garantir melhor aceitação e proposição de uso para os materiais.

Os métodos de envelhecimento para avaliar a durabilidade de painéis derivados de madeira incluem testes de longo prazo e de curto prazo. Testes de longo prazo (envelhecimento natural) são ensaios de exposição ao ar livre, para avaliar a influência das intempéries e ensaios de intemperismo natural combinam os fatores de degradação sob condições naturais ao ar livre, que incluem a umidade, radiação solar, oscilação de temperatura diária, exposição a fungos, oxidação e poluição. Já os ensaios de envelhecimento acelerado (curto prazo) simulam parcialmente os resultados de envelhecimento natural, avaliando as mudanças nas propriedades físico-mecânicas em curto tempo através da exposição a diferentes fatores de deterioração (GARZÓN BARRERO, 2015).

Sob condições que permitem o desenvolvimento de organismos que degradam a madeira, a proteção deve ser fornecida durante os períodos de processamento, comercialização e uso (FPL, 2010).

Em relação aos painéis de madeira, a suscetibilidade ao ataque de cupins será determinada pela qualidade do painel. Esta qualidade é afetada pelos atributos relacionados aos materiais utilizados (madeira, adesivo e aditivos) como teor de umidade das partículas, geometria, distribuição, entre outros (GONÇALVES *et al.*, 2021b), e outros fatores relacionados ao processo (por exemplo, temperatura, tempo, tipos de organismos aos quais está exposto, espécies de madeira, condições de teste etc.) (ÜNSAL *et al.*, 2008).

Os testes de cupins são geralmente avaliados considerando a perda de massa, uma escala de classificação para a intensidade do dano e a mortalidade. A perda de massa é o método de avaliação mais simples, pois se baseia na medição do peso de amostras com teor de umidade constante antes e depois da exposição. Os graus de ataque são avaliados visualmente pelo olho humano que é capaz de avaliar graus de danos aos materiais, principalmente em níveis baixos e altos. Finalmente, a mortalidade dos cupins fornece uma avaliação simples da sobrevivência

dos cupins. Alguma mortalidade é normalmente esperada em um teste de cupins. No entanto, a mortalidade deve ser menor com controles não tratados (HASSAN; MORRELL, 2021).

Desta forma, com o objetivo de preencher lacunas de conhecimento na área relacionadas à avaliação da biodegradação de painéis de madeira, foram realizados estudos associados a painéis aglomerados (GONÇALVES *et al.*, 2021a, 2021b, 2022; KARLINASARI *et al.*, 2021; PAES *et al.*, 2022), *Oriented Structural Straw Board* (OSSB) (HAN *et al.*, 2012), painéis de madeira maciça (ÜNSAL *et al.*, 2008), painéis de madeira termicamente prensada (ÜNSAL *et al.*, 2008), compensado (CAHYONO *et al.*, 2019; MARCON *et al.*, 2023; NUNES *et al.*, 2023), painéis sanduíche híbridos (MALIK *et al.*, 2022) e painéis à base de bambu (FEBRIANTO *et al.*, 2012).

Particularmente para painéis OSB, o estudo de Ferro *et al.* (2016) avaliou a resistência ao cupim de OSB fabricado com madeira Paricá e conservantes Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) e Borato de Cobre Cromatado (CCB). Cheng *et al.* (2021) avaliaram a resistência a cupins de painéis OSB feitos com farinha de soja como substituto parcial da resina Metileno Difenil Diisocianato (pMDI).

Lee *et al.*, (2023) estudaram as propriedades mecânicas e o desempenho de resistência a cupins e ao apodrecimento de painéis à base de madeira usados em casas de madeira (OSB, aglomerado estrutural e aglomerado). Tascioglu *et al.* (2013) pesquisaram a deterioração biológica e a resistência aos cupins de cinco tipos de compósitos à base de madeira disponíveis comercialmente (compensados de coníferas e folhosas, MDF, MDP E OSB) pós-tratados com quaternário de cobre alcalino e azol de cobre.

De acordo com Garzón Barrero (2015), materiais convencionais têm sido investigados para o estudo da sua susceptibilidade ao crescimento de fungos. No entanto, observa-se uma insuficiência de pesquisas publicadas que relacionem a afinidade de materiais alternativos e o crescimento de fungos, sendo necessário o estudo, adequação e viabilização do uso de materiais de construção verdes.

A suscetibilidade dos materiais de construção quanto ao crescimento de fungos varia. Alguns materiais são tolerantes em ambientes com umidade relativamente alta, sem apresentar crescimento de mofo, enquanto outros são menos tolerantes, onde o mofo pode crescer em ambientes de umidade relativamente baixa. Assim, uma vez que as estruturas de uma edificação estão expostas a variações de temperaturas e umidade, é imprescindível avaliar a capacidade de utilização de madeira e materiais compósitos em sistemas *framing* para suportar o possível crescimento de fungos quando acidentalmente expostos a intempéries (GARZÓN-BARRERO *et al.*, 2016).

Os materiais à base de madeira são geralmente predispostos à colonização por fungos e outros microrganismos descolorantes, mas sua resistência à descoloração fúngica varia. Diferentes métodos de teste padronizados para determinar a suscetibilidade a fungos de mofo têm sido usados para avaliar vários materiais à base de madeira, mas os resultados obtidos sugerem que a resistência ao mofo depende do método aplicado.

Diante disso, o estudo Imken *et al.* (2020) teve como objetivo uma avaliação comparativa de dois métodos comumente usados para determinar a resistência ao mofo em amostras de madeira maciça, painéis de fibra e compósitos de polímero-madeira, os quais foram inoculados, incubados por diferentes intervalos de tempo e avaliados quanto ao crescimento superficial de fungos. As classificações de crescimento de fungos obtidas com os dois métodos não se correlacionaram bem, nem dentro de um tipo de material nem entre materiais diferentes, o que pode ser atribuído a maiores teores de umidade e nutrientes adicionais disponíveis para as amostras no teste de placa de ágar em comparação com aqueles na câmara teste. Concluiu-se que a configuração experimental poderia ter um efeito preponderante sobre os resultados dos testes de resistência ao mofo.

Em seu trabalho, Garzón Barrero (2015) avaliou o desempenho físico-mecânico e a durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar com resina bicomponente a base de mamona e comparou os resultados com painéis MDP comerciais. O acompanhamento das propriedades físico-mecânicas foi realizado antes e após os ensaios de envelhecimento por exposição natural durante 3, 6 e 12 meses, envelhecimento acelerado e de intemperismo artificial. Foi avaliada a suscetibilidade ao crescimento gerada pelo ataque de fungos emboloradores e apodrecedores nos materiais durante o envelhecimento natural e no ensaio acelerado.

Os insetos também podem danificar a madeira e em muitas situações devem ser considerados em medidas de proteção, em especial com relação aos cupins, um dos principais degradadores da madeira (FPL, 2010).

Dessa forma, Pessoa; Berti Filho e Brito (2006) avaliaram a resistência da madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis*, submetida ao ataque do cupim de madeira seca, *Cryptotermes brevis* e avaliaram os danos causados pelos cupins à madeira, bem como a mortalidade dos insetos. Considerando-se as condições do estudo, os tratamentos não foram suficientes para oferecer total imunidade da madeira ao ataque dos cupins. No entanto, foram observadas incidências de menores danos à madeira, bem como aumento na mortalidade de insetos, em função da elevação da temperatura de tratamento térmico.

Já Belini *et al.* (2014) confeccionaram painéis com diferentes percentuais de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) e fibras de eucalipto (*Eucalyptus grandis*), aglutinados com duas dosagens de resina UF e avaliaram sua resistência biológica (bioensaios) ao ataque de cupins da espécie *Reticulitermes santonensis*, *Rhinotermitidae* e fungos *Pleurotus ostreatus* e *Basidiomiceto de podridão-branca*. De modo geral, os painéis confeccionados apresentaram-se não resistentes aos bioensaios realizados e houve similaridade na dinâmica de ataque e perda de massa entre as diferentes dosagens de resina praticadas, remetendo à necessidade da aplicação de revestimento protetor na superfície dos painéis ou adição de produtos fungicidas e cupinícidas.

### 3.5.5 Madeira para painéis de partículas

Os painéis OSB podem ser produzidos a partir de madeiras provenientes de desbastes e de troncos finos e tortuosos, bem como de espécies de menor valor comercial, apresentando vantagens em relação aos compensados, os quais requerem toras de alta qualidade para a sua manufatura e, por isso, apresentam custo superior. De forma paralela, a utilização de madeira reconstituída é uma tendência que proporciona diversas vantagens como pré-fabricação, industrialização, homogeneidade, redução da anisotropia e utilização de madeiras de rápido crescimento provenientes de florestas plantadas (SURDI, 2012).

Uma das variáveis mais importantes presentes no processamento da madeira é a espécie florestal, pois ela interage com as demais. Sua relevância está ligada à sua disponibilidade, além de limitar o tipo de partícula a ser produzida (GUIMARÃES JÚNIOR, 2008).

As espécies de madeira com densidade de até 0,55 g/cm<sup>3</sup> são as mais adequadas para a produção de painéis de partículas pois, espécies de menor densidade asseguram uma área de contato mais uniforme e satisfatória entre as partículas do colchão, com maior capacidade de transmitir esforços entre as partículas, o que resulta em propriedades de flexão e ligação interna mais elevadas (SURDI, 2012).

Na América do Norte, a madeira de álamo (*Populus*) é predominante usada para fabricação de OSB. Espécies de alta densidade, como faia e bétula, são frequentemente misturadas com espécies de baixa densidade para manter as propriedades do painel (FPL, 2010).

No Brasil são utilizadas espécies provenientes de árvores plantadas, de florestas renováveis, e a proteção contra cupins e degradação de fungos geralmente é efetuada com borato de zinco (LP CORP, 2021).

O setor brasileiro de árvores plantadas trata-se de um importante apontador de desenvolvimento econômico, social e ambiental, uma vez que leva a mudanças econômicas locais, criando oportunidades de trabalho e gerando renda, bem como colaborando com a mitigação das mudanças climáticas (IBA, 2020).

Em 2019, a área total de árvores plantadas totalizou 9,0 milhões de hectares, um aumento de 2,4% em relação a 2018. Desse total, a maioria (77%) é representada pelo cultivo de eucalipto, com 6,97 milhões de hectares, e 18% de pinus, com 1,64 milhão de hectares. Além desses cultivos, existem 0,39 milhão de hectares plantados de outras espécies, entre elas a seringueira, acácia, teca e paricá. Já os estados de Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina continuam sendo os maiores detentores de florestas plantadas no país (IBA, 2020).

No Brasil, os painéis OSB comerciais são produzidos com madeira de *Pinus*. No entanto, de acordo com Guimarães Júnior (2008), a médio prazo essa espécie não poderá não conseguir atender toda a demanda, levando a uma problemática para as indústrias dependentes desse tipo de matéria-prima. Diante do exposto, constata-se que a madeira de eucalipto seria a melhor alternativa à madeira de pinus para a confecção de painéis, visto seu rápido crescimento, diversidade de espécies, podendo atender a pré-requisitos técnicos dos diferentes segmentos da indústria madeireira.

Em vista disso, pesquisadores têm estudado diversas espécies de madeira para produção de painéis OSB, como Nascimento *et al.* (2015) cujo trabalho avaliou a viabilidade da produção de painéis OSB feitos com espécies de madeira da caatinga do nordeste do Brasil, como marmeleiro (*Croton sonderianus* Muell. Arg.), jurema-branca (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke) e catanduva (*Piptadenia moniliformis* Benth.) aglomeradas com resina poliuretana bicomponente derivada de mamona.

A madeira Balsa foi adotada na produção de painéis OSB nas pesquisas de Barbirato *et al.* (2020), Barbirato; Fiorelli; *et al.* (2019), Barbirato; Lopes Junior; *et al.* (2019), Hellmeister (2017); Lopes Junior (2020) e Lopes Junior *et al.* (2021).

Silva *et al.* (2019), Carvalho *et al.* (2018), Salem *et al.* (2018), Direske *et al.* (2018), Surdi (2012), Mendes (2010), trabalharam com painéis OSB fabricados com madeira de Pinus. E, também, foram encontrados trabalhos que utilizaram outras espécies como paricá (FERRO, 2013) e poplar (CETERA *et al.*, 2018).

### 3.5.6 Resinas para painéis de partículas

Visto que o adesivo pode representar entre 30 e 60% do custo da produção de painéis OSB e apresenta estreita relação com as propriedades mecânicas e de estabilidade dimensional destes, torna-se uma variável de fundamental importância devido às implicações técnicas e econômicas envolvidas. Uma vez que a utilização de um teor de resina de 15% já é considerado elevado, a utilização de menores teores de resina na produção de painéis OSB é um campo importante a ser investigado (LOPES JUNIOR *et al.*, 2021).

A maioria dos painéis à base de madeira utiliza polímeros termoendurecíveis como ureia, fenol, ou melamina-formaldeído e isocianato, devido à sua combinação de propriedades, incluindo baixo custo, facilidade de uso em uma ampla variedade de condições de cura, tempo de reação rápido na prensagem a quente, alta resistência contra o ataque biológico e à abrasão e excelentes propriedades térmicas. O problema desses adesivos provém de sua origem não renovável, a presença de solventes e VOCs em suas composições, além de seu potencial tóxico e cancerígeno, visto que se tratam de substâncias perigosas associadas a problemas de saúde devido à emissão de formaldeído (BARBIRATO *et al.*, 2019a).

De acordo com BARBIRATO *et al.* (2019), uma estratégia para reduzir o impacto da emissão de formaldeído é representada pela nanotecnologia, e nano preenchimentos como nano argila e nano-SiO<sub>2</sub> por exibir capacidade de absorção forte e propriedade de barreira. Outra estratégia consiste na utilização de adesivos baseados em materiais provenientes de fontes renováveis, ou adição de materiais que reduzam o teor de formaldeído durante sua produção.

Desta forma, Jiang *et al.* (2017) investigaram as características de emissão de formaldeído e outros VOCs de painéis de partículas em câmaras ambientais seladas ou ventiladas em diferentes temperaturas, com foco na emissão de compostos odoríferos e concluíram que o tratamento térmico com temperatura moderada é eficaz para reduzir as emissões.

Já Santos *et al.* (2014) efetuaram uma avaliação do ciclo de vida da produção de painéis aglomerados e verificaram que o principal potencial impacto ambiental e toxicidade humana foi o uso do adesivo ureia-formaldeído.

O uso de polímeros naturais potencialmente biodegradáveis, mostra-se como um parâmetro importante para a abertura de oportunidades no desenvolvimento de novos mercados de produtos com valor agregado (GARZÓN BARRERO, 2015). Existem muitas categorias de painéis de partículas com resina orgânica e uma dessas classes são os painéis OSB (BARBIRATO *et al.*, 2020). Assim, os painéis produzidos com e resinas biodegradáveis são

considerados uma alternativa sustentável para o aproveitamento de suas propriedades intrínsecas, favorecendo sua capacidade de desempenho para satisfazer às necessidades do usuário final e agregar valor e posicionamento no mercado (GARZÓN BARRERO, 2015).

Embora a maioria das pesquisas relacionadas à fabricação de compósitos de madeira tenha considerado o uso de resinas de base química, novas aplicações com resinas mais verdes à base de plantas, como a resina poliuretana à base de óleo de mamona, têm mostrado resultados animadores (SUGAHARA *et al.*, 2019). Deste modo, um promissor produto biodegradável, não poluente e renovável é representado pelo adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona, que já se mostrou adequada para a produção de painéis de madeira (BARBIRATO *et al.*, 2019a).

A poliuretana à base de óleo de mamona, obtida pela prensagem das sementes ou por extração com solvente, segue a tendência global de procura por polióis obtidos de fontes renováveis, como aqueles à base de óleos naturais em substituição a matérias-primas de origem petroquímica. Somado a isso, verifica-se que o óleo de mamona (*Ricinus communis*), denominado internacionalmente como “*Castor Oil*”, é proveniente de uma planta encontrada em regiões tropicais e subtropicais, muito abundante no Brasil. A partir do óleo de mamona sintetizam-se polióis e pré-polímeros com diferentes características que, quando misturados, dão origem a um poliuretano cuja mistura leva à reação de polimerização (SUGAHARA, 2018).

Assim, em contrapartida ao uso de adesivos com elevado potencial tóxico, Barrero (2015) utilizou em sua pesquisa a resina poliuretana à base de óleo de mamona e inferiu através de testes de envelhecimento acelerado que o revestimento de superfície de painéis com resina poliuretana à base de óleo de mamona reduziu o crescimento de mofo, indicando seu potencial de uso tanto como aglutinante quanto como revestimento superficial.

Em sua tese, Hellmeister (2017) caracterizou painéis OSB de com diferentes resinas e concluiu que apenas os painéis aglomerados com resina poliuretana à base de óleo de mamona atenderam os requisitos estabelecidos pela norma europeia EN 300:2002.

Em seu trabalho, Ferro (2013) avaliou a viabilidade técnica de produção de painéis OSB fabricados com partículas de madeira da espécie paricá (*Schizolobium amazonicum*) e resina poliuretana à base de óleo de mamona. Os resultados apontaram excelentes propriedades físico-mecânicas, quando comparados com os valores mínimos recomendados pelas normas citadas e com os valores encontrados na literatura, para painéis desta natureza com finalidades comerciais. Desta maneira ficou comprovada a viabilidade da utilização da espécie Paricá e a resina poliuretana à base de óleo de mamona na fabricação de painéis OSB.

O trabalho de Lopes Junior *et al.* (2021) teve como objetivo avaliar diferentes teores (13%, 15% e 18%) de resinas (PU-Mamona, FF e UF) em painéis OSB de madeira Balsa

residual. Os resultados obtidos indicaram que os painéis produzidos com 13% de PU-Mamona e FF apresentaram melhor desempenho físico-mecânico e foram classificados como painéis OSB do tipo 1, recomendados para ambientes internos ou para produção de mobiliário. Enquanto a resina UF não apresentou desempenho adequado. Comparativamente, para cada teor de resina analisado verificou-se que a composição com PU-mamona proporcionou painéis com menor absorção, sendo, portanto, mais estáveis sob aspectos de higroscopicidade.

### 3.5.7 Avaliação do Ciclo de Vida

Nos últimos anos, a utilização dos produtos derivados da madeira, no setor da construção tem aumentado devido ao desenvolvimento de novas tecnologias e produtos que permitiram ultrapassar algumas de suas limitações (DIAS, 2022).

No entanto, conhecer apenas o potencial técnico dos produtos focando apenas na avaliação das propriedades físicas e mecânicas não é suficiente para a melhor tomada de decisão na escolha dos materiais.

Nota-se que a grande maioria dos estudos que avaliam o desempenho dos painéis de madeira ainda se baseia unicamente na avaliação de suas propriedades físicas e mecânicas. No entanto, para produzir materiais de construção mais sustentáveis é essencial quantificar seus impactos ambientais (SUGAHARA *et al.*, 2023).

Existe uma pressão cada vez maior dos consumidores e governos para que a indústria reduza seus impactos ambientais. Consequentemente, a rotulagem ambiental dos produtos tornou-se um tema importante pois os consumidores querem informações sobre o desempenho ambiental de seus produtos. Deste modo, documentar o desempenho ambiental para satisfazer esta necessidade de transparência, revela-se também como uma vantagem competitiva (LAURENT *et al.*, 2016).

A ideia de se avaliar os impactos ambientais dos produtos de madeira surgiu no início dos anos 70 e as primeiras pesquisas realizadas centraram-se no consumo de energia durante os processos de produção e apenas nos anos seguintes passou a abranger mais aspectos ambientais e integrar todo o ciclo de vida dos produtos (WERNER; RICHTER, 2007). No entanto, a LCA só passou a ser utilizada no setor da construção a partir de 1990 (ISLAM *et al.*, 2015a).

A LCA tem sido utilizada pela academia e pela indústria para quantificar e comparar os impactos ambientais de produtos e soluções utilizadas no setor da construção. Neste contexto os produtos derivados de madeira têm conquistado destaque devido às suas características ambientais sendo que uma das principais vantagens da utilização de produtos à base de madeira



está relacionada com a capacidade das árvores de capturar o dióxido de carbono existente na atmosfera e reter o carbono nos produtos de madeira. No entanto, apesar das vantagens dos produtos de madeira, é importante quantificá-las e compará-las com outros produtos disponíveis no mercado, a fim de tomar decisões sustentáveis apoiadas em conhecimento científico (DIAS, 2022).

Os componentes tradicionais dos painéis de madeira podem ser questionáveis em termos de sustentabilidade. No entanto, se forem substituídos por materiais provenientes de fontes sustentáveis, é possível diminuir os prejuízos ambientais. Assim, para compreender os aspectos de sustentabilidade dos produtos de madeira, é essencial avaliar seus impactos ambientais (FARJANA *et al.*, 2023).

A LCA é uma metodologia de avaliação do impacto ambiental associado a um produto ou sistema, proposta pelas normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b), e compila e avalia as entradas, saídas e quantifica os potenciais impactos ambientais de um sistema ou produto ao longo de seu ciclo de vida. No entanto, impactos sociais e econômicos também podem ser abordados através de outras metodologias em combinação com a LCA (DIAS, 2022). Podendo ser aplicada desde a produção dos painéis de madeira aos processos de gestão de fim de vida (FARJANA *et al.*, 2023).

O cálculo dos impactos ambientais através da metodologia LCA permite identificar as operações do ciclo de vida dos produtos madeireiros que mais influenciam os resultados (nomeados “*hotspots*” ambientais). Assim, visando a otimização ambiental das soluções construtivas baseadas em madeira, depois da identificação dos *hotspots* é importante analisar quais mudanças devem ser realizadas nas operações do ciclo de vida de modo a levar à redução dos seus impactos ambientais (DIAS, 2022). Nesse sentido, LCA mostra-se como uma ferramenta valiosa que precisa fazer parte do processo de tomada de decisão rumo à sustentabilidade (RIVELA *et al.*, 2007).

LCA é uma técnica iterativa onde as fases individuais utilizam os resultados das outras fases. Esta abordagem iterativa dentro e entre as fases colabora para a abrangência e consistência do estudo e dos resultados relatados. A LCA também é uma abordagem relativa estruturada em uma unidade funcional que define o que está sendo estudado e para a qual todas as entradas e saídas e análises subsequentes são relativas. E devido à complexidade inerente à LCA, a transparência é um importante princípio orientador, de forma a garantir uma interpretação adequada dos resultados (ISO, 2006a).

Na LCA, a atribuição de intervenções ambientais a um produto em análise é uma tarefa ambígua. As decisões metodológicas durante a fase de LCI (análise do inventário do ciclo de

vida) incluem a modelação de cenários de fim de vida ou a escolha de um fator de atribuição para a atribuição de processos de coprodução conjunta. Assim, um critério significativo para decisões metodológicas é se as opções de melhoria, que podem ser assumidas a partir do LCI, são reconhecidas pelo decisor no sentido de redirecionar os fluxos de materiais em jogo em novos caminhos sustentáveis (WERNER *et al.*, 2007).

A série de normas ISO 14040 (ISO, 2006a, 2006b) fornece uma abordagem estruturada e prescritiva para as diretrizes da LCA. E como as escolhas metodológicas na LCA podem ter impacto significativo no resultado global e na classificação dos produtos avaliados, este fato tem sido frequentemente pesquisado (WERNER *et al.*, 2007).

De acordo com a norma ISO 14044 (ISO, 2006b), há quatro fases num estudo de LCA: a fase de definição de objetivo e escopo, a fase de análise de inventário (LCI), a fase de avaliação de impacto (LCIA) e a fase de interpretação dos resultados, conforme descrito no Quadro 3.

Quadro 3 - Etapas da LCA

| <i><b>Etapas</b></i>                  | <i><b>Descrição</b></i>                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Definição de Objetivo e Escopo</i> | <i>O escopo, incluindo os limites do sistema e o nível de detalhe de uma LCA depende do assunto e do uso pretendido do estudo. A profundidade e a amplitude da LCA podem diferir consideravelmente dependendo do objetivo específico.</i>                                         |
| <i>Análise de Inventário (LCI)</i>    | <i>A fase de análise do inventário do ciclo de vida (LCI) é a segunda fase da LCA. É um inventário de dados de entrada/saída relativos ao sistema que está sendo estudado. Envolve a coleta dos dados necessários para atender aos objetivos do estudo definido.</i>              |
| <i>Avaliação de Impactos (LCIA)</i>   | <i>A fase de avaliação do impacto do ciclo de vida (LCIA) é a terceira fase da LCA. O objetivo da LCIA é fornecer informações adicionais para ajudar a avaliar os resultados de LCI de um sistema de produto para melhor compreender a sua importância ambiental.</i>             |
| <i>Interpretação dos resultados</i>   | <i>A interpretação do ciclo de vida é a fase final do procedimento de LCA, na qual os resultados de uma LCI ou de uma LCIA, ou ambos, são resumidos e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo.</i> |

Fonte: Adaptado de ISO (2006b).

Numa breve visão geral, a série de normas ISO 14040 define que um sistema pode ter diversas funções possíveis que dependem do objetivo e do escopo da LCA. A unidade funcional define a quantificação das funções identificadas (características de desempenho) do produto e o objetivo principal de uma unidade funcional é fornecer uma referência à qual as entradas e saídas estão relacionadas para garantir a comparabilidade dos resultados da LCA. Assim, a comparabilidade dos resultados da LCA é particularmente crítica quando diferentes sistemas

estão sendo avaliados, para garantir que tais comparações sejam feitas numa base comum (ISO, 2006a).

A norma também relata que a LCA é conduzida definindo sistemas de produtos como modelos que descrevem os elementos-chave dos sistemas físicos. O limite do sistema define os processos unitários a serem envolvidos no sistema. Os critérios de corte utilizados num estudo devem ser claramente compreendidos e descritos, e os critérios utilizados na definição dos limites do sistema são significativos para o grau de confiança nos resultados de um estudo e para a probabilidade de atingir o seu objetivo. Os requisitos de qualidade dos dados especificam em termos gerais as características dos dados necessários para o estudo, e as descrições da qualidade dos dados são relevantes para compreender a confiança dos resultados e interpretar corretamente o resultado do estudo (ISO, 2006a).

Desde que a aplicação da LCA começou a ser significativa durante a década de 1990, esforços foram feitos para progredir nesta área, especificamente em relação para operações florestais (RIVELA *et al.*, 2007).

Desde então, diversos trabalhos trataram de temas relacionados à LCA de diferentes classes de produtos derivados de madeira destinados a usos na construção civil, como peças de madeira estruturais (DIAS, 2022; KUKA *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2021), painéis de madeira (BIANCO *et al.*, 2021; ARAÚJO *et al.*, 2022; FARJANA *et al.*, 2023; RIVELA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2013), e sistemas de piso ou cobertura (DIAS, André M.A. *et al.*, 2021; DOSSCHE *et al.*, 2018; ISLAM *et al.*, 2015b).

Os estudos da área usualmente objetivam avaliar o desempenho ambiental global de diferentes produtos derivados da madeira, assim como identificar os processos com maiores *hotspots*. No entanto, existem diferenças entre os estudos de LCA de produtos à base de madeira, sobretudo relacionadas com a definição dos limites do sistema (do berço ao portão versus do berço ao túmulo), bem como com a qualidade dos dados do inventário do ciclo de vida (ou seja, conjuntos de dados primários ou secundários) e seleção de categorias e métodos de impacto ambiental para a avaliação do impacto do ciclo de vida (FERRO *et al.*, 2018).

Especificamente relacionado com LCA de painéis OSB, ainda existem poucas pesquisas disponíveis. Foram encontradas pesquisas que se basearam em relatórios anteriores para fornecer uma LCA do berço ao portão de OSB produzidas nos EUA com o objetivo de fornecer informações para o desenvolvimento de declarações ambientais de produtos (EPD) (PUETTMANN *et al.*, 2016). Estudos foram realizados com o objetivo de comparar o desempenho ambiental do antigo e do atual processo de produção de OSB comercial fabricado em Luxemburgo (BENETTO *et al.*, 2009). Também foram avaliados os impactos ambientais

associados à produção brasileira de OSB comercial, a fim de propor alternativas de melhoria focadas na melhoria do seu perfil (FERRO *et al.*, 2018).

A identificação dos principais *hotspots* ambientais no ciclo de vida do OSB pode auxiliar a indústria a melhorar seu perfil ambiental, indicando que novas pesquisas devem se concentrar em explorar diferentes tipos de materiais e técnicas que possam ser aplicados no painel OSB (FERRO *et al.*, 2018).

Nota-se, portanto, que as pesquisas já realizadas se limitaram a avaliar apenas os produtos já disponíveis no mercado, existindo escassez de trabalhos relacionados com a avaliação de painéis produzidos com materiais e técnicas alternativas.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visto isto, após a revisão bibliográfica constatou-se insuficiência de estudos que avaliaram as propriedades de painéis OSB produzidos com alternativas mais ecológicas, com foco na avaliação das propriedades para utilização como componente construtivo, visando sua aplicação na construção civil, comprovando assim o caráter inovador dessa pesquisa do ponto de vista científico e tecnológico.

Durante a execução da revisão bibliográfica, não foram encontrados trabalhos com painéis OSB produzidos com madeira de *Eucalyptus* sem aplicação de tratamento químico preservativo e utilizando como adesivo a poliuretana bicomponente derivada do óleo de mamona. De mesmo modo, não foram encontrados trabalhos que relatem os efeitos do tratamento térmico em painéis desse tipo ou que avaliem a variação das proporções entre as camadas face:núcleo:face com objetivo de indicar aplicações estruturais.

Também se verificou lacunas de conhecimento com relação a estudos sobre a LCA e biodegradação por térmitas em painéis OSB fabricados com materiais alternativos, não sendo encontrada nenhuma pesquisa que se assemelhe à proposta desse trabalho de doutorado.

## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção encontram-se particularizados o preparo da matéria-prima e a metodologia utilizada para execução dos ensaios realizados para avaliação das propriedades físicas, mecânicas e resistência ao ataque biológico dos painéis fabricados.

Os procedimentos metodológicos utilizados para a produção, tratamento térmico e análise estatística dos painéis desenvolvidos são detalhados no Capítulo 5. E a metodologia utilizada para a LCA dos painéis é descrita no Capítulo 7.

### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 Madeira

A madeira de reflorestamento de *Eucalyptus grandis* para o desenvolvimento desta pesquisa foi doada pela empresa Vale do Cedro sem aplicação de nenhum tipo de tratamento preservativo, e apresentava idade de 7 anos, densidade básica de 520 kg/m<sup>3</sup>, sendo proveniente de floresta plantada na região Sudoeste do Estado de São Paulo.

#### 4.1.2 Adesivo

O adesivo utilizado foi o IMPERVEG® AGT 1315 (Figura 9) que se constitui de uma resina a base de poliuretano vegetal (originada do óleo de mamona), bicomponente, e foi doado pela empresa Imperveg. Trata-se de um adesivo 100% sólido (isento de solventes) que não libera vapores tóxicos, formulado pela mistura a frio de um pré-polímero (componente A) e um polioli (componente B), resultando em polímeros com diferentes características, de excepcional estabilidade físico-química, elasticidade, impermeabilidade, sendo utilizado como adesivo e aglomerante para formação de compósitos com fibras vegetais, pó de serragem de madeiras, inservíveis e outros (IMPERVEG, 2021).

Figura 9 - IMPERVEG® AGT 1315



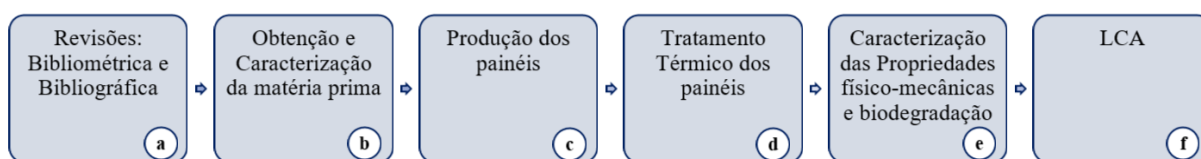
Fonte: Produção do próprio autor.

Ainda de acordo com o fabricante, o adesivo apresenta consistência fluida, cor âmbar após cura, perda de massa somente após 210 °C, secagem ao toque entre 60 e 90 minutos dependendo da temperatura ambiente, tempo mínimo de retirada do molde de 6 horas e tempo de cura e manuseio de 24 horas, possui excelente resistência à ação do intemperismo e águas contendo substâncias agressivas (sais, ácidos e álcalis). Os compósitos obtidos com esta resina apresentam alta durabilidade, grande resistência aos raios ultravioleta, estanqueidade a líquidos e gases, excelente penetração nos poros da superfície, garantindo uma boa aderência e não apresenta retração volumétrica após a cura (IMPERVEG, 2021).

## 4.2 MÉTODOS

A Figura 10 resume com um fluxograma as principais etapas realizadas para o desenvolvimento desta pesquisa e o mapeamento das informações na tese.

Figura 10 - Principais etapas para realização do estudo



Fonte: Produção do próprio autor.

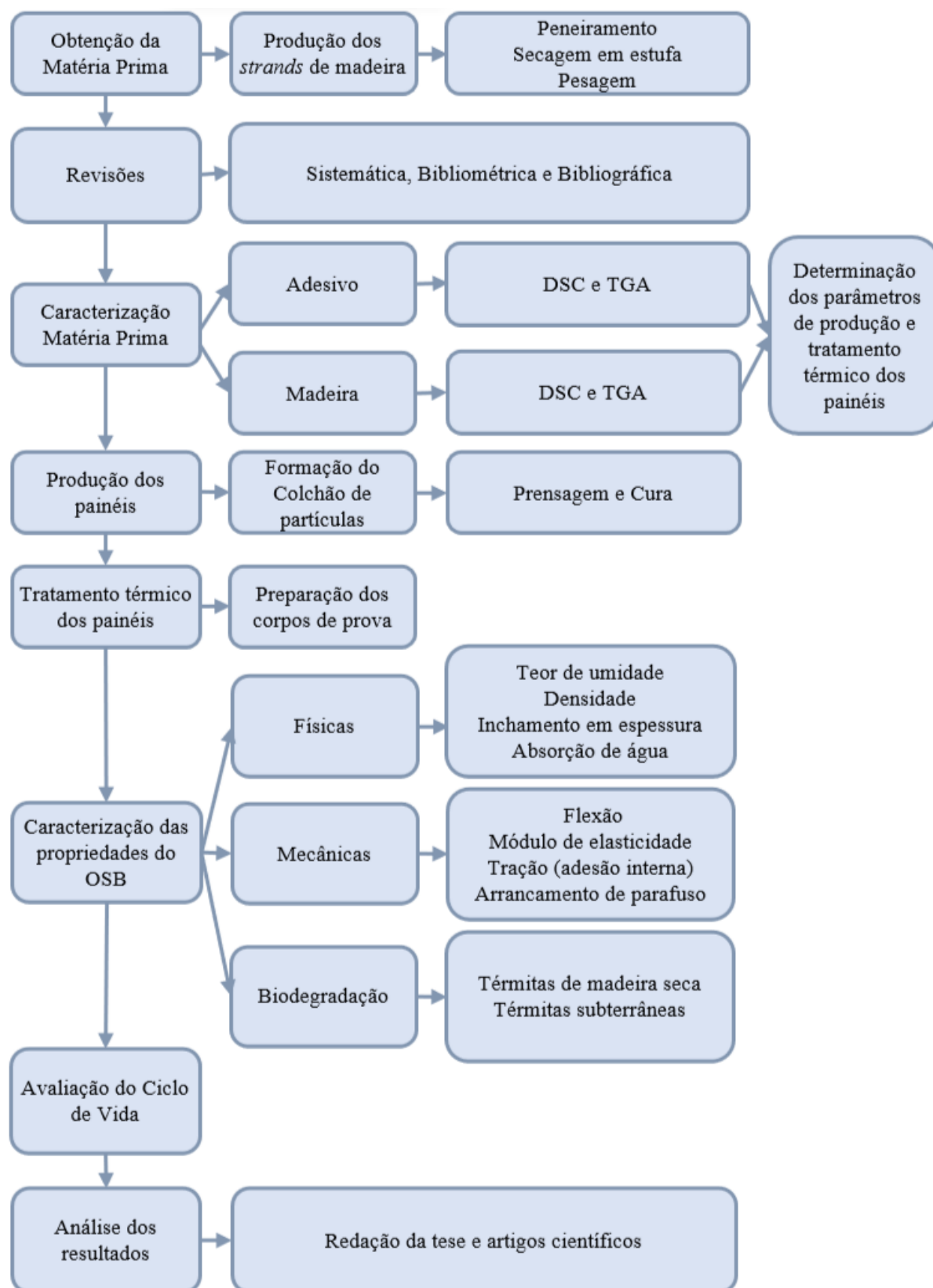
Sendo:

- a) Revisão Bibliométrica (Capítulo 2) e Bibliográfica (Capítulo 3).
- b) Obtenção, Preparo (Capítulo 4) e Caracterização da matéria-prima (Capítulo 5).
- c) Produção dos Painéis (Capítulo 5).
- d) Tratamento Térmico dos Painéis (Capítulo 5).
- e) Caracterização das Propriedades Físicas e Mecânicas dos Painéis - Metodologia (Capítulo 4), Resultados e Análise estatística (Capítulo 5). Caracterização da Biodegradação por térmitas - Metodologia (Capítulo 4), Resultados e Análise estatística (Capítulo 6).
- f) Avaliação do Ciclo de Vida - LCA (Capítulo 7).

Já o fluxograma de trabalho ilustrado na

Figura 11 lista todas as etapas efetuadas na execução desta tese.

Figura 11 - Fluxograma de trabalho



Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.2.1 Preparo dos *strands*

A Figura 12 detalha o preparo das partículas (*strands*). Após a aquisição da matéria-prima, foi efetuado o processamento da madeira de eucalipto para a obtenção dos *strands*. As tábuas de eucalipto (Figura 12a) foram seccionadas em pedaços menores (Figura 12b) e imersas em água (Figura 12c) para facilitar o corte dos *strands* no gerador de partículas de madeira (Modelo Marconi MA 685, Figura 12d).

Figura 12 - Preparo dos strands



Fonte: Produção do próprio autor.



Depois de picados, os *strands* foram dispostos em lona plástica para perda natural de umidade por um período de 7 dias. Em seguida, passaram por peneiramento e classificação para retirada do excesso de finos, (Figura 12e) e posteriormente foram levados para secagem em estufa temperatura de  $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Modelo Marconi MA 035/3BX, Figura 12f) até atingir teor de umidade de aproximadamente 3%.

Na sequência, os *strands* secos em estufa foram devidamente resfriados (Figura 12g) e embalados em sacos plásticos (Figura 12h) para aguardar a confecção dos painéis.

#### 4.2.2 Execução dos ensaios físicos e mecânicos

Neste item estão descritos os procedimentos utilizados na realização dos ensaios para avaliação das propriedades dos painéis produzidos.

Para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos utilizou-se como referência para execução dos procedimentos e classificação, documentos normativos europeus devido à inexistência de norma brasileira para painéis do tipo OSB.

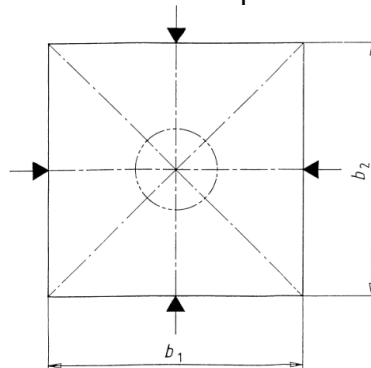
##### 4.2.2.1 Ensaios físicos

###### 4.2.2.1.1 Densidade (D)

A densidade (D) aparente dos painéis foi aferida conforme as orientações da EN 323 (BSI, 1993e). Foram utilizados dez corpos-de-prova (cps) nas dimensões de 50 x 50mm, que tiveram sua espessura (*e*) aferida no ponto de intersecção das suas diagonais fazendo uso de um micrômetro e as demais medidas (*b1* e *b2*) foram realizadas utilizando-se um paquímetro, de acordo com o esquema mostrado na Figura 13.

Utilizando uma balança analítica com resolução de 0,01 g foram determinadas as respectivas massas dos cps e em seguida, calculou-se a densidade de acordo com a Equação 1.

Figura 13 - Densidade: esquema de medições



Fonte: Adaptado da BSI (1993e).

$$D = \frac{M}{b_1 \times b_2 \times e} \times 10^6 \quad (1)$$

Onde:

$D$  é a densidade dos cps (kg/m<sup>3</sup>);

$M$  é a massa dos cps (g);

$b_1$ ,  $b_2$  são as dimensões dos cps como definido na Figura 13 (mm);

$e$  é a espessura dos cps (mm).

#### 4.2.2.1.2 Teor de umidade (MC)

O ensaio do teor de umidade (MC) foi baseado na EN 322 (BSI, 1993d). Foram utilizados dez cps para cada tratamento com dimensões a e b semelhantes aos utilizados na aferição da densidade (aproximadamente 50 x 50 mm). Os cps foram pesados em balança analítica com resolução 0,01 g para aferição da massa, em seguida foram levados para secagem em estufa à temperatura de 103 °C ± 2 °C até alcançar constância de massa. Após o resfriamento dos cps até a temperatura ambiente no dessecador, cada cp foi novamente pesado com rapidez suficiente para evitar um aumento de umidade superior a 0,1%. O teor de umidade foi então calculado de acordo com a Equação 2.

$$MC = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$MC$  é o teor umidade dos cps (%);

$M_i$  é a massa inicial dos cps (g);

$M_f$  é a massa seca dos cps (g).

#### 4.2.2.1.3 Teor de inchamento após 24h (TS)

Os cps para o ensaio de inchamento após 24h (I) assim como os utilizados para a determinação da  $D$  e do  $MC$  foram quadrados com medidas aproximadas de 50 ± 1 x 50 ± 1 mm conforme recomendado pela EN 317 (BSI, 1993b). A espessura de cada corpo de prova ( $E_i$ ) foi medida com uma precisão de ± 0,01 mm na intersecção das diagonais. Os cps foram

imersos em água deionizada e após 24 h aferiu-se novamente a espessura ( $E_f$ ). Utilizando-se a Equação 3 foram obtidos os resultados de inchamento após 24h, em porcentagem.

$$TS = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$TS$  é o inchamento em espessura dos cps (%);

$E_f$  é a espessura dos cps após o período de imersão (mm);

$E_i$  é a espessura dos cps antes da imersão (mm).

#### **4.2.2.1.4 Absorção de água (WA)**

O ensaio de absorção de água (WA) foi realizado em paralelo ao ensaio de inchamento após 24h. A massa dos cps foi aferida antes e após o período de imersão em água deionizada. O cálculo da absorção foi obtido a partir da Equação 4.

$$WA = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

$WA$  é a absorção de água dos cps (%);

$M_i$  é a massa inicial dos cps antes da imersão (g);

$M_f$  é a massa dos cps após o período de imersão (g).

#### **4.2.2.2 Ensaios mecânicos**

##### **4.2.2.2.1 Módulo de Elasticidade (MOE)**

O ensaio referente ao Módulo de Elasticidade (MOE) foi realizado de modo paralelo aos ensaios para a determinação do Módulo de Resistência à Flexão Estática nas direções paralela e perpendicular, sendo baseados na EN 310 (BSI, 1993a). O cálculo do MOE foi obtido a partir da Equação 5.

$$MOE = \frac{l_1^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times bt^3 \times (a_2 - a_1)} \quad (5)$$

Onde:

$MOE$  é o módulo de elasticidade (MPa);

$F_2 - F_1$  é o incremento da carga na porção em linha reta da curva carga-deflexão, (Figura 14).

$F_1$  deve ser de aproximadamente 10% e  $F_2$  deve ser de aproximadamente 40% da carga máxima (N);

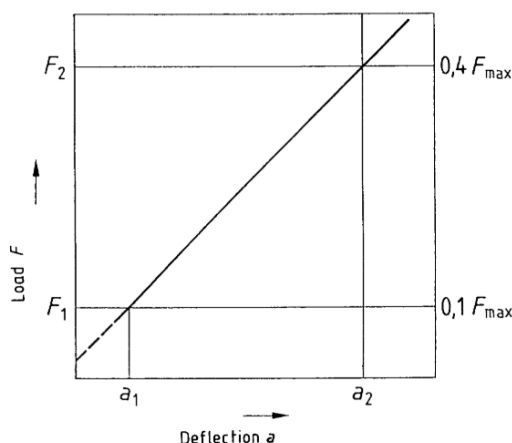
$l_1$  é a distância entre os apoios do aparelho (mm);

$a_2 - a_1$  é o incremento da deflexão no meio do corpo de prova (correspondente a  $F_2 - F_1$  (mm);

$b$  é a largura do corpo de prova (mm); e

$t$  é a espessura do corpo de prova (mm).

Figura 14 - Curva de carga-deflexão dentro da faixa de deformação elástica



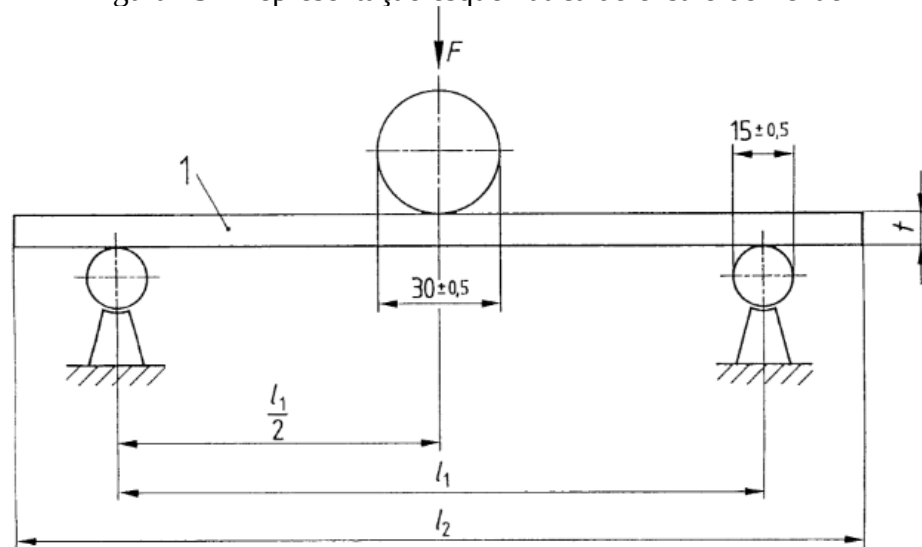
Fonte: Adaptado da BSI (1993a).

#### 4.2.2.2.2 Flexão estática paralela (MOR-pa) e perpendicular (MOR-pe)

Os ensaios para a determinação do Módulo de Resistência à Flexão Estática nas direções paralela (MOR-pa) e perpendicular (MOR-pe) foram realizados na máquina universal de ensaios e baseados na EN 310 (BSI, 1993a).

A Figura 15 ilustra a representação esquemática do aparato utilizado na realização do ensaio e dimensões dos cps, cujo comprimento era de 20 vezes a espessura do cp + 50 mm. A espessura foi aferida na intersecção das diagonais com um micrômetro e as demais dimensões com um paquímetro. Utilizou-se a Equação 6 para o cálculo de MOR-pa e MOR-pe.

Figura 15 - Representação esquemática do ensaio de flexão



Fonte: Adaptado da BSI (1993a)

$$MOR = \frac{3 \times F_{max} \times l_1}{2 \times bt^2} \quad (6)$$

Onde:

$MOR$  é o módulo de resistência à flexão elástica (MPa);

$F_{max}$  é a carga de ruptura lida no indicador de cargas (N);

$l_1$  é a distância entre apoios do aparelho (mm);

$b$  é a largura do corpo de prova (mm); e

$t$  é a espessura média tomada em três pontos do corpo de prova (mm).

#### 4.2.2.2.3 Resistência à tração perpendicular ou adesão interna (IB)

Os ensaios para determinação da Resistência à tração perpendicular foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC e baseados na EN 319 (BSI, 1993c). Foram utilizados corpos-de-prova com dimensões laterais de aproximadamente de 50 x 50 mm, fixados em sapatas de madeira utilizando adesivo instantâneo Tekbond® (Etilcianoacrilato).

A Figura 16 ilustra o aparato utilizado para a execução do ensaio na máquina universal de ensaios EMIC. O cálculo da IB foi obtido a partir da Equação 7.

Figura 16 - Aparato para realização do ensaio de adesão interna



Fonte: Produção do próprio autor.

$$IB = \frac{F_{max}}{(a \times b)} \quad (7)$$

Onde:

$IB$  é a resistência à tração perpendicular (N/mm<sup>2</sup>);

$F_{max}$  é a carga na ruptura (N); e

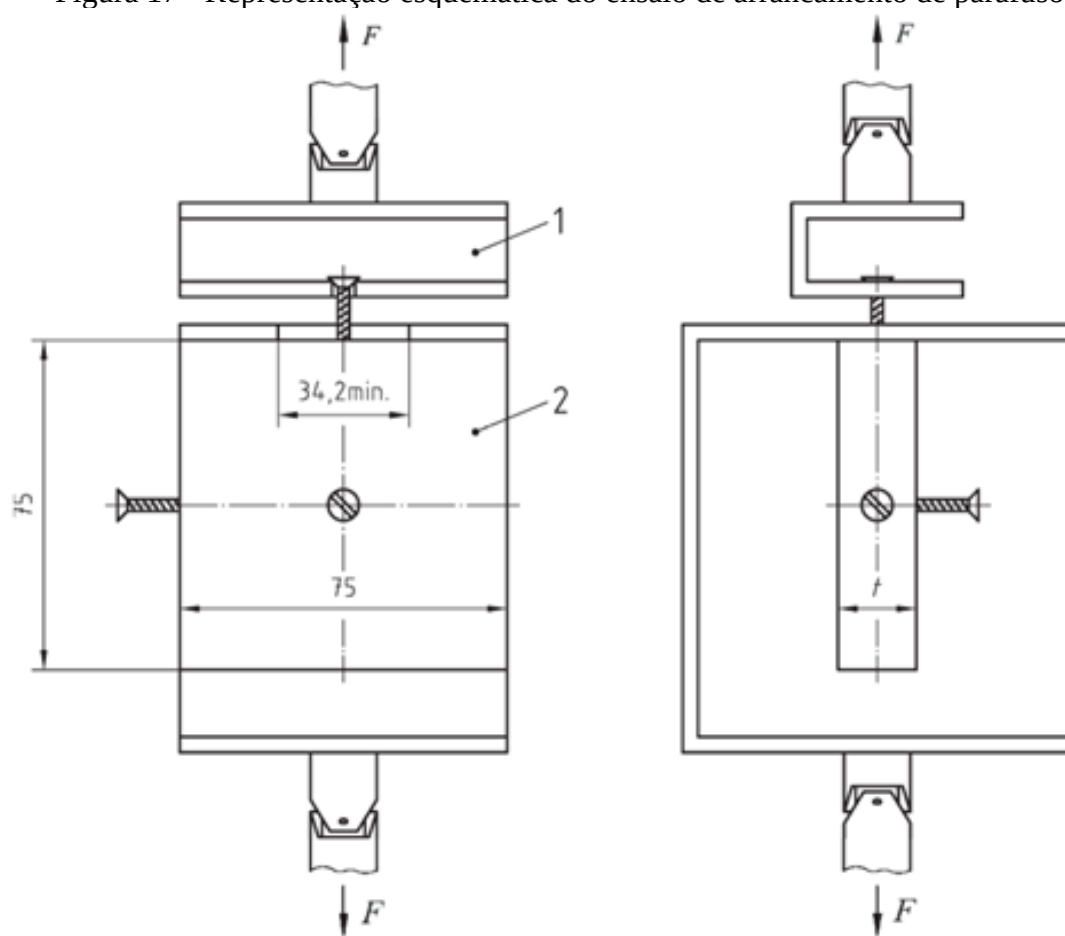
$a$  e  $b$  são as dimensões do corpo de prova (mm).

#### 4.2.2.2.4 Resistência ao Arrancamento de Parafuso (PS-s e PS-t)

Os ensaios de Resistência ao Arrancamento de Parafuso na superfície do cp (PS-s) e Resistência ao Arrancamento de Parafuso no topo do cp (PS-t) seguiram os procedimentos determinados na EN 320 (BSI, 2011). Os corpos-de-prova foram seccionados em formato quadrado, com 75 mm de lado, foi traçada uma diagonal para encontrar a intersecção para a posterior fixação dos parafusos de acordo com o tipo de ensaio.

Os furos para a fixação dos parafusos nas faces e topos dos corpos-de-prova foram realizados com furadeira e a inserção dos parafusos foi feita manualmente utilizando chave de fenda conforme posicionamento ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Representação esquemática do ensaio de arrancamento de parafuso



Fonte: Adaptado da BSI (2011).

Conforme norma, foram utilizados parafusos de haste paralela, tamanho nominal 4,2 mm  $\times$  38 mm, com rosca n°. ST 4.2 com passo da rosca de 1,4 mm. Os corpos-de-prova foram acoplados em suportes específicos para o teste, e leitura da força máxima necessária para arrancar o parafuso a uma taxa de 10 mm/min, foi feita no indicador da máquina universal e expressos em Newtons (N).

#### 4.2.3 Execução dos ensaios de biodegradação

Neste item estão descritos os procedimentos utilizados para a realização dos ensaios de biodegradação quanto ao ataque de térmitas xilófagas.

Para avaliação das propriedades foram considerados 7 tratamentos, sendo T1 a T6 os painéis experimentais e T7 painéis comerciais (fabricados no Brasil e adquiridos em loja de material de construção), conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Ensaio de biodegradação: Tratamentos avaliados

| Tratamento | Tipo de painel | Temperatura <sup>1</sup>          | Composição <sup>2</sup> |
|------------|----------------|-----------------------------------|-------------------------|
| T1         | Experimental   | Referência, Sem tratamento (0 °C) | 25:50:25                |
| T2         | Experimental   | Referência, Sem tratamento (0 °C) | 30:40:30                |
| T3         | Experimental   | 175 °C                            | 25:50:25                |
| T4         | Experimental   | 175 °C                            | 30:40:30                |
| T5         | Experimental   | 200 °C                            | 25:50:25                |
| T6         | Experimental   | 200 °C                            | 30:40:30                |
| T7         | Comercial      | Sem tratamento                    | -                       |

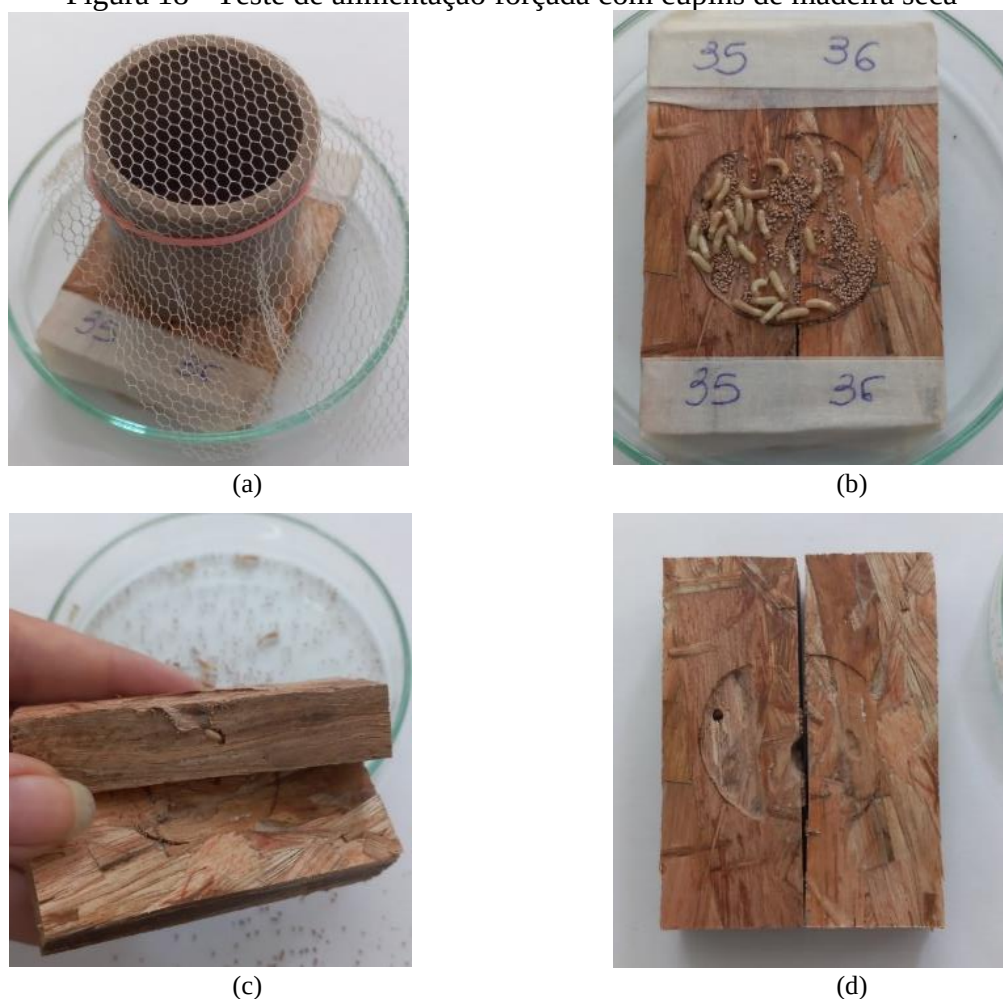
Nota: <sup>1</sup> Temperatura de tratamento térmico. <sup>2</sup> Proporção de camadas OSB face:core:face.

Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.2.3.1 Resistência a térmitas de madeira seca (alimentação forçada)

O teste (Figura 18) foi realizado de forma adaptada, com base nos procedimentos definidos pelo método IPT/DIMAD D-2 (IPT/DIMAD, 1980).

Figura 18 - Teste de alimentação forçada com cupins de madeira seca



Nota: (a) Aparato completo, início do teste. (b) Vista superior da amostra após desmontagem do aparato. (c) Vista lateral da amostra durante a contagem de cupins. (d) Amostra após contagem de cupins.

Fonte: Produção do próprio autor.



Cupins da espécie *Cryptotermes brevis* Walker foram coletados em peças de madeira e móveis atacados no município de Jerônimo Monteiro, Estado do Espírito Santo, Brasil. Foram utilizadas 10 amostras por tratamento, com dimensões  $2,3 \times 7,0 \times 1,2$  cm (lado a  $\times$  lado b  $\times$  espessura).

A massa das amostras foi medida após secagem em estufa a  $60 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . As amostras foram preparadas em placas de Petri unidas aos pares com fita adesiva nas extremidades e acima de cada par, e um recipiente de policloreto de vinila (PVC) medindo  $3,5 \text{ cm} \times 4,0 \text{ cm}$  (diâmetro  $\times$  altura) foi conectado com parafina.

De forma semelhante à utilizada por Gonçalves *et al.* e Paes *et al.* (GONÇALVES *et al.*, 2022; PAES *et al.*, 2022) 40 cupins (39 operários e 1 soldado) da espécie *Cryptotermes brevis* Walker, foram inseridos em cada recipiente. A parte superior dos tubos foi revestida com tecido tipo “tule” para evitar que os cupins fossem comidos por predadores, como formigas, aranhas e lagartixas. O teste foi mantido por 45 dias em sala climatizada, com temperatura de  $28 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $65 \pm 5\%$ . Em seguida, as amostras foram expostas, em estufa, nas mesmas condições citadas, e obtida a perda de massa.

A quantidade de cupins indicada por cada normativa é diferente. Mas é importante utilizar uma quantidade adequada e compatível com as amostras. A presença de soldados ajuda a garantir uma intensidade de ataque análoga à observada numa colônia. Ao mesmo tempo, o número de operários torna-se também importante, uma vez que poucos operários serão incapazes de manter a estrutura social tornando-se vulneráveis a microrganismos concorrentes, enquanto demasiados cupins podem sobrecarregar os recursos e gerar tensões que podem alterar o comportamento alimentar (HASSAN; MORRELL, 2021).

Foram consideradas na avaliação a perda de massa, mortalidade de cupins e danos causados por cupins onde foram adotadas pontuações para avaliações visuais, sendo 0 (nenhum desgaste); 1 (desgaste superficial); 2 (desgaste moderado); 3 (desgaste acentuado); e 4 (desgaste profundo), baseadas na IPT/DIMAD D-2 (IPT/DIMAD, 1980).

#### 4.2.3.2 Resistência a térmitas subterrâneas (alimentação forçada)

Os testes de alimentação com escolha reproduzem de perto as condições naturais, sendo mais apropriados para avaliar as preferências alimentares ou a resistência a substâncias nocivas do que os testes sem escolha (forçada). No entanto, é problemático concluir se a mortalidade em um teste sem escolha é causada por fatores de resistência não tóxicos ou devido à toxicidade química. Desta forma, os testes sem escolha são fundamentalmente testes de fome, portanto,

interferências na alimentação resultam em fome e alta mortalidade, sejam as amostras tóxicas ou não (HASSAN; MORRELL, 2021).

Dessa forma, foi realizado teste de alimentação forçada com cupins subterrâneos seguindo o procedimento proposto pela AWWPA E1-16 (AWPPA, 2016) com cupins da espécie *Nasutitermes corniger* Motsch., coletados na área rural do município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.

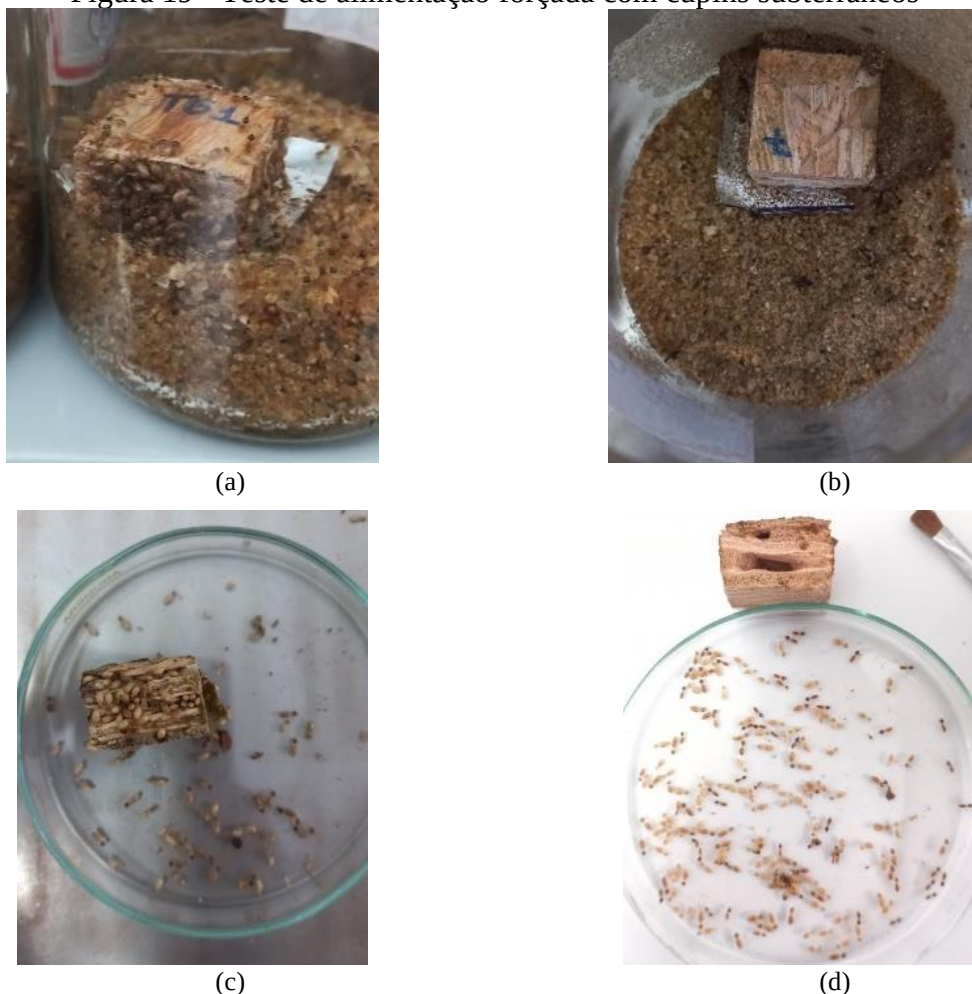
Foram utilizadas dez amostras por tratamento com dimensões de  $2,5 \times 2,5 \times 1,2$  cm (lado a  $\times$  lado b  $\times$  espessura), secas em estufa a  $60 \pm 2$  °C até atingir massa constante. As amostras (Figura 19) foram acondicionadas em recipientes de vidro com capacidade para 600 ml, protegidos do contato direto com areia por meio da aplicação de uma folha de alumínio com dimensões um pouco maiores que as apresentadas pelas amostras.

A areia foi previamente lavada, peneirada, esterilizada em estufa a 130 °C e umedecida com água destilada de acordo com sua capacidade de retenção de água de forma semelhante à utilizada por Paes *et al.* (2022).

Nos recipientes foram inseridos aproximadamente 400 indivíduos (cupins) ( $1,32 \pm 0,05$  g), na proporção existente na colônia (12% soldados e 88% operários).

O teste foi realizado em sala climatizada a  $28 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $65 \pm 5\%$  durante 28 dias. A perda de massa, a mortalidade dos cupins e os danos visuais causados pelos cupins aos espécimes foram avaliados por pontuações (classificações).

Figura 19 - Teste de alimentação forçada com cupins subterrâneos



*Nota: (a) Vista lateral do recipiente com a amostra. (b) Vista superior do recipiente com a amostra. (c) Amostra antes da contagem de cupins. (d) Amostra após contagem de cupins.*

Fonte: Produção do próprio autor.

Para o dano, foram atribuídas classificações (*score* ou pontuação) aos corpos-de-prova, de forma adaptada à AWPA E1-16 (AWPA, 2016), sendo: 10 (Sadio, escarificações superficiais permitidas), 9 (Ataque superficial), 7 (Ataque moderado, com penetração), 4 (Ataque intenso), 0 (Falha, com ruptura das amostras). Para mortalidade, os índices considerados foram: Baixa (0 - 33%), Moderada (34 - 66%), Alta (67 - 99%) e Total (100%).

#### 4.2.3.3 Ensaios de biodegradação - Análises estatísticas

Um delineamento inteiramente casualizado composto por 10 repetições por tratamento foi utilizado para analisar os resultados dos ensaios de alimentação forçada de cupins de madeira seca e cupins subterrâneos.

O teste de contraste de médias de Tukey, ao nível de significância de 5%, foi utilizado para verificar possíveis diferenças nos valores médios das propriedades avaliadas considerando

os sete tratamentos investigados. Esta abordagem permite comparar os resultados dos painéis fabricados e considerar também os resultados dos painéis comerciais.

O teste de Anderson-Darling (AD - 5% de significância) e o teste de comparações múltiplas (CM - 5% de significância) foram utilizados para verificar a normalidade e homogeneidade das variâncias entre os tratamentos, a fim de validar ( $p\text{-valor} \geq 0,05$ ) os resultados do teste de Tukey bem como os resultados da análise de variância (ANOVA - 5% de significância). A transformação de Johnson (mudança de escala) foi utilizada nos casos em que não foi detectada normalidade na distribuição dos resíduos da ANOVA.

A ANOVA também foi utilizada para avaliar a influência (valor de  $p < 0,05$ ) da temperatura (T), composição da camada (Comp), bem como efeitos de interação ( $T \times \text{Comp}$ ) entre esses dois fatores para as três propriedades consideradas (perda de massa, danos e mortalidade).

Os resultados da análise de variância foram apresentados através do gráfico de Pareto, os efeitos de cada fator isolado, quando significativos, foram apresentados graficamente através de gráficos de efeitos principais e os efeitos de interação foram apresentados através de gráficos de interação entre fatores. Esta abordagem, em que não são considerados painéis comerciais, permite identificar a influência de fatores isoladamente, bem como a interação entre eles.

## 5 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS OSB

Neste capítulo é apresentado o conteúdo derivado do artigo intitulado “*Study of the Influence of Heat Treatment on OSB Panels Produced with Eucalyptus Wood in Different Layer Compositions*” de Sugahara, E., Dias, A., Arroyo, F., Christoforo, A., Costa, M. L., Botelho, E. C., Dias, A. M. P. G., & Campos, C. publicado na revista *Forests* v. 13 (12), 2083, p. 1-18, 2022, doi:10.3390/f13122083 (SUGAHARA *et al.*, 2022b), o qual apresenta os materiais utilizados, os procedimentos metodológicos e resultados obtidos na caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos neste trabalho (Figura 20).

Figura 20 - Artigo: Study of the Influence of Heat Treatment on OSB...




---

Article

### Study of the Influence of Heat Treatment on OSB Panels Produced with Eucalyptus Wood in Different Layer Compositions

Estefani Sugahara <sup>1,2,\*</sup> , Andre Dias <sup>2,3</sup> , Felipe Arroyo <sup>4</sup> , Andre Christoforo <sup>4</sup> , Michelle L. Costa <sup>1,5</sup>, Edson C. Botelho <sup>1</sup>, Alfredo M. P. G. Dias <sup>2,3</sup> and Cristiane Campos <sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Materials and Technology Department, School of Engineering, São Paulo State University (UNESP), Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha 333, Guaratinguetá 12516-410, Brazil

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering, University of Coimbra, R. Luis Reis dos Santos 290, 3030-790 Coimbra, Portugal

<sup>3</sup> SerQ, Innovation and Competence Forest Centre, Rua J 9, 6100-711 Sertão, Portugal

<sup>4</sup> Exact Sciences and Technology Center, Federal University of São Carlos, Rod. Washington Luiz, São Carlos 13565-905, Brazil

<sup>5</sup> LEL/IPT, Lightweight Structures Laboratory, Estrada Dr. Altino Bondensan 500, São José dos Campos 12230-002, Brazil

\* Correspondence: estefani.sugahara@unesp.br

**Abstract:** In view of the lack of studies aimed at producing and assessing the effects of heat treatment of Oriented Strand Board (OSB) panels, this paper evaluated the thermal degradation kinetics of the raw materials, and the physical and mechanical properties of the panels made with eucalyptus wood and castor oil-based polyurethane adhesive. The OSB panels were subjected to post-production heat treatment (at 175 and 200 °C), replacing the use of wood chemical preservatives. Furthermore, the quantity of materials varied in the face:core:face layers in the proportions of 25:50:25 and 30:40:30, aiming to evaluate the possibility of structural applications for the panels. The results were statistically analyzed and compared with the specifications and classifications for OSB indicated by the European Standard EN 300 and the literature. The application of heat treatment improved the physical properties by decreasing the interaction with water and did not reduce the mechanical properties below the recommended levels. The variation in layer proportions indicated that all of them can be adopted without compromising the panel's physical-mechanical performance. All treatments are compatible with the EN 300 classification for OSB/4 (heavy duty load-bearing boards for use in humid conditions), presenting technical feasibility and excellent structural profile for civil construction applications.

**Keywords:** *Eucalyptus grandis*; thermal treatment; wood-products; bio-composite; castor oil; physical properties; mechanical properties

 **check for updates**

**Citation:** Sugahara, E.; Dias, A.; Arroyo, F.; Christoforo, A.; Costa, M.L.; Botelho, E.C.; Dias, A.M.P.G.; Campos, C. Study of the Influence of Heat Treatment on OSB Panels Produced with Eucalyptus Wood in Different Layer Compositions. *Forests* **2022**, *13*, 2083. <https://doi.org/10.3390/f13122083>

Academic Editor: Ian D. Hartley

Received: 11 November 2022  
Accepted: 5 December 2022  
Published: 7 December 2022

**Fonte:** Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

## 5.1 RESUMO DO CAPÍTULO

Tendo em vista a carência de estudos voltados para a produção e avaliação dos efeitos do tratamento térmico de painéis *Oriented Strand Board* (OSB), este trabalho avaliou a cinética de degradação térmica das matérias-primas e as propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados com madeira de eucalipto e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Os painéis OSB foram submetidos a tratamento térmico pós-produção (a 175 e 200°C), em substituição ao uso de conservantes químicos para madeira. Além disso, a quantidade de materiais variou nas camadas face:núcleo:face nas proporções de 25:50:25 e 30:40:30, visando avaliar a possibilidade de aplicações estruturais para os painéis. Os resultados foram analisados estatisticamente e comparados com as especificações e classificações para OSB indicadas pela Norma Europeia EN 300 e pela literatura. A aplicação do tratamento térmico melhorou as propriedades físicas diminuindo a interação com a água e não reduziu as propriedades mecânicas abaixo dos níveis recomendados. A variação nas proporções das camadas indicou que todas elas podem ser adotadas sem comprometer o desempenho físico-mecânico do painel. Todos os tratamentos são compatíveis com a classificação EN 300 para OSB/4 (painéis estruturais de suporte de carga pesada para uso em condições úmidas), apresentando viabilidade técnica e excelente perfil estrutural para aplicações na construção civil.

**Palavras-chave do capítulo:** *Eucalyptus grandis*; Tratamento térmico; Produtos de madeira. Biocompósitos; Óleo de mamona; Propriedades físicas; Propriedades mecânicas.

## 5.2 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de alcançar um desenvolvimento sustentável, que atenda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades (UN, 1987), os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram definidos em 2015 pelas Nações Unidas, também conhecidos como Objetivos Globais. Os 17 ODS são integrados, o que implica que a ação em uma área afetará os resultados em outras e que o desenvolvimento deve equilibrar a sustentabilidade social, econômica e ambiental. Desta forma, criatividade, *know-how*, tecnologia e recursos financeiros de toda a sociedade são necessários para alcançar os ODS em todos os contextos (UN, 2015).

De acordo com o 9º ODS - “Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar inovação” (UN, 2022), o desenvolvimento de materiais tecnológicos e sustentáveis ganha cada vez mais relevância no setor da construção

civil levando muitas organizações em todo o mundo a buscarem medidas que contribuam para o bem-estar da humanidade através de uma melhor qualidade de vida.

Hoje em dia, vários tipos diferentes de materiais podem ser usados como soluções para a sustentabilidade da infraestrutura (BOTELHO *et al.*, 2001, 2007; GAEFKE *et al.*, 2007). Neste contexto, a otimização de sistemas prediais está aumentando devido à necessidade de redução de custos e minimização de resíduos (CABRAL *et al.*, 2015). A proposta de materiais tecnológicos e sustentáveis engloba os diversos produtos compósitos derivados de material lignocelulósico, com destaque para os painéis de madeira. Este painel apresenta aplicação crescente em diversos segmentos (BARBIRATO *et al.*, 2019a), estando inserido na classe de produtos que auxiliam na industrialização da construção. Paralelamente, o menor impacto ambiental dos edifícios de madeira foi comprovado através de pesquisas e realizado através de aplicações duráveis que resultam em mecanismos que fixam o carbono e substituem materiais não renováveis (KOKUBUN, 2014).

Um dos produtos de madeira mais utilizados na construção é o *Oriented Strand Board* (OSB). Este painel é comumente composto por três camadas de longas partículas de madeira orientadas (*strands*) de um determinado formato e espessura, unidas por um adesivo onde as partículas das camadas externas estão alinhadas e dispostas paralelamente ao comprimento do painel. A camada interna é geralmente orientada perpendicularmente à direção das partículas de madeira nas camadas externas (BSI, 2006).

Em uma comparação de dados entre os anos de 2015 e 2019, a produção global de painéis OSB aumentou aproximadamente 17%, enquanto o consumo aumentou aproximadamente 20%, demonstrando um aumento no consumo e na produção de OSB em todo o mundo (FAO, 2021). Assim, o fato de os painéis serem cada vez mais utilizados na indústria da construção está relacionado à tendência contemporânea de escolha de materiais com baixo impacto ambiental e sistemas construtivos mais leves, com menor geração de resíduos e menor tempo de execução (POZZER *et al.*, 2020).

Como resultado, o OSB tem sido cada vez mais aceito no mercado da construção e é amplamente aplicado como painel estrutural ou não estrutural (WANG *et al.*, 2019), por apresentar excelentes propriedades tecnológicas, físicas e mecânicas (DEL MENEZZI *et al.*, 2008a). Este material é utilizado em telhados, paredes, pisos, elementos estruturais, ou seja, vigas, embalagens e outros componentes (MENDES *et al.*, 2013a).

No Brasil, o OSB comercial é produzido exclusivamente com madeira de *Pinus* (FERRO *et al.*, 2018). O *Pinus* é utilizado principalmente para produção de painéis de partículas no Brasil, principalmente devido à sua densidade, que está na faixa média de 0,35 a 0,45 g/cm<sup>3</sup>.

Espécies de menor densidade permitem a produção de placas OSB de média densidade, garantindo uma taxa de compactação adequada e consequentemente uma área de contato adequada entre as partículas, melhorando a qualidade da prensagem sem a necessidade de aumentar o teor de resina, o que aumenta o custo de produção (SALDANHA, 2004).

Porém, diante da possibilidade de aumento da demanda, a madeira de eucalipto (densidade média entre 0,49 e 0,62 g/cm<sup>3</sup>) é uma boa alternativa ao *pinus* para a fabricação de painéis, já que o eucalipto é uma árvore de rápido crescimento que possui uma ampla gama de espécies e pode atender aos requisitos tecnológicos necessários (GUIMARÃES JÚNIOR, 2008). No processo brasileiro de produção comercial de OSB, o cupinicida é aplicado para aumentar a resistência da madeira ao ataque de organismos que causam sua decomposição. Além disso, resinas de FF e MDI são comumente usadas para unir os *strands* (FERRO *et al.*, 2018), o que indica um padrão de utilização de materiais potencialmente prejudiciais à humanidade e ao meio ambiente na fabricação de OSB.

Contudo, há uma precisão crescente de fabricar produtos mais sustentáveis, justificada pela preocupação progressiva com a qualidade e os impactos econômicos, sociais e ambientais dos processos e produtos (GELDERMANN *et al.*, 2016; SUGAHARA *et al.*, 2022). Além disso, antecipando uma futura insuficiência no provimento de madeira (KLÍMEK *et al.*, 2018) em decorrência de amplo volume de produção industrial utilizando espécies específicas, é imprescindível pesquisar a utilização de diversos tipos de recursos lignocelulósicos (BARBIRATO *et al.*, 2020; CABRAL *et al.*, 2015; FIORELLI *et al.*, 2019; SUGAHARA *et al.*, 2019), e adesivos de origem renovável, sem a presença de compostos orgânicos voláteis em suas composições (BARBIRATO *et al.*, 2020; SUGAHARA *et al.*, 2019), e o uso de opções mais ecológicas aos preservativos químicos (BUZO *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2018; DEL MENEZZI *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2019).

Desta forma, estudos relacionados ao desenvolvimento, avaliação ou comparação de diferentes adesivos e métodos de preservação têm sido realizados a fim de avaliar seu comportamento, impacto e desempenho em produtos de madeira (LI *et al.*, 2022; SUGAHARA *et al.*, 2022a).

O adesivo poliuretano de óleo de mamona é uma resina isenta de formaldeído (BARBIRATO *et al.*, 2020) de origem renovável, derivada do *Ricinus Communis L.*, planta abundante no Brasil. Além disso, por ser altamente resistente à água em comparação com a UF (BUZO *et al.*, 2019), tem apresentado bom desempenho na adesão de partículas de madeira em painéis (BARBIRATO *et al.*, 2019b, 2020; BUZO *et al.*, 2019; LOPES JUNIOR *et al.*, 2021; SUGAHARA *et al.*, 2022a; SUGAHARA *et al.*, 2019).



Houve um aumento considerável pela preferência por materiais duráveis feitos de madeira modificada nos últimos anos. Isso se deve sobretudo à precisão de reduzir a sua manutenção e também em relação às apreensões com a sustentabilidade dos edifícios, diminuindo o uso de conservantes tóxicos e ponderando o ciclo de vida e a energia incorporada dos materiais.

Logo, o tratamento térmico, que utiliza a temperatura (T) promover uma degradação controlada da madeira a fim de aperfeiçoar algumas de suas propriedades (NAVI; SANDBERG, 2011) surgiu como uma opção ecologicamente correta para aprimorar as propriedades intrínsecas da madeira, expandindo seu uso e viabilizando os pré-requisitos (sensibilidade adequada à umidade, estabilidade dimensional, resistência ao desgaste mecânico, resistência à biodeterioração e à radiação UV) necessários para sua aplicação (SANDBERG *et al.*, 2017).

O tratamento térmico pode ser realizado nos *strands* (pré-tratamento) ou no painel acabado (pós-tratamento), e as alterações nas propriedades físicas e mecânicas variam de acordo com o método, temperatura, tempo, teor de adesivo, entre outras variáveis adotadas, não seguindo um padrão específico (SUGAHARA *et al.*, 2022).

Considerando o ocorrido no trabalho de Silva *et al.* (2019), o tratamento térmico em painéis acabados pode ser preferível. Em seu trabalho, os autores realizaram o tratamento térmico em forno convencional de laboratório, sem reposição de atmosfera, em *strands* e painéis acabados a 160, 180 e 200 °C. Porém, devido à geometria delgada característica dos *strands* que possuem pequena espessura e alta área superficial (dimensões nominais de 0,100 × 0,020 × 0,0006 m), durante o tratamento térmico a 200 °C, quando a porta do forno foi aberta e o oxigênio foi liberado para entrar, iniciou-se um incêndio e os *strands* pegaram fogo. Assim, os autores indicaram que o tratamento dos *strands* com este método e temperatura não é recomendado, devido ao risco de combustão.

Outra vantagem na aplicação do pós-tratamento quando comparado ao pré-tratamento se deve ao fato de que, no pós-tratamento, à medida que as partículas são prensadas e compactadas durante a produção do painel, há uma redução significativa no volume do material. Dessa forma, os painéis ocupam menos espaço no forno, necessitando de menos séries de termorretificação para uma mesma quantidade final de painéis.

Embora a literatura apresente vários estudos com resultados expressivos sobre o emprego de tratamento térmico em madeira maciça, em comparação, poucos foram desenvolvidos para o tratamento térmico de OSB. Também são poucos os estudos que avaliam os efeitos do tratamento térmico de OSB produzidos com adesivos alternativos de origem renovável, sem a

presença de solventes e compostos orgânicos voláteis em suas composições. Assim, devido à carência de estudos nesta área, esta é considerada uma área de estudo potencial e que requer atenção, sendo essencial a efetivação de pesquisas com o objetivo de ampliar os conhecimentos relacionados com os resultados do pós-tratamento térmico em OSB, avaliando as implicações deste tipo de procedimento, garantindo a segurança dos materiais produzidos com esta sistemática (SUGAHARA *et al.*, 2022).

Em decorrência do exposto acima, esta pesquisa justifica-se tendo em vista o grande potencial de mercado para produtos derivados de madeira, principalmente no setor de painéis. Portanto, faz-se necessária a realização de estudos com o objetivo de obter materiais produzidos com alternativas mais ecológicas, que possam ser utilizados em escala industrial, que apresentem características inovadoras, eficientes e sustentáveis, que sejam resistentes ao estresse, ao contato com a água e aos agentes biodegradantes.

No entanto, os custos de produção também não deverão aumentar consideravelmente, garantindo o cumprimento das propriedades físicas e mecânicas exigidas, e os produtos deverão poder ser aplicado com segurança como componente de construção com função estrutural.

Consequentemente, diante deste cenário onde novas soluções são necessárias tendo em vista a crescente aplicação de painéis OSB em diversos segmentos, o aumento do interesse em materiais duráveis e de baixa manutenção e também em relação às preocupações com a sustentabilidade das edificações, a redução no uso de conservantes tóxicos e a utilização de diferentes tipos de madeira, esta pesquisa visa contribuir para agregar conhecimento relacionado a novos produtos derivados de madeira tendo em vista a insuficiência de estudos voltados à produção e avaliação dos efeitos do tratamento pós-térmico de painéis OSB.

As vantagens para este objeto de estudo incluem a maior resistência mecânica da madeira de eucalipto quando comparada com a de pinus (SERPA *et al.*, 2003), o que pode resultar em painéis mais finos e com o mesmo desempenho estrutural e, também, a não utilização de adesivo à base de formaldeído, que possui propriedades cancerígenas (GARZÓN BARRERO, 2015), bem como a utilização de tratamento térmico em substituição aos tratamentos preservativos de madeira realizados com produtos químicos que apresentam potencial toxicidade (FERRO, 2013).

Optou-se pelo pós-tratamento térmico (dos painéis) em vez do tratamento dos *strands*, de forma a evitar um possível risco de combustão dos *strands* e a necessidade de menos séries de termorretificação, em prol da otimização do tempo total do processo produtivo e de uma melhor eficiência energética.

Assim, este capítulo avaliou a cinética de degradação térmica das matérias-primas e as propriedades físicas e mecânicas dos painéis confeccionados com *strands* de madeira reflorestada de eucalipto e adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona. Os painéis OSB foram submetidos a tratamento térmico pós-produção (a 175 e 200 °C), em substituição ao uso de preservativos químicos para madeira. Além disso, a quantidade de materiais variou nas camadas face:núcleo:face nas proporções 25:50:25 e 30:40:30, visando atender às especificações e classificações para OSB indicadas pela Norma Europeia EN 300 (BSI, 2006) a fim de avaliar a possibilidade de aplicações estruturais específicas para os painéis.

### 5.3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 5.3.1 Materiais

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizada madeira reflorestada de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (Figura 21a), doada pela empresa Vale do Cedro®. A madeira não sofreu nenhum tipo de tratamento preservativo, tinha idade de 7 anos, densidade básica de 520 kg/m<sup>3</sup>, proveniente de floresta plantada na região sudoeste do Estado de São Paulo, Brasil.

O adesivo utilizado foi o IMPERVEG® AGT 1315 (Figura 21b), uma resina vegetal à base de poliuretano (originária do óleo de mamona), bicomponente (composto por um polioli e um pré-polímero), doado pela Imperveg, Brasil.

Figura 21 - Materiais utilizados na produção dos painéis



Sendo: (a) madeira, (b) componentes adesivos (poliol-1 e pré-polímero-2).

Fonte: Adaptado de Sugahara et al. (2022b).

### 5.3.2 Métodos

#### 5.3.2.1 Caracterização da Degradação Térmica dos Materiais

A caracterização da degradação térmica da matéria-prima (*strands* de madeira de *Eucalyptus grandis* e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona) utilizada na produção do OSB termicamente modificado foi realizada no Laboratório de Análises Térmicas da Faculdade de Engenharia e Ciências, Câmpus de Guaratinguetá, UNESP, Brasil.

Esta caracterização foi utilizada para permitir a avaliação individual da cinética de degradação térmica dos materiais utilizados através das técnicas de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TGA) para, através dos resultados obtidos, propor os tratamentos adotados nesta pesquisa e seus respectivos parâmetros adequados em relação à faixa ideal de temperatura de trabalho e tempo de processamento nas etapas de prensagem termo ativada e tratamento térmico do painel, sem prejuízo das propriedades das matérias-primas utilizadas.

A TGA (EXSTAR 6000, TG/DTA 6300, Seiko Instruments Inc., Chiba, Japão) foi realizada para determinar a variação de massa dos materiais (madeira e adesivo) enquanto eles foram submetidos a um plano de temperatura controlada. Como condições experimentais foram utilizadas: células de platina, atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo de gás de 100 ml/min e taxa de aquecimento de 10 °C/min com faixa de temperatura entre 30 e 1000 °C com amostras de 3,028 mg (madeira) e 4,261 mg (adesivo).

Posteriormente, foram realizadas caracterizações com DSC (Q20, T.A. Instruments, New Castle, DE, EUA) para determinação da cura do adesivo (1.400 mg) em célula hermética de alumínio e sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de gás de 20 ml/min e taxa de aquecimento de 10 °C/min. O aquecimento do adesivo ocorreu numa faixa de temperatura de 0 a 300°C.

#### 5.3.2.2 Produção do OSB

Após a aquisição da matéria-prima, a madeira de eucalipto foi processada para obtenção dos *strands*. As tábuas de eucalipto foram seccionadas em pedaços menores e imersas em água para facilitar o corte dos *strands* no gerador de partículas de madeira. Após serem cortados, os *strands* foram colocados sobre lonas plásticas para perda natural de umidade por um período de 7 dias. Em seguida foram peneirados e classificados para retirada do excesso de finos e posteriormente secos em estufa a 103 °C  $\pm$  (2 °C) até atingirem teor de umidade de aproximadamente 3%, teor de umidade recomendado pelo Laboratório de Produtos Florestais

(FPL, 2010) e já utilizado com sucesso por vários pesquisadores (CARVALHO *et al.*, 2018; MENDES *et al.*, 2013a; ZHUANG; CLOUTIER, 2022).

Em seguida, os *strands* secos em estufa foram resfriados e acondicionados em sacos plásticos para aguardar a fabricação dos painéis. Os painéis OSB (Figura 22) foram produzidos no Laboratório de Secagem de Madeira e Painéis e no Laboratório de Propriedades de Materiais da UNESP, Itapeva, Brasil. Na fabricação foram adotados procedimentos semelhantes aos realizados por pesquisadores como Iwakiri, Mendes e Ferro (FERRO, 2013; IWAKIRI, 2005; MENDES, 2010). Os painéis foram produzidos nas dimensões 420 x 420 x 12 mm com densidade nominal de 0,78 g/cm<sup>3</sup>, utilizando 1500 g de partículas de madeira de eucalipto.

Após a pesagem dos materiais, os componentes adesivos (Figura 21b) foram misturados e adicionados aos *strands* de madeira (Figura 21a), primeiro manualmente e, após homogeneização manual, foram levados para uma coladora de partículas de madeira (MA686, Marconi, Piracicaba, SP, Brasil, Figura 22a) por 3 min. A mistura de partículas e adesivo foi novamente pesada nas quantidades compatíveis para cada camada de cada tratamento (Figura 22b) e posteriormente acomodada em uma caixa formadora para produção do colchão de partículas utilizando um orientador direcional (Figura 22c).

Em seguida, o colchão de partículas formado foi levado para a etapa de pré-prensagem em prensa hidráulica mecânica com capacidade de 15 toneladas (RP0002, Ribeiro, Bom Jesus dos Perdões, SP, Brasil, Figura 22e) com carga de 5 toneladas por 5 min em temperatura ambiente. A Figura 22d ilustra o colchão de partículas já formado antes de ser levado à prensa hidráulica termomecânica com sistema de aquecimento automático (PHH 80T, Hidral-Mac, Araraquara, SP, Brasil, Figura 22f) e previamente aquecida.

A temperatura e o tempo do ciclo de prensagem foram definidos durante a etapa de caracterização da degradação térmica das matérias-primas. Os ciclos foram divididos em duas fases de prensagem com intervalo para alívio dos vapores gerados durante a conformação, com o objetivo de evitar a formação de bolhas no interior dos painéis, reproduzindo o ciclo industrial.

Desta forma, foi adotada uma temperatura de 120 °C durante a prensagem de 4,4 MPa, que ocorreu num total de 630 s, sendo 300 s de prensagem, 30 s de alívio de pressão e mais 300 s de prensagem. A Figura 22g ilustra o painel já prensado, ainda com as mantas de Teflon utilizadas para evitar que as partículas grudem nas chapas metálicas, e os painéis prontos e esquadrejados podem ser vistos na Figura 22h.

Figura 22 - Fabricação do OSB



Sendo: (a) Colagem, (b) Strands já com adesivo, (c) Orientador de partículas, (d) Colchão de partículas, (e) Prensagem a frio, (f) Prensagem a quente, (g) Paineis pós-prensagem a quente e (h) Paineis acabados.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

O adesivo poliuretano bicomponente derivado de óleo de mamona foi utilizado na proporção de 10% de adesivo com base na massa seca das partículas e utilizado na proporção de 1:1 entre polioli e pré-polímero. Todos os painéis foram confeccionados com três camadas, variando as proporções entre as camadas face:núcleo:face nas proporções de 25:50:25 e 30:40:30 em massa de partículas, a fim de avaliar a influência da variação da composição dos materiais nas 3 camadas e indicar aplicações estruturais.

Foram confeccionados três painéis para cada uma das seis condições estudadas (Tabela 8), sendo T1 e T2 os tratamentos de referência (sem tratamento térmico) e T3 a T6 a combinação das composições de duas camadas (25:50:25 e 30:40:30) e as duas temperaturas de tratamento térmico (175 e 200 °C), totalizando 18 painéis, nos quais foram realizados os ensaios físico-

mecânicos. Estes parâmetros de tratamento foram propostos com base nos resultados da Caracterização da Degradação Térmica de Materiais.

Tabela 8 - Tratamentos analisados

| Tratamento | Descrição <sup>1</sup>                   | Composição do painel <sup>2</sup> |
|------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| T1         | Referência, Sem tratamento térmico, 0 °C | 25:50:25                          |
| T2         | Referência, Sem tratamento térmico, 0 °C | 30:40:30                          |
| T3         | Temperatura 175 °C                       | 25:50:25                          |
| T4         | Temperatura 175 °C                       | 30:40:30                          |
| T5         | Temperatura 200 °C                       | 25:50:25                          |
| T6         | Temperatura 200 °C                       | 30:40:30                          |

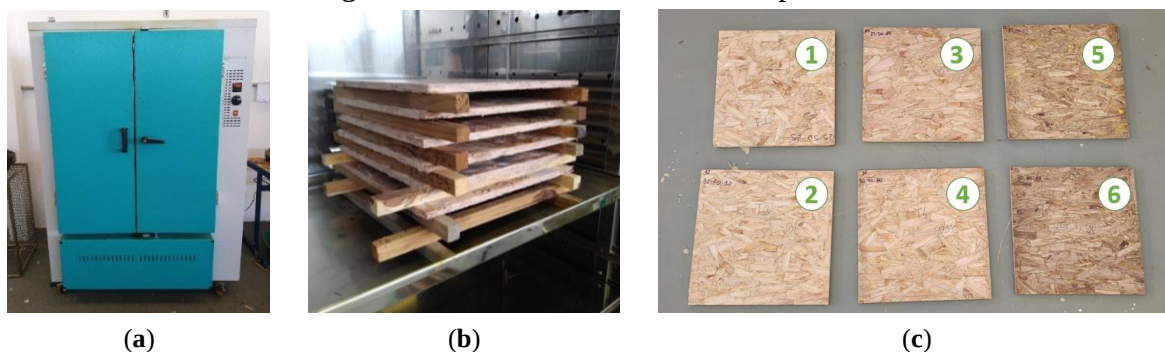
Sendo: <sup>1</sup> Temperatura de Tratamento Térmico. <sup>2</sup> Proporção camadas face:núcleo:face do painel OSB.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

### 5.3.2.3 Tratamento térmico do OSB

O tratamento térmico dos painéis (Figura 23) foi realizado em estufa convencional sem reposição de atmosfera em duas temperaturas diferentes (ou seja, 175 °C e 200 °C dependendo do tratamento), que foram definidas com base na avaliação da degradação térmica cinética dos materiais. Os painéis foram colocados dentro do forno desligado e separados por ripas de madeira para permitir a circulação de ar quente entre eles.

Figura 23 - Tratamento térmico dos painéis



Sendo: (a) Estufa, (b) Disposição dos painéis dentro da estufa e (c) Painéis após tratamento térmico.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

Após acomodar os painéis, o forno foi fechado e ligado, e quando atingiu a temperatura desejada em seu interior, os painéis foram mantidos ali por 60 min para termorretificação.

O tempo de tratamento térmico foi definido após os ensaios de cinética de degradação térmica dos materiais não evidenciarem degradação da madeira e da resina para as temperaturas avaliadas (ou seja, 175 °C para T3 e T4 e 200 °C para painéis T5 e T6) por até 60 min, tempo também adotado para tratamento térmico no estudo de (SILVA *et al.*, 2019). O processo de



aquecimento para tratamento térmico para a temperatura de 175 °C levou aproximadamente 65 min, totalizando 125 min e uma taxa de aquecimento de aproximadamente 2,7 °C/min.

Enquanto para a temperatura de 200 °C foram necessários aproximadamente 90 min, totalizando 150 min, 25 min a mais que o tempo considerado para a temperatura mais baixa, e taxa de aquecimento de aproximadamente 2,2 °C/min. Posteriormente, o forno foi parcialmente aberto e, após atingir a temperatura ambiente em seu interior, os painéis foram retirados, armazenados e, em seguida, seccionados para retirada dos corpos-de-prova conforme especificações normativas vigentes para a realização dos ensaios.

#### 5.3.2.4 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas

Os ensaios físicos e mecânicos foram realizados de acordo com os procedimentos de diferentes documentos normativos prescritos pela EN (Normas Europeias), conforme demonstrado na Tabela 9. Foram utilizadas 10 amostras por tratamento em cada avaliação de propriedade realizada.

Tabela 9 – Ensaios realizados

| <b>Propriedade</b>                                               | <b>Norma</b>        |
|------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Densidade (D)                                                    | EN 323 (BSI, 1993e) |
| Teor de Umidade (MC)                                             | EN 322 (BSI, 1993d) |
| Teor de Inchamento após 24 h (TS)                                | EN 317 (BSI, 1993b) |
| Absorção de água (WA)                                            | EN 317 (BSI, 1993b) |
| Módulo de Elasticidade - Paralelo (MOE-pa)                       | EN 310 (BSI, 1993a) |
| Módulo de Elasticidade - Perpendicular (MOE-pe)                  | EN 310 (BSI, 1993a) |
| Módulo de Resistência à Flexão Estática - Paralelo (MOR-pa)      | EN 310 (BSI, 1993a) |
| Módulo de Resistência à Flexão Estática - Perpendicular (MOR-pe) | EN 310 (BSI, 1993a) |
| Resistência ao Arrancamento de Parafuso - Superfície (PS-s)      | EN 320 (BSI, 2011)  |
| Resistência ao Arrancamento de Parafuso - Topo (PS-t)            | EN 320 (BSI, 2011)  |
| Resistência à Tração Perpendicular ou Adesão Interna (IB)        | EN 319 (BSI, 1993c) |
| Classificação e especificações                                   | EN 300 (BSI, 2006)  |

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

A análise de variância (ANOVA), ao nível de significância de 5%, foi utilizada para investigar a influência da temperatura (T) do tratamento térmico (ou seja, 0 - referência, 175 e 200 °C), da configuração das camadas (ou seja, 25:50:25 e 30:40:30) e a interação entre esses dois fatores (ou seja, Configuração x T) nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis fabricados. O teste de contraste de médias de Tukey (nível de significância de 5%) foi utilizado para investigar a influência dos níveis de cada fator, e o gráfico de interação entre os fatores foi



utilizado para interpretar os efeitos de interação das propriedades consideradas significativas pela ANOVA.

A partir do teste de Tukey, “A” denota o tratamento associado ao maior valor médio, “B” o tratamento relacionado ao segundo maior valor médio e assim por diante. Letras iguais implicam tratamentos diferentes com médias estatisticamente equivalentes entre si.

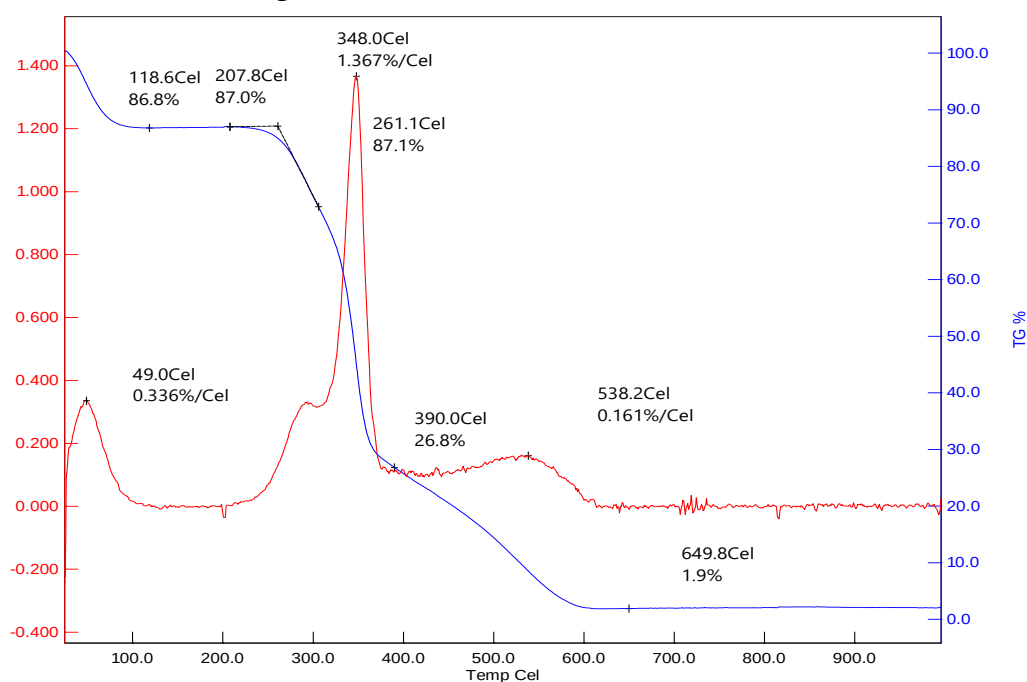
## 5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.4.1 Caracterização térmica das matérias primas

#### 5.4.1.1 TGA

A partir das análises termogravimétricas, observou-se que a amostra de madeira apresentou pelo menos 3 estágios de decomposição térmica confirmados pela presença de 3 picos no DTG (Figura 24). A primeira perda de massa de aproximadamente 13,2% possivelmente pode ser atribuída à umidade natural presente na amostra, que ocorreu aproximadamente entre 30 °C e 118 °C. A segunda perda de massa de aproximadamente 60% iniciou-se a 207 °C, e está relacionada à decomposição da madeira.

Figura 24 - Curva TGA/DTG - Madeira



Nota: A cor azul representa os resultados da TGA e a cor vermelha da DTG dos materiais avaliados.

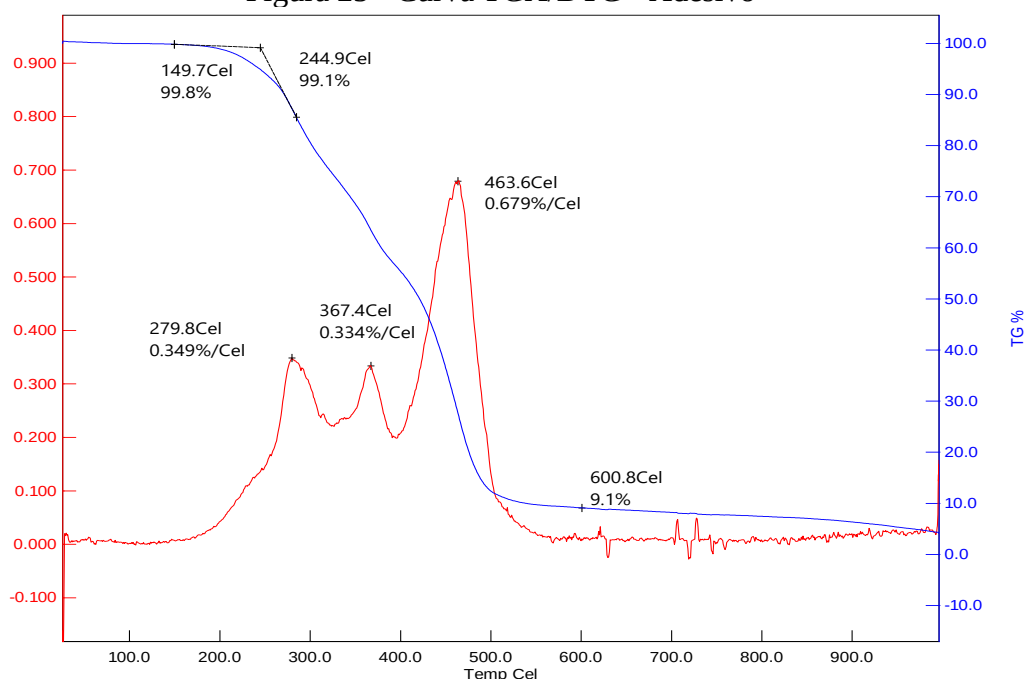
Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

Os valores encontrados são compatíveis com os publicados na pesquisa de Schulz *et al.* (2021), que trataram termicamente e caracterizaram a madeira de *Eucalyptus grandis* em três temperaturas diferentes (ou seja, 160 °C, 200 °C e 240 °C). Em relação aos resultados obtidos das curvas termogravimétricas (ou seja, TGA e DTG), verificou-se que estas podem ser divididas em três regiões, onde a região I está relacionada à perda de umidade (de 20 °C a 100 °C), a região II está relacionada à degradação da hemicelulose e celulose (de 160 °C a 480 °C), e a região III está relacionada à degradação da celulose e lignina (de 450 °C a 600 °C).

Verificou-se, também, que quanto menor a temperatura, menor a taxa de degradação térmica tanto na primeira quanto na segunda região, provavelmente devido à intensidade de degradação que ocorre nos extrativos orgânicos e nos segmentos amorfos das hemiceluloses. Além disso, a massa residual (acima de 600 °C) foi atribuída a alguns compostos inorgânicos presentes nos extrativos de madeira e à lignina tornando-se carbono parcialmente fixado.

A Figura 25 mostra as curvas TGA/DTG do adesivo, e indica que o adesivo iniciou seu processo de decomposição térmica em cerca de 150 °C. Após a definição das temperaturas de degradação, foram realizadas isotermas para a madeira e o adesivo utilizando atmosfera de nitrogênio e taxa de aquecimento de 10 °C/min por 60 min nas temperaturas de 150, 175 e 200 °C visando simular o processo de tratamento térmico da painéis e avaliar a degradação do material nas temperaturas estabelecidas.

Figura 25 - Curva TGA/DTG - Adesivo



Nota: A cor azul representa os resultados da TGA e a cor vermelha da DTG dos materiais avaliados.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

O tempo de 60 min também foi adotado para tratamento térmico no estudo de Silva *et al.* (2019), que avaliou o pré-tratamento (dos *strands*) a 160 e 180 °C e o pós-tratamento (do OSB) a 160, 180 e 200 °C, sem reposição da atmosfera a 1 atm de pressão. Para a temperatura mais elevada (200 °C), observou-se que a madeira perdeu aproximadamente 8% de massa, o que pode ser atribuído à perda de umidade. Verificou-se, também, que a resina não perdeu massa nesta temperatura por até 60 min. Neste contexto, estes parâmetros foram utilizados para definir os tratamentos propostos nesta pesquisa onde foram utilizadas temperaturas de 175 °C (T3 e T4) e 200 °C (T5 e T6) durante 60 min para o processo de tratamento térmico.

#### 5.4.1.2 DSC

A cura do adesivo a aproximadamente 100 °C obtida por DSC (Apêndice A) é compatível com a temperatura utilizada em diversos estudos (BARBIRATO *et al.*, 2019a; LOPES JUNIOR *et al.*, 2021; SUGAHARA *et al.*, 2019), que relataram temperatura e tempo médio de prensagem de 100 °C e 10 min, respectivamente, para a produção de OSB utilizando o adesivo poliuretano vegetal bicomponente derivado de óleo de mamona. Diante disso, inicialmente foi realizada uma isoterma a 100 °C para verificar o comportamento de cura do adesivo, onde o tempo de cura encontrado foi de aproximadamente 25 min, valor superior ao comumente utilizado (10 min). Assim, foi realizada uma nova análise (Apêndice B), aumentando a temperatura com uma isoterma de 120 °C, visando, com o aumento da temperatura, diminuir o tempo de cura.

Assim, o tempo de cura do adesivo foi reduzido para aproximadamente 5 min. Porém, conhecendo o comportamento dos materiais, ainda que o DSC indicasse um tempo de cura de 5 min, tendo em vista uma possível variação de temperatura entre as superfícies e interior do compósito devido à espessura do painel, optou-se por utilizar uma temperatura de 120 °C com 10 min de prensagem termomecânica a fim de aliar segurança, otimização do processo produtivo e qualidade final do compósito.

#### 5.4.2 Avaliação das propriedades físicas

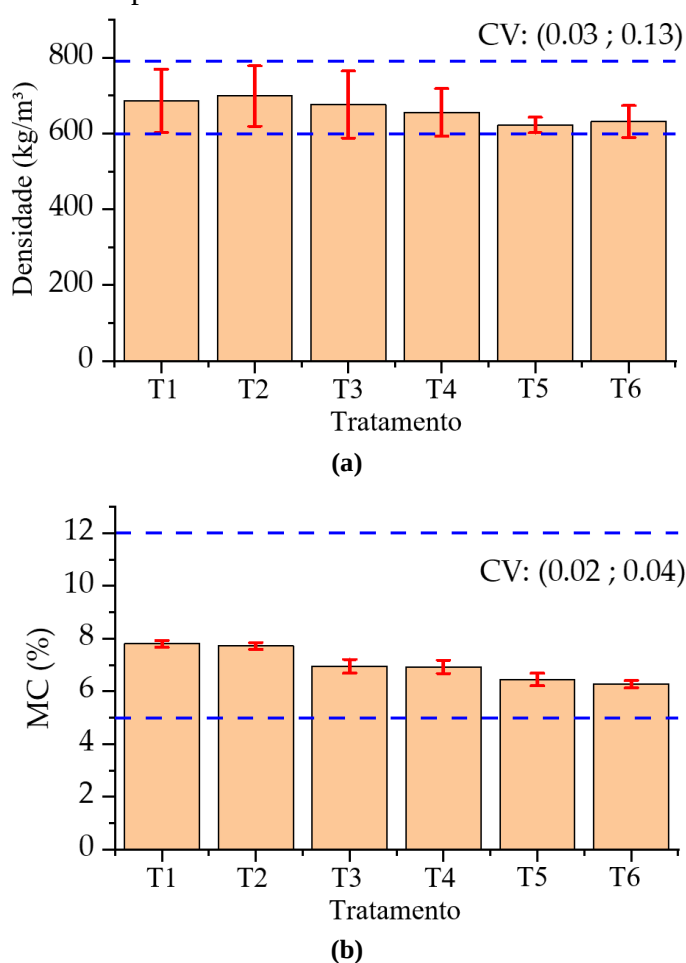
As Figura 26 e Figura 27 apresentam os valores médios, os intervalos de confiança médios (95% de confiabilidade) e os valores extremos dos coeficientes de variação (CV) das propriedades físicas dos painéis fabricados de acordo com os seis tratamentos experimentais estipulados.

OSB de todos os tratamentos produzidos neste estudo podem ser classificados como de média densidade (600 a 790 kg/m<sup>3</sup>, faixa indicada pelas linhas tracejadas azuis na Figura 26a)

(IWAKIRI, 2005). A menor média entre as amostras foi de 623 kg/m<sup>3</sup> (T6) e a maior de 699 kg/m<sup>3</sup> (T2), conforme pode ser observado na Figura 26a.

Considerando a densidade média da madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada na fabricação dos painéis igual a 520 kg/m<sup>3</sup>, obteve-se uma taxa média de compactação de 1,3 para os painéis produzidos, atendendo à faixa recomendada de 1,3 a 1,6 (considerada ideal para o adequado adensamento e consolidação de o painel na espessura final desejada) (MENDES, 2010), o que impactou positivamente na resistência à flexão e nas propriedades de adesão interna.

Figura 26 - Propriedades Físicas: Densidade e Teor de Umidade



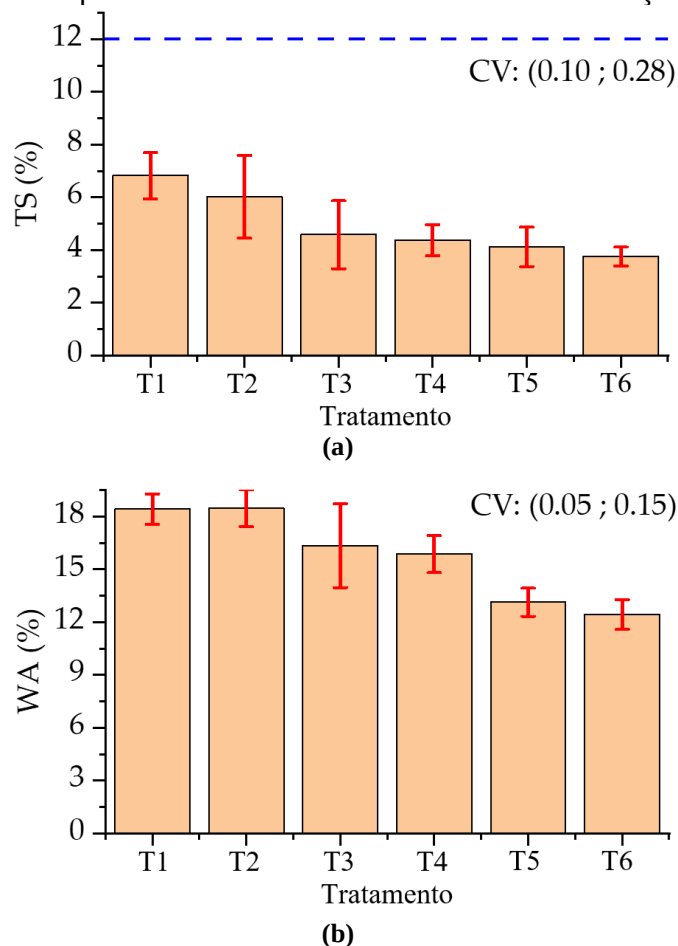
Nota: (a) Densidade, (b) Teor de umidade (MC). As linhas tracejadas representam os valores definidos pelos limites normativos, as linhas vermelhas o desvio padrão e CV o coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado de Sugahara et al. (2022b).

Para a propriedade umidade (MC, Figura 26b), a EN 300 (BSI, 2006) determina a faixa adequada de 5 a 12%. Assim, os resultados obtidos em todos os tratamentos (6,3 a 7,8%) são compatíveis com OSB tipo 4 (painéis estruturais de suporte de carga pesada para uso em condições úmidas).

No que diz respeito ao teor de inchamento após 24 h (TS, Figura 27a), para os tratamentos analisados, T1 (6,8%) obteve a maior média e T6 (3,8%) a menor, sendo que os valores encontrados para todos os tratamentos nesta pesquisa estão muito abaixo do limite máximo de 12%, recomendado pela norma europeia EN 300 (BSI, 2006) para painéis do tipo OSB/4.

Figura 27 - Propriedades Físicas: Inchamento 24 h e Absorção de água



Nota: (a) Inchamento após 24 h (TS), (b) Absorção de água (WA). As linhas tracejadas representam os valores definidos pelos limites normativos, as linhas vermelhas o desvio padrão e CV o coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

Para absorção de água (WA, Figura 27b), o tratamento T2 obteve a maior média (18,5%) e o T6 (12,4%) a menor. Esses valores são compatíveis com os alcançados na pesquisa de Copak *et al.* (2021), que utilizaram um aquecedor infravermelho até que a superfície de amostras comerciais de OSB atingisse 50°C e obtiveram resultados de absorção de água abaixo de 20%.

A modificação térmica induz alterações químicas nos componentes macromoleculares da parede celular (ARO *et al.*, 2014). Os efeitos gerados pelo tratamento térmico estão relacionados às condições do processo de aquecimento, sendo a temperatura o principal fator.

Os efeitos resultantes correspondem a uma combinação de resultados individuais dos efeitos do calor sobre a celulose, hemicelulose, extrativos e lignina, sendo as hemiceluloses e a

celulose as principais fontes de grupos OH, responsáveis pela higroscopicidade e alterações dimensionais da madeira (BRITO *et al.*, 2008).

À medida que a intensidade do tratamento térmico aumenta, as ligações secundárias (H e Van der Waals) e ligações naturais no polímero de hemicelulose entre hemicelulose-celulose, e ligações covalentes entre hemicelulose-lignina e novas ligações cruzadas aparecem entre moléculas de lignina e outros componentes, e não permitem que a água penetre na madeira com tanta facilidade como as ligações H (KAMPERIDOU, 2021). Consequentemente, à medida que a temperatura se intensifica, a degradação das hemiceluloses também aumenta e leva ao aumento da cristalinidade da celulose na parede celular (ARO *et al.*, 2014).

Estas modificações induzem menor absorção de água, menor inchamento em espessura (CETERA *et al.*, 2018), menor interação entre a madeira e a água, uma redução no teor de umidade de equilíbrio da madeira e, como resultado, possivelmente uma melhor estabilidade dimensional (PIPÍŠKA *et al.*, 2020).

Considera-se, portanto, que o tratamento térmico e o aumento da temperatura levaram à melhoria de propriedades físicas como higroscopicidade, inchamento, retração e absorção de água, semelhante ao obtido na pesquisa de Direske *et al.* (2018), que avaliaram os efeitos do conteúdo do adesivo MDI em OSB tratado termicamente e concluíram que o pós-tratamento térmico melhorou as propriedades físicas (higroscopicidade, inchaço, retração, absorção de água) do OSB.

#### 5.4.3 Avaliação das propriedades mecânicas

As Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31 apresentam os valores médios, os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade) e os valores extremos dos coeficientes de variação das propriedades mecânicas dos painéis fabricados.

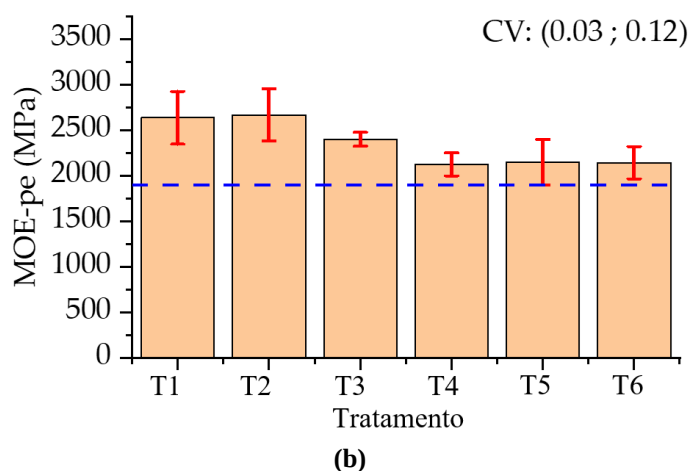
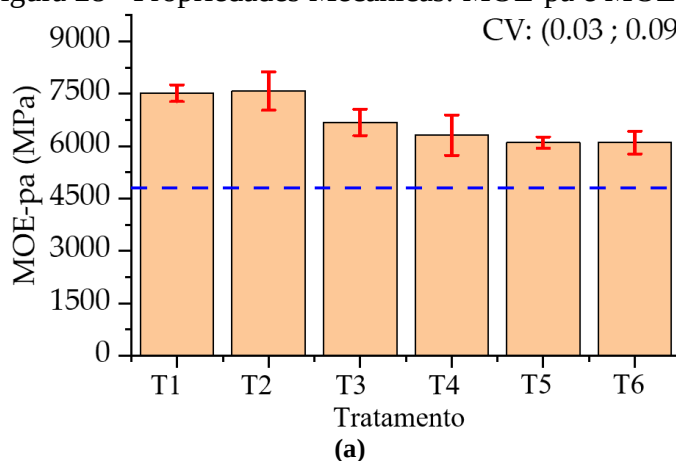
Sendo, Módulo de Elasticidade - Paralelo (MOE-pa, Figura 28a) e Perpendicular (MOE-pe, Figura 28b), Módulo de Resistência à Flexão Estática - Paralelo (MOR-pa, Figura 29a) e Perpendicular (MOR-pe, Figura 29b), Resistência ao Arrancamento de Parafuso - Superfície (PS-s, Figura 30a) e Topo (PS-t, Figura 30b) e Adesão Interna (IB, Figura 31).

Para a propriedade MOE-pa, todos os tratamentos superaram o mínimo exigido pelo documento normativo EN 300 (BSI, 2006), de 4800 MPa (linha azul na Figura 28a) e o T2 atingiu a maior média entre os tratamentos (7575 MPa), enquanto o T6 (6100 MPa) obteve a menor média. Os resultados do MOE-pa superaram os encontrados por Silva *et al.* (2019), que produziram e avaliaram OSB confeccionados com *Pinus taeda* e resina de fenol formaldeído

termorretificados a 0, 160, 180 e 200 °C e atingiram valores entre 3897 MPa (180 °C) e 4697 MPa (0 °C).

Em seu trabalho, Mendes (2010) avaliou o efeito do tratamento térmico nas propriedades físico-mecânicas de painéis OSB feitos de pinus e adesivo fenol-formaldeído, na temperatura de 220 °C e por um período de 12 min e obteve MOE-pa de 8.061 MPa para os painéis de referência e 6.665 MPa para os painéis tratados termicamente.

Figura 28 - Propriedades Mecânicas: MOE-pa e MOE-pe  
CV: (0.03 ; 0.09)



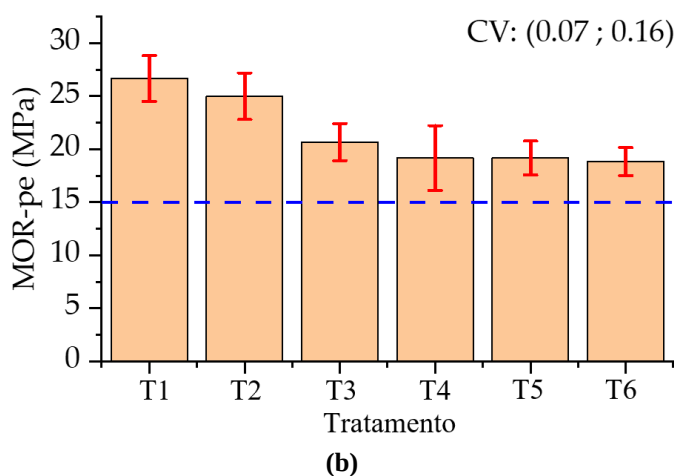
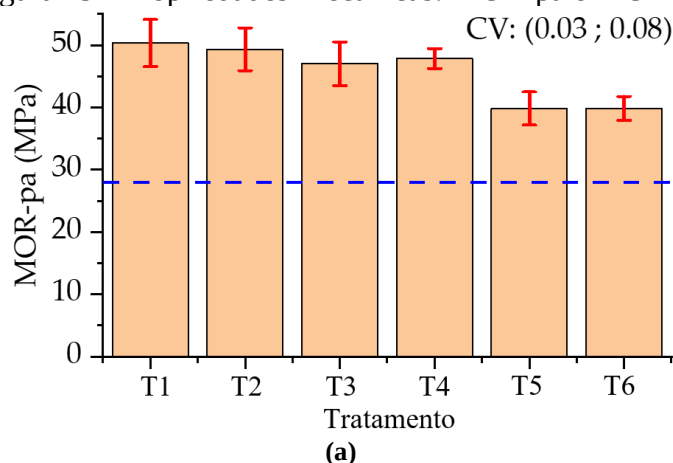
Nota: (a) Módulo de elasticidade paralelo (MOE-pa), (b) Módulo de elasticidade perpendicular (MOE-pe). As linhas tracejadas representam os valores definidos pelos limites normativos, as linhas vermelhas o desvio padrão e CV o coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

No que diz respeito ao módulo de elasticidade na direção perpendicular (MOE-pe, Figura 28b), todos os tratamentos superaram o mínimo exigido pelo documento normativo EN 300 (BSI, 2006), de 1900 MPa. O T2 (2.669 MPa) obteve a maior média entre os tratamentos analisados, enquanto o T4 obteve a menor (2.126 MPa). Silva *et al.* (2019) atingiram valores entre 3.034 MPa (160 °C) e 3.349 MPa (0 °C). Mendes (2010) obteve valores de MOE-pe entre 2022 e 1695 MPa.

Levando em consideração os valores de MOR-pa (Figura 29a) obtidos no ensaio de flexão, a maior média foi encontrada para T1 (50 MPa), enquanto T5 e T6 atingiram a menor média (40 MPa). A EN 300 (BSI, 2006) define 28 MPa como o MOR-pa mínimo, portanto, todos os resultados obtidos ultrapassaram o valor mínimo recomendado pelo instrumento normativo europeu.

Figura 29 - Propriedades Mecânicas: MOR-pa e MOR-pe



Nota: (a) Módulo de Resistência à Flexão Estática - Paralelo (MOR-pa), (b) Módulo de Resistência à Flexão Estática - Perpendicular (MOR-pe). As linhas tracejadas representam os valores definidos pelos limites normativos, as linhas vermelhas o desvio padrão e CV o coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

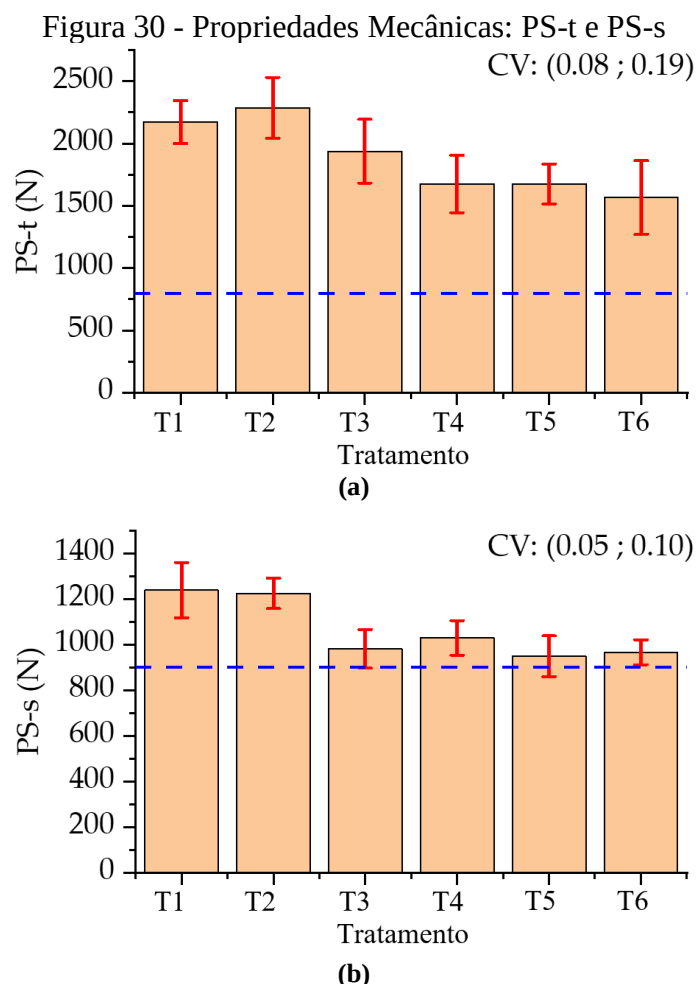
Esses resultados também superaram os encontrados por Silva *et al.* (2019), que encontraram valores para MOR-pa entre 33 MPa e 39 MPa. Mendes (2010) obteve valores entre 49,5 e 57,50 MPa, enquanto Direske *et al.* (2018), que avaliaram os efeitos do teor de adesivo MDI em OSB tratados termicamente, observaram degradações significativas no MOR-pa dos painéis tratados termicamente.

O valor mínimo segundo EN 300 (BSI, 2006), para MOR-pe (Figura 29b) é de 15 MPa, portanto todos os tratamentos analisados (19 a 27 MPa) superaram o mínimo exigido. Silva *et*



*al.* (2019) atingiram MOR-pe entre 25 MPa (180 °C) e 33 MPa (0 °C), enquanto Mendes (2010) 20,8 MPa (0 °C) e 20,6 MPa (220 °C).

Na Resistência à retirada dos parafusos - topo (PS-t, Figura 30a) o T2 obteve a maior média (2287 N) entre os tratamentos analisados, enquanto o T6 (1568 N) obteve a menor.



Nota: (a) Resistência ao Arrancamento de Parafuso - Topo (PS-t), (b) Resistência ao Arrancamento de Parafuso - Superfície (PS-s). As linhas tracejadas representam os valores definidos pelos limites normativos, as linhas vermelhas o desvio padrão e CV o coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

Como não são determinados valores mínimos para a propriedade de arrancamento do parafuso na norma europeia EN 300 (BSI, 2006), a ANSI A208.1 (ANSI, 1999) foi usada como referência, na qual para painéis de partículas de média densidade, os classificados como M-1 não têm valores mínimos especificados para a propriedade PS-t, enquanto para placas M-S é recomendado um mínimo de 800 N (linha azul na Figura 30a).

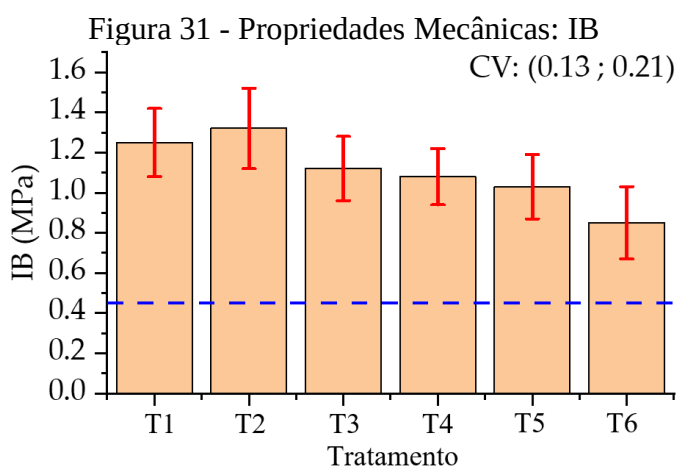
No entanto, conforme relatado por Aro *et al.* (2014), também não foi possível comparar diretamente os resultados de arrancamento do parafuso do presente estudo com os de outros

pesquisadores devido à quantidade limitada de trabalhos anteriores concluídos que avaliaram a resistência de fixação do parafuso superior em painéis OSB termicamente modificados.

Dentre os tratamentos analisados, o T1 (1239 N) obteve a maior média no teste Resistência à retirada dos parafusos - Superfície (PS-s, Figura 30b), enquanto o T5 (950 N) obteve a menor. De acordo com ANSI A208.1 (ANSI, 1999), para painéis de partículas com classificação M-1 não são especificados valores mínimos para PS-s, no entanto, para painéis MS é recomendado um mínimo de 900 N (linha azul, Figura 30b).

De acordo com Aro *et al.* (2014), à medida que a madeira se torna mais frágil em temperaturas mais elevadas, as roscas dos parafusos tendem a rasgar as fibras quebradiças, reduzindo assim os valores da força de fixação do parafuso. Deste modo, em seu estudo, parafusos foram cravados na espessura do painel para medir a resistência de retirada em um plano perpendicular à face e os resultados se situaram entre 964 e 1319 N.

Por fim, para a propriedade de adesão interna (IB, Figura 31), dentre os tratamentos analisados, T1 (1,3 MPa) obteve a maior média, enquanto T6 (0,8 MPa), a menor.



Nota: Tração Perpendicular ou Adesão Interna (IB). As linhas tracejadas representam os valores definidos pelos limites normativos, as linhas vermelhas o desvio padrão e CV o coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

Estes resultados, além de ultrapassarem o valor mínimo exigido pela Norma Europeia EN 300 (BSI, 2006) de 0,45 MPa, também superaram o reportado por investigadores que trabalham com OSB tratados termicamente, como Silva *et al.* (2019) (0,47 a 0,53 MPa), Aro *et al.* (2014) (0,31 a 0,45 MPa) e Mendes (2010) (0,60 a 0,63 MPa).

O tratamento térmico visa promover uma degradação controlada da madeira, de forma a melhorar algumas das suas propriedades (NAVI; SANDBERG, 2011). Porém, as alterações na madeira em altas temperaturas levam a modificações químicas das hemiceluloses, celulose e

lignina (PIPÍŠKA *et al.*, 2020), o que também pode causar reduções nas propriedades mecânicas (LOVRIĆ *et al.*, 2017).

De forma geral, observando os resultados deste trabalho, constatou-se que o aumento da temperatura do tratamento térmico levou à redução do desempenho mecânico dos painéis. Porém, mesmo com valores inferiores à referência, o cumprimento dos limites normativos não foi comprometido em nenhuma das propriedades avaliadas. Esses resultados podem estar relacionados à associação das excelentes propriedades mecânicas da madeira de eucalipto aliadas ao adesivo poliuretano.

Em seu artigo, Pereira *et al.* (2021) que também estudaram o tratamento térmico (a 180 °C, 200 °C e 220 °C) em dois tempos de exposição (10 e 12 min) em painéis aglomerados e OSB produzidos com madeira de eucalipto e resina fenólica, concluíram que a modificação térmica nos tempos de exposição e temperaturas estudados não influenciou nos resultados das propriedades mecânicas dos painéis.

Deve-se notar que a resina é um componente importante do OSB e existem vantagens e desvantagens para cada tipo (PIPÍŠKA *et al.*, 2020). A resina poliuretana de óleo de mamona pode fornecer uma solução alternativa à crescente demanda por materiais ecologicamente corretos para uso na indústria da construção (BARBIRATO *et al.*, 2019a), além de apresentar-se como tecnicamente viável para a produção de painéis (WILCZAK *et al.*, 2019).

Todavia, a partir da TGA dos materiais, pôde-se observar que a degradação da madeira ocorreu somente a partir de 200 °C. Entretanto, para a resina de poliuretano a degradação iniciou em temperaturas mais baixas, em torno de 150 °C, o que pode ter relação com a redução da resistência mecânica verificada neste estudo.

Assim, comparando o presente estudo com o realizado por Pereira *et al.* (2021), entende-se que as diferenças encontradas nos resultados obtidos entre as pesquisas estão relacionadas ao maior tempo de exposição à temperatura durante a modificação térmica. Isto está de acordo com o que Sinha *et al.* (2010) obtiveram, os quais concluíram que o tratamento térmico do OSB causou uma redução significativa na resistência à flexão e na rigidez, com a maior redução ocorrendo a 200 °C por 2 h em comparação com as outras condições avaliadas (referência, 100 °C em 1 e 2 h, e 200 °C em 1 h de exposição).

## 5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (para nível de significância de 5%).

No teste de Tukey sobre a influência das temperaturas (T) a 0 °C, 175 °C e 200 °C nas configurações 25:50:25 e 30:40:30 (Tabela 10), não foi encontrada diferença significativa nas propriedades de adesão interna (IB) e densidade (D) para todos os tratamentos avaliados.

Da mesma forma, em Silva *et al.* (2019), os autores concluíram que o tratamento térmico não alterou a densidade do painel e não encontraram diferenças estatísticas para a propriedade de adesão interna. As demais propriedades avaliadas apresentaram diferenças pontuais entre os tratamentos com e sem modificação térmica, indicando a influência das variações de temperatura nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Concordando com isso, em seu artigo, Direske *et al.* (2018), concluíram que as propriedades mecânicas e físicas do OSB pós-tratado foram alteradas como resultado de modificações induzidas termicamente na estrutura da madeira, onde foram encontradas degradações significativas na resistência mecânica para algumas das propriedades avaliadas.

Tabela 10 - Resultados do teste de Tukey sobre a influência da temperatura (T)

| Configuração | T (°C) | MOE-pa | MOE-pe | MOR-pa | MOR-pe | PS-t | PS-s | IB |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|----|
| 25:50:25     | 0      | A      | A      | A      | A      | A    | A    | A  |
|              | 175    | B      | AB     | A      | B      | AB   | B    | A  |
|              | 200    | C      | B      | B      | B      | B    | B    | A  |
| 30:40:30     | 0      | A      | A      | A      | A      | A    | A    | A  |
|              | 175    | B      | B      | A      | B      | B    | B    | A  |
|              | 200    | B      | B      | B      | AB     | B    | B    | A  |
| Configuração | T (°C) | D      | WA     | MC     | TS     |      |      |    |
| 25:50:25     | 0      | A      | A      | A      | A      |      |      |    |
|              | 175    | A      | AB     | B      | B      |      |      |    |
|              | 200    | A      | B      | B      | B      |      |      |    |
| 30:40:30     | 0      | A      | A      | A      | A      |      |      |    |
|              | 175    | A      | B      | B      | AB     |      |      |    |
|              | 200    | A      | C      | C      | B      |      |      |    |

Nota: As mesmas letras nas colunas implicam que não houve diferença estatística com 95% de confiança. A partir do teste de Tukey, A denota o tratamento associado ao maior valor médio, B o tratamento relacionado ao segundo maior valor médio e assim por diante. Letras iguais implicam tratamentos diferentes com médias estatisticamente equivalentes entre eles.

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

Para MOE-pa são observadas diferenças na configuração 25:50:25 entre todas as variações de temperatura, com redução do módulo com o aumento da temperatura, enquanto na configuração 30:40:30 houve diferença apenas entre a referência e as demais temperaturas, com valores mais baixos para os tratamentos tratados termicamente.

Na configuração 25:50:25, o MOE-pe apresentou equivalência entre os tratamentos nas temperaturas 0 e 175 °C, e entre 175 e 200 °C, com redução do módulo relacionada ao aumento da temperatura. Na configuração 30:40:30 foram observadas diferenças estatísticas entre a temperatura de referência e as demais temperaturas, com valores menores para os tratamentos tratados termicamente.

Para o MOR-pa em ambas as configurações houve diferença entre a temperatura de 200 °C e as demais, com redução da resistência na temperatura mais elevada. Para o MOR-pe, enquanto na configuração 25:50:25, houve diferença apenas entre a referência e as demais temperaturas. Na configuração 30:40:30 houve equivalência entre 200 °C e a temperatura de referência e entre 200 °C e 175 °C.

No PS-t foram identificadas equivalências entre 175 °C e a referência, e entre 175 °C e 200 °C na configuração 25:50:25. Na configuração 30:40:30, houve diferença significativa apenas entre a referência e as demais temperaturas, com diminuição da resistência com o aumento da temperatura.

PS-s demonstrou nas configurações 25:50:25 e 30:40:30 diferenças significativas entre a referência e as demais temperaturas, com diminuição da resistência relacionada ao aumento da temperatura e equivalência entre as duas temperaturas avaliadas.

Na configuração 25:50:25, o WA foi equivalente entre 175 °C e a referência, e entre 175 °C e 200 °C. Na configuração 30:40:30, o WA diminuiu com o aumento da temperatura, apresentando diferenças estatísticas entre todas as temperaturas avaliadas.

O MC apresentou diferenças significativas na configuração 25:50:25 entre a referência e as demais temperaturas, que foram equivalentes entre si e apresentaram valores reduzidos em relação à referência. Na configuração 30:40:30 o MC diminuiu com o aumento da temperatura, apresentando diferenças estatísticas entre todas as temperaturas avaliadas.

Para TS, são observadas diferenças significativas na configuração 25:50:25 entre a referência e as demais temperaturas, que foram equivalentes entre si e apresentaram valores inferiores à referência. Na configuração 30:40:30, o TS foi equivalente entre 175 °C e a referência e entre 175 °C e 200 °C.

Da mesma forma, em seu artigo Cetera *et al.* (2018) analisaram o efeito do tratamento termo-vácuo nas características do OSB (*poplar*) e identificaram que o comportamento hidrofóbico aumentou, mostrando reduções significativas no inchamento em espessura, associadas a diminuições em IB, MOR e MOE.

No teste de Tukey sobre a influência da configuração 25:50:25 e 30:40:30 nas temperaturas de tratamento térmico (0 °C, 175 °C e 200 °C) (Tabela 11), não foi encontrada diferença significativa para qualquer propriedade física ou mecânica avaliada, indicando assim que não houve interferência da variação dos tipos de camadas propostas nesta pesquisa.

Tabela 11 - Resultados do teste de Tukey sobre a influência das camadas

| T (°C) | Configuração | MOE-pa | MOE-pe | MOR-pa | MOR-pe | PS-t | PS-s | IB |
|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|------|------|----|
| 0      | 25:50:25     | A      | A      | A      | A      | A    | A    | A  |
|        | 30:40:30     | A      | A      | A      | A      | A    | A    | A  |
| 175    | 25:50:25     | A      | A      | A      | A      | A    | A    | A  |
|        | 30:40:30     | A      | A      | A      | A      | A    | A    | A  |
| 200    | 25:50:25     | A      | A      | A      | A      | A    | A    | A  |
|        | 30:40:30     | A      | A      | A      | A      | A    | A    | A  |
| T (°C) | Configuração | D      | WA     | MC     | TS     |      |      |    |
| 0      | 25:50:25     | A      | A      | A      | A      |      |      |    |
|        | 30:40:30     | A      | A      | A      | A      |      |      |    |
| 175    | 25:50:25     | A      | A      | A      | A      |      |      |    |
|        | 30:40:30     | A      | A      | A      | A      |      |      |    |
| 200    | 25:50:25     | A      | A      | A      | A      |      |      |    |
|        | 30:40:30     | A      | A      | A      | A      |      |      |    |

*Nota: As mesmas letras nas colunas implicam que não houve diferença estatística com 95% de confiança. A partir do teste de Tukey, A denota o tratamento associado ao maior valor médio, B o tratamento relacionado ao segundo maior valor médio e assim por diante. Letras iguais implicam tratamentos diferentes com médias estatisticamente equivalentes entre eles.*

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2022b).

Portanto, somados aos bons resultados físicos e mecânicos obtidos, que estão de acordo com os instrumentos normativos e literatura da área, considera-se que qualquer variação de camadas proposta neste estudo atende aos requisitos técnicos necessários para um painel OSB do tipo 4.

Não foram encontradas interações significativas para quaisquer propriedades investigadas pela ANOVA a 5% de significância.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES

O presente capítulo apresentou resultados importantes, que incluem as seguintes conclusões:

A produção e estudo do desempenho de OSB submetidos a tratamento térmico e variação de percentuais de camada apresentou-se como uma proposta relevante e tecnicamente viável, principalmente no que diz respeito à sua aplicação na construção civil, uma vez que os painéis precisam apresentar propriedades de resistência e durabilidade, comprovando para poder ser aplicável como elementos estruturais.

As propriedades foram todas plenamente atendidas em todos os testes realizados, indicando a grande eficiência técnica alcançada com a associação de partículas de eucalipto e resina poliuretana de óleo de mamona.

Pode-se afirmar que a análise térmica para melhoria dos parâmetros de produção e tratamento térmico foi extremamente útil para caracterizar o material, permitindo definir com segurança as variáveis temperatura e tempo, de forma a não promover muita degradação do

material, garantindo segurança e atendimento às propriedades mecânicas, otimizando ao mesmo tempo o processo de produção.

Para todas as temperaturas analisadas não houve tendência de diminuição considerável das propriedades mecânicas para níveis inferiores aos recomendados pela norma após o tratamento térmico. Por outro lado, houve melhoria nas propriedades físicas e estabilidade dimensional do painel produzido conforme observado nos resultados referentes às propriedades de absorção de água e inchamento em espessura, levando a crer que o tratamento térmico tornou a superfície mais hidrofóbica, reduzindo a interação com a água.

Pode-se observar também que a variação dos percentuais de partículas nas camadas não apresentou diferenças significativas na maioria das análises realizadas, indicando que todos os percentuais estudados podem ser adotados sem comprometer o desempenho físico-mecânico do painel.

As diferenças estatísticas observadas nos ensaios físicos e mecânicos foram pontuais e as variações não comprometem a classificação de todos os tratamentos estudados como OSB/4 (painéis estruturais de suporte de carga pesada para uso em condições úmidas). Tais variações estatísticas também podem estar relacionadas a possíveis ocorrências no processo produtivo, como acúmulo de adesivo nos *strands*, distribuição não homogênea do material e presença de vazios devido à formação manual de camadas, entre outros fatores inerentes ao material.

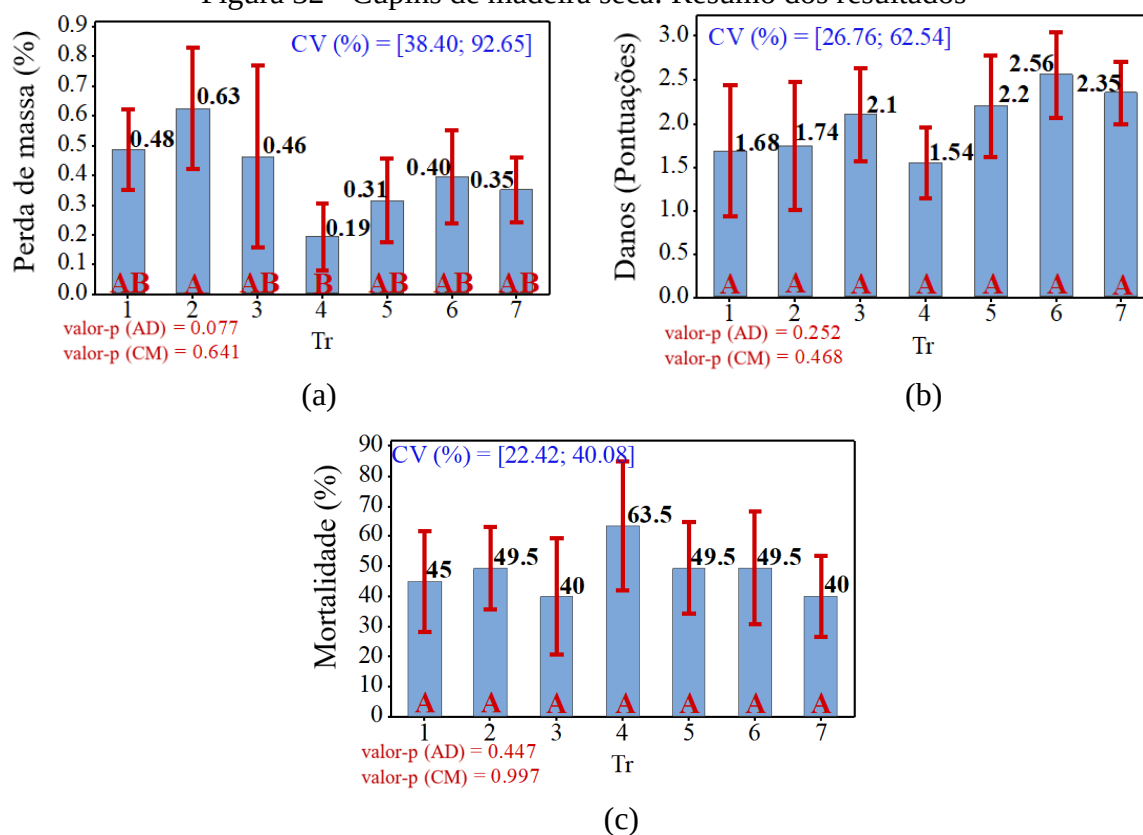
## 6 RESISTÊNCIA AO ATAQUE DE TÉRMITAS

Neste item estão descritos os resultados obtidos no estudo de biodegradação (alimentação forçada) quanto ao ataque de térmitas xilófagas das espécies *Cryptotermes* (madeira seca) e *Nasutitermes* (subterrâneas).

### 6.1 TÉRMITAS DE MADEIRA SECA

A Figura 32 apresenta os valores médios, os valores extremos dos coeficientes de variação (CV), os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade), os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) e os valores p do teste de normalidade de Anderson-Darling (AD - 5% de significância) e o teste de comparações múltiplas (CM - 5% de significância) para avaliar a homogeneidade das variâncias (5% de significância). Os valores-p do teste de normalidade e homogeneidade foram superiores ao nível de significância (5%) em todas as respostas avaliadas, o que valida os resultados do teste de Tukey.

Figura 32 - Cupins de madeira seca: Resumo dos resultados



Nota: (a) Perda de massa. (b) Danos (Pontuações). (c) Mortalidade. Letras iguais implicam tratamentos diferentes associados a médias estatisticamente equivalentes pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Fonte: Produção do próprio autor.



Em relação à perda de massa (Figura 32a), foi encontrada diferença significativa apenas entre T2 (maior média), T4 (menor média) e os demais não demonstraram diferença significativa entre eles. Contudo, a perda de massa de todos os tratamentos foi inferior a 1%, o que segundo Gonçalves *et al.* (2022) é considerado um valor baixo.

Quanto à classificação do dano visual (Figura 32b), T1, T2 e T4 podem ser classificados como 1 (desgaste superficial) enquanto T3, T5, T6 e T7 como 2 (desgaste moderado). Porém, não houve diferença estatisticamente significativa entre os danos de todos os tratamentos avaliados (Figura 32b) bem como para os valores de mortalidade (Figura 32c).

Tais resultados indicam que os painéis experimentais, com (T3, T4, T5 e T6) e sem tratamento térmico (T1 e T2) alcançaram propriedades de dano e mortalidade sem diferença significativa em comparação aos painéis comerciais (T7), que possuem conservantes químicos em sua composição para melhorar sua resistência ao ataque biológico.

Nesse sentido, é possível inferir que o tratamento térmico não aumentou a resistência contra danos e a mortalidade por cupins. Entretanto, pode-se concluir que, mesmo sem utilizar método preservativo contra cupins, os painéis experimentais apresentaram desempenho compatível com os comerciais. Indicando que este resultado provavelmente está relacionado à soma das características apresentadas na combinação de madeira (eucalipto) e adesivo (poliuretano derivado da mamona) utilizados na forma específica de produção adotada.

Este resultado está de acordo com o estudo de Ferro *et al.* (2016) que avaliaram a resistência a cupins de OSB fabricado com madeira *Paricá* colada com resina à base de óleo de mamona tratada com conservantes arseniato de cobre cromatado (CCA) e borato de cobre cromatado (CCB). Em seu trabalho, os painéis tratados e não tratados com CCB não apresentaram médias significativamente diferentes para a mortalidade de cupins. Assim, concluíram dizendo que o OSB fabricado com partículas não tratadas e o CCB tratado juntamente com adesivo de óleo de mamona apresentaram a mesma resistência ao ataque de cupins.

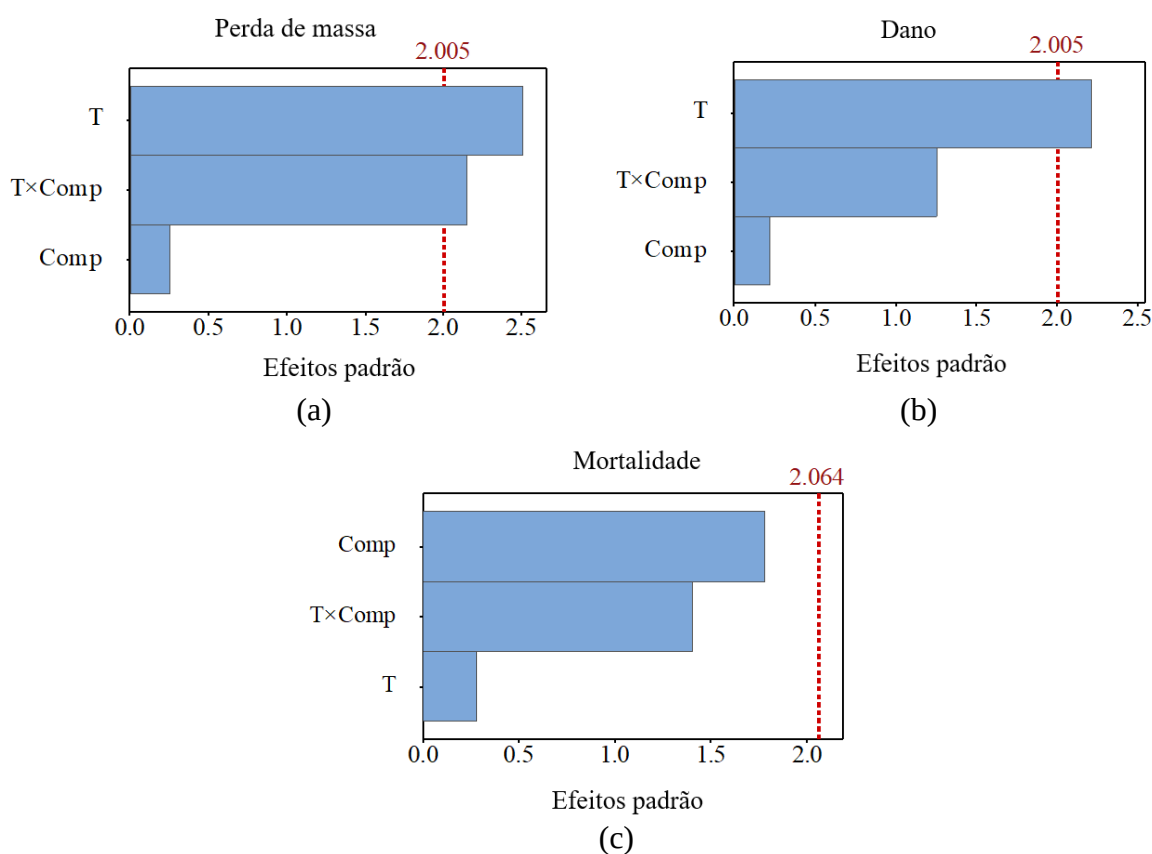
A American National Standard ASTM D3345 (ASTM, 1999) define os critérios para a mortalidade aproximada de cupins como baixa (0% a 33%), moderada (34% a 66%), alta (67% a 99%) e total (100%). Assim, adaptando esta classificação aos resultados obtidos dos cupins de madeira seca, verifica-se que todos os tratamentos avaliados apresentaram mortalidade moderada de cupins (40 a 63,5%).

De acordo com os resultados do estudo de Medeiros (2021), o tratamento térmico de clones de eucalipto não teve efeito no ataque de cupins de madeira seca no teste de alimentação forçada. Por outro lado, para Paes *et al.* (2022) a temperatura e o tempo de prensagem utilizados

para consolidar os painéis podem influenciar nos resultados porque esses fatores são responsáveis pela consolidação do material, e adicionalmente, o adesivo de mamona utilizado pode influenciar nos resultados dos cupins reduzindo o ataque devido ao seu caráter hidrofóbico.

Para explicar a influência dos fatores (T e Comp) nas propriedades avaliadas, a Figura 33 apresenta os gráficos e Pareto (resultados da ANOVA) referentes às propriedades estimadas nos testes de alimentação forçada com cupins de madeira seca, cabendo destacar ser constatada (valor- $p > 0.05$ ) a normalidade e a homogeneidade de variâncias dos resíduos da ANOVA, o que valida os resultados obtidos da análise de variância.

Figura 33 - Cupins de madeira seca: Gráficos de Pareto



Nota: (a) Perda de massa. (b) Danos (Pontuações). (c) Mortalidade.

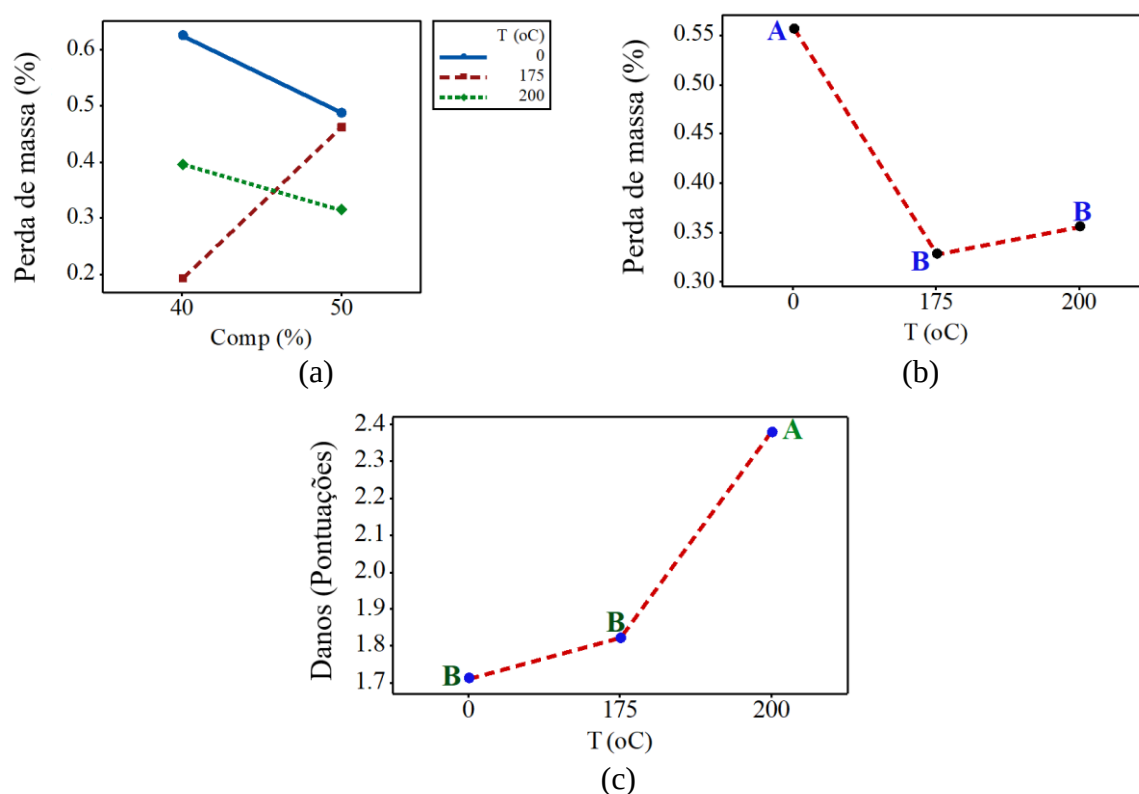
Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da Figura 33a, constata-se que a temperatura (de forma isolada) e a interação entre os dois fatores ( $T \times \text{Comp}$ ) afetaram significativamente a perda de massa dos painéis experimentais, porém, a composição (de forma isolada) não promoveu alterações significativas nesta propriedade.

O dano (Figura 33b) foi afetado significativamente apenas pela temperatura, e a Mortalidade (Figura 33c) não sofreu alterações significativas dos efeitos isolados ou do efeito de interação.

A Figura 34 apresenta os gráficos de efeitos principais e de interação dos fatores considerados significativos sobre propriedades avaliadas nos ensaios de alimentação forçada com térmitas de madeira seca.

Figura 34 - Cupins de madeira seca: Efeitos principais e interação dos fatores



Nota: (a) Perda de massa  $\times$  Comp. (b) Perda de massa  $\times$  T. (c) Danos  $\times$  T. As composições (Comp) foram representadas apenas pela proporção de partículas de madeira no núcleo do painel.

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 34a é possível observar que para a interação  $T \times \text{Comp}$  na perda de massa, para as temperaturas 0° e 200 °C a perda de massa diminuiu com o aumento da proporção de partículas de madeira no núcleo, enquanto para a 175° ocorreu o oposto.

Sobre a influência do T na perda de massa (Figura 34b), 0° apresentou maior média, conforme esperado para os painéis não tratados (0,55%) e diferiram estatisticamente de 175 e 200 °C que não diferiram entre si e apresentaram médias de 0,33% (menor média) e 0,36% respectivamente.

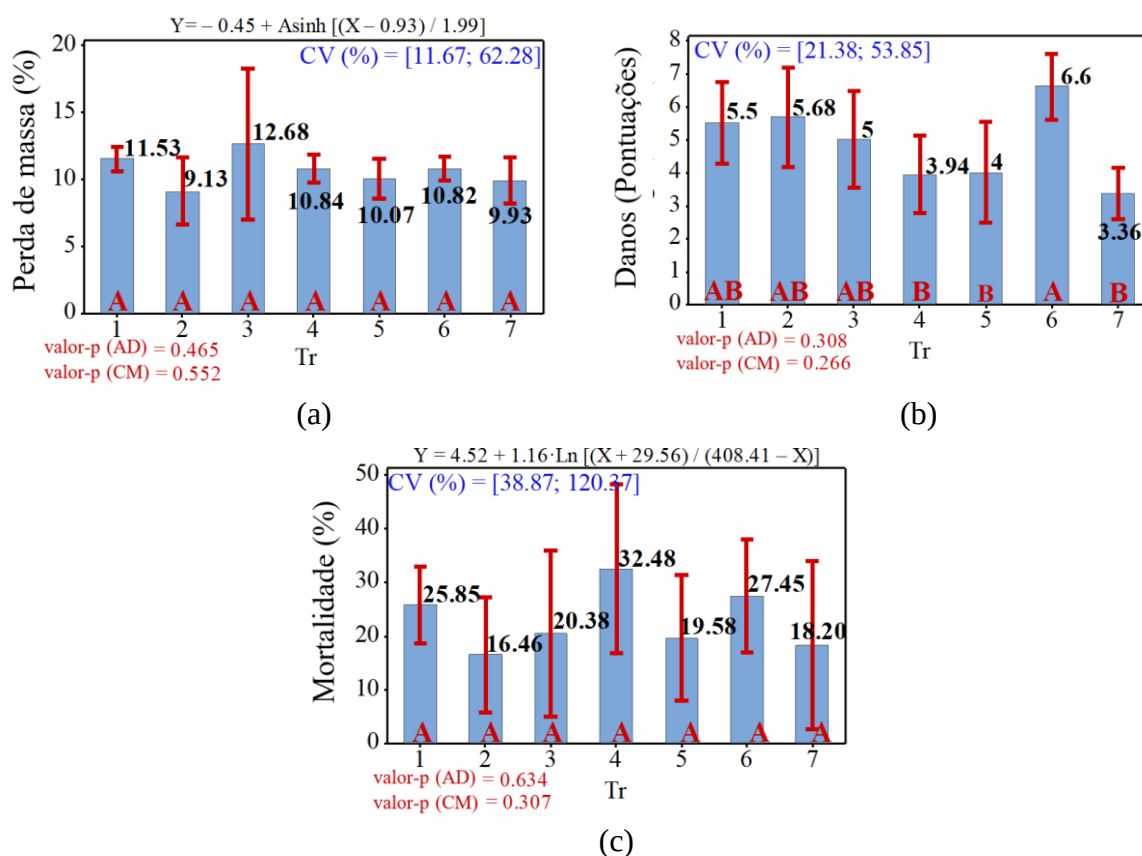
Em relação às classificações de danos  $\times$  T (Figura 34c), quanto maior a temperatura, maior o dano, e a temperatura de 200 °C diferiu estatisticamente de 0 e 175 °C.

## 6.2 TÉRMITAS SUBTERRÂNEAS

A Figura 35 apresenta os valores médios, os valores extremos dos coeficientes de variação (CV), os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade), os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) e os valores p de o teste de normalidade de Anderson-Darling (5% de significância) e o teste de comparações múltiplas (CM) para avaliação da homogeneidade das variâncias (5% de significância).

Os valores-p do teste de normalidade e homogeneidade das variâncias foram superiores ao nível de significância (5%) em todas as respostas, o que valida os resultados do teste de Tukey, cabendo destacar que a transformada de Johnson foi aplicada sobre os resultados da perda de massa e da mortalidade.

Figura 35 - Cupins subterrâneos: Resumo dos resultados



Nota: (a) Perda de massa. (b) Danos (Pontuações). (c) Mortalidade. Letras iguais implicam tratamentos distintos associados a médias estatisticamente equivalentes pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância).

Fonte: Produção do próprio autor.

Alguns estudos indicam que a perda de massa de madeira é o principal critério para avaliar os preservativos de madeira (HASSAN; MORRELL, 2021) sendo um bom parâmetro para avaliar a qualidade dos painéis em relação à resistência ao ataque biológico.

Para a avaliação do teste de alimentação forçada com cupins subterrâneos, não foram encontradas diferenças estatísticas nos resultados de perda de massa (Figura 35a) e mortalidade (Figura 35c) para todos os tratamentos avaliados. Diante disto, como não foram encontradas diferenças estatísticas entre os painéis com conservantes químicos e os demais para estas propriedades, considera-se que todos os painéis experimentais, mesmo aqueles sem qualquer tratamento, apresentaram bom desempenho, compatível com os painéis disponíveis no mercado.

Este resultado é semelhante aos resultados de Ferro *et al.* (2016) onde os autores concluíram que a resina de mamona é eficiente contra o ataque de cupins, uma vez que em seu trabalho os painéis não tratados e tratados não apresentaram diferenças significativas entre as médias de perda de massa.

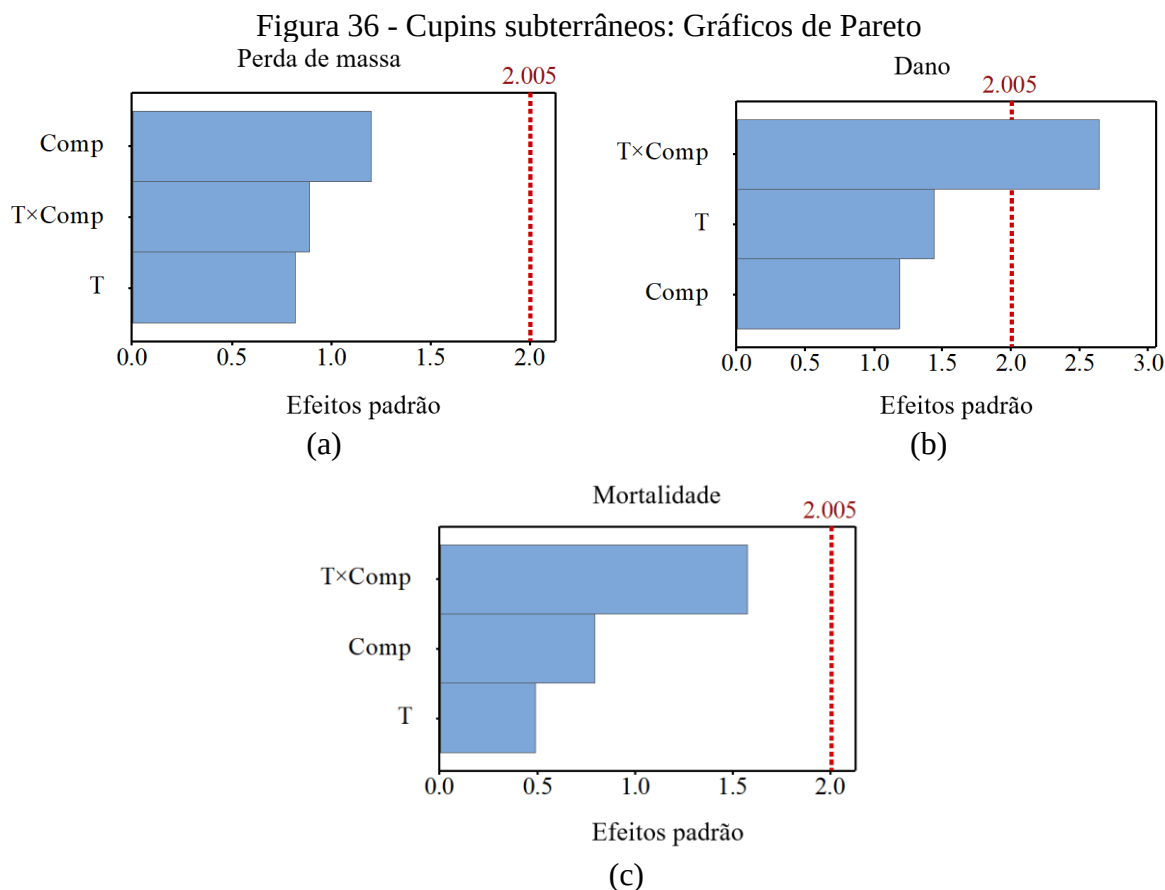
De acordo com Lee *et al.* (2023b) a resistência dos painéis aos cupins é afetada pelas espécies de madeira que as constituem. Desta forma, devido aos resultados promissores, pode-se considerar que a madeira de eucalipto teve um bom comportamento para ser utilizada na produção de OSB com adesivo de mamona, uma vez que a maioria dos resultados não demonstrou diferença significativa entre painéis experimentais e comerciais.

Adaptando a classificação da ASTM D3345 (ASTM, 1999) aos resultados dos cupins subterrâneos, verifica-se que todos os tratamentos avaliados apresentaram baixa mortalidade de cupins (16,46 a 32,48%).

Em relação aos danos (Figura 35b), os resultados mostraram algumas diferenças estatísticas entre eles. Para a classificação do dano, quanto maior a pontuação, menor o dano causado pelo ataque. Dessa forma, T4, T5 e T7 tiveram ataque intenso (*score* de 0 a 4) e não houve diferença estatística entre eles. T1, T2, T3 apresentaram ataque moderado (4 a 7) e sem diferença significativa entre eles. T6 também apresentou ataque moderado, mas com diferença significativa em relação a T1, T2 e T3.

Neste sentido, o painel comercial (T7) obteve o maior dano (3,36 - ataque intenso), enquanto os painéis sem qualquer tipo de tratamento preservativo (T1, T2) estão entre os que apresentaram ataque moderado.

Na Figura 36 são apresentados os gráficos e Pareto (resultados da ANOVA) referentes às propriedades avaliadas nos testes de alimentação forçada com cupins subterrâneos, destacando a normalidade e homogeneidade das variâncias dos resíduos da ANOVA (valor- $p > 0,05$ ).

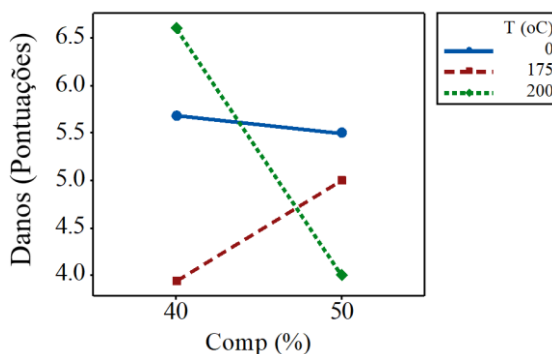


Nota: (a) Perda de massa. (b) Danos (Pontuações). (c) Mortalidade.

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 36, a mortalidade e a perda de massa não foram significativamente afetadas pelos dois fatores isoladamente nem pela interação entre eles. Porém, notou-se que a interação entre os fatores ( $T \times \text{Comp}$ ) afetou significativamente os valores de danos (Figura 37). Para as temperaturas  $0^\circ$  e  $200^\circ\text{C}$  o *score* de dano diminuiu com o aumento da proporção de partículas de madeira no núcleo do painel, enquanto para  $175^\circ\text{C}$  ocorreu o contrário.

**Figura 37 - Cupins subterrâneos: Interação de fatores significativos**



Nota: As composições (Comp) foram representadas apenas pela proporção de partículas de madeira do núcleo do painel.

Fonte: Produção do próprio autor.

### 6.3 CONSIDERAÇÕES

Este capítulo investigou a resistência biológica a cupins (*Cryptotermes brevis* Walker e *Nasutitermes corniger* Motsch) de painéis OSB confeccionados com matérias-primas não tradicionais (madeira de eucalipto e adesivo derivado de óleo de mamona) em diferentes composições de camadas (face:núcleo:face de 25: 50:25 e 30:40:30), submetidos a tratamento térmico pós-produção de 175 e 200°C. Foram avaliadas a influência das variações das camadas e da temperatura de tratamento térmico e estes resultados também foram comparados com painéis comerciais.

#### 6.3.1 Térmitas de madeira seca (*Cryptotermes*)

A perda de massa de todos os tratamentos foi inferior a 1%, o que é considerado baixo. Todos os tratamentos não apresentam diferença estatisticamente significativa nos valores médios de mortalidade e dano. O dano foi classificado entre dano superficial e moderado. A mortalidade para todos os tratamentos foi classificada como moderada.

A temperatura (isolada) e a interação entre temperatura e composição afetaram significativamente a perda de massa dos painéis experimentais, porém, a composição (isolada) não promoveu alterações significativas nesta propriedade. Para a interação temperatura e composição na perda de massa, para 0° e 200°C a perda de massa diminuiu com o aumento da proporção de partículas de madeira no núcleo, enquanto para 175° ocorreu o contrário.

Quanto à influência da temperatura na perda de massa 0° apresentou média superior, conforme esperado para os painéis não tratados (0,55%) e diferiu estaticamente dos demais. O dano foi afetado significativamente apenas pela temperatura onde, quanto maior a temperatura, maior o dano, e a temperatura de 200 °C diferiu estatisticamente das demais. A mortalidade não sofreu alterações significativas pelos efeitos isolados ou pelo efeito de interação.

#### 6.3.2 Térmitas subterrâneas (*Nasutitermes*)

Não foram encontradas diferenças estatísticas nos resultados de perda de massa e mortalidade para todos os tratamentos. Todos os tratamentos avaliados apresentaram baixa mortalidade de cupins. Em relação aos danos, os resultados mostraram algumas diferenças estatísticas entre eles. T4, T5 e T7 tiveram ataque pesado e não houve diferença estatística entre eles. T1, T2, T3 apresentaram ataque moderado e sem diferença significativa entre eles. T6 também apresentou ataque moderado, mas com diferença significativa em relação aos demais.

A mortalidade e a perda de massa não foram significativamente afetadas apenas pela temperatura e composição, nem pela interação entre elas. A interação entre temperatura e composição afetou significativamente os valores de danos. Para 0° e 200 °C o índice de danos diminuiu com o aumento da proporção de partículas de madeira no núcleo, enquanto para 175 °C ocorreu o contrário.

### 6.3.3 Observações gerais

De modo geral, os painéis comerciais apresentaram maior dano visual se comparados aos encontrados nos painéis experimentais (sem qualquer tipo de conservante, ou seja, T1 e T2) para ambos os testes de biodeterioração (*Cryptotermes* e *Nasutitermes*).

O tratamento térmico não melhorou a resistência ao ataque de cupins. Porém, todos os painéis experimentais avaliados, mesmo aqueles sem nenhum tratamento, apresentaram bom desempenho técnico, compatível com os painéis disponíveis no mercado brasileiro (que utilizam aditivos químicos). Levando a entender que a combinação de matérias-primas (madeira de eucalipto e adesivo de mamona) utilizadas para produzir OSB em qualquer variação de composição das camadas, demonstrou resistência contra agentes xilófagos compatível com os painéis comerciais (mesmo sem utilização de tratamento preservativo). Demonstrando que os materiais utilizados são boas alternativas sustentáveis para a produção de OSB em termos de resistência à biodegradação, possivelmente relacionada à característica hidrofóbica do adesivo.

Estes resultados fornecem evidências para apoiar os tomadores de decisão sobre a viabilidade do uso destas alternativas inovadoras e ecologicamente corretas para produzir placas OSB.



## 7 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS PAINÉIS OSB

Neste capítulo é apresentado o conteúdo derivado do artigo intitulado “*Environmental Evaluation of Experimental Heat-treated Oriented Strand Board*” de Sugahara, E. S., Dias, A. M. A., Botelho, E. C., Dias, A. M. P. G., and de Campos, C. I. publicado na revista BioResources v. 19(1), 732 p. 1-19, 2024, doi: 10.15376/biores.19.1.732-750 (SUGAHARA *et al.*, 2024), o qual apresenta a avaliação do ciclo de vida dos painéis produzidos neste trabalho (Figura 38).

Figura 38 - Artigo: Environmental Evaluation of Experimental...

PEER-REVIEWED ARTICLE [bioresources.cnr.ncsu.edu](https://bioresources.cnr.ncsu.edu)

### Environmental Evaluation of Experimental Heat-treated Oriented Strand Board

Estefani S. Sugahara,<sup>a,b,\*</sup> André Manuel Alves Dias,<sup>b,c</sup> Edson Cocchieri Botelho,<sup>a</sup> Alfredo Manuel Pereira Geraldes Dias,<sup>b,c</sup> and Cristiane Inácio de Campos<sup>a</sup>

The use of wood-based panels such as Oriented Strand Board has grown in civil construction. This follows the contemporary trend towards low environmental impact materials. However, there is a lack of relevant information about their life cycle assessment, appearing as a current and relevant research topic. Experimental panels made with *Eucalyptus* wood and castor oil-based polyurethane adhesive already demonstrated great physical-mechanical performance. Therefore, this study aimed to continue the evaluation of this innovative product, estimating their potential environmental impacts using life cycle assessment from a cradle-to-gate perspective and comparing the results with traditional panels and literature data. System boundaries, environmental impacts and environmental hotspots were identified using the ReCiPe H method in terms of ten impact categories. Comparing experimental (heat-treated) and traditional panels, the experimental versions performed better in most categories and showed safer behavior in categories related to human health in addition to not using paraffin, termiticide, and other organic chemicals presented in the traditional panels. Though made of different types of adhesives, the adhesive was the main environmental hotspot for both types.

DOI: 10.15376/biores.19.1.732-750

Keywords: Environmental impacts; Life cycle assessment; LCA; Construction industry; OSB

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2024).

## 7.1 RESUMO DO CAPÍTULO

A utilização de painéis derivados de madeira, como o *Oriented Strand Board*, tem crescido na construção civil. Isto segue a tendência contemporânea de materiais de baixo impacto ambiental. Contudo, faltam informações relevantes sobre a avaliação do seu ciclo de vida, aparecendo como um tema de pesquisa atual e relevante. Painéis experimentais confeccionados com madeira de eucalipto e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona já demonstraram ótimo desempenho físico-mecânico. Portanto, este estudo teve como objetivo dar continuidade à avaliação deste produto inovador, estimando seus potenciais impactos ambientais utilizando a avaliação do ciclo de vida numa perspectiva do berço ao portão e comparando os resultados com painéis tradicionais e dados da literatura. Os limites do sistema, os impactos ambientais e os pontos críticos ambientais foram identificados usando o método ReCiPe H em termos de dez categorias de impacto. Comparando os painéis experimentais (tratados termicamente) e tradicionais, as versões experimentais tiveram melhor desempenho na maioria das categorias e apresentaram comportamento mais seguro nas categorias relacionadas à saúde humana, além de não utilizarem parafina, cupinicida e outros produtos químicos orgânicos apresentados nos painéis tradicionais. Embora feito de diferentes tipos de adesivos, o adesivo foi o principal *hotspot* ambiental para ambos os tipos de painéis.

**Palavras-chave do capítulo:** Impactos ambientais; Avaliação do ciclo de vida; LCA; Indústria da construção; OSB.

## 7.2 INTRODUÇÃO

Devido à sua influência, a indústria da construção deve desempenhar um papel importante na diminuição do uso de recursos naturais, do consumo de energia e da geração de resíduos. Desta forma, a Avaliação do Ciclo de Vida - LCA (ISO, 2006a, 2006b) é um método valioso para identificar sistemas ou elementos dos edifícios que têm efeitos negativos no meio ambiente, e recomenda-se que seja realizada para orientar positivamente a escolha de soluções ambientalmente mais amigáveis (CASCIONE *et al.*, 2022).

As inovações tecnológicas na indústria da construção estão consistentemente relacionadas ao desenvolvimento e aplicação de novos materiais (MONTEIRO *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2015; KUILEN; DIAS, 2011). Os painéis derivados de madeira têm sido cada vez mais aplicados na construção civil, dada a tendência existente para materiais com reduzidos

impactos ambientais (POZZER *et al.*, 2020). Esses benefícios incluem baixo consumo de energia e baixas emissões de CO<sub>2</sub> (WINDT *et al.*, 2018).

Painéis derivados de madeira são produtos de madeira “engenheirada” feitos com madeira colada com adesivos (FARJANA *et al.*, 2023). São comumente utilizados na construção civil como uma alternativa acessível e adaptável. O desempenho dos painéis é muito afetado pelos adesivos utilizados em sua fabricação (LEE *et al.*, 2023a). No entanto, os adesivos frequentemente utilizados estão ligados a preocupações relacionadas à origem não renovável, compostos orgânicos voláteis e substâncias perigosas devido à sua toxicidade e natureza cancerígena (BARBIRATO *et al.*, 2019a).

Estão surgindo preocupações em relação aos impactos ambientais resultantes da fabricação e da gestão do fim de vida de produtos de madeira “engenheirada” como resultado da crescente demanda por produtos à base de madeira no setor de construção mundial (FARJANA *et al.*, 2023), que é apoiado pelo impacto incorporado do carbono biogênico de edifícios em madeira (NOROUZI *et al.*, 2023).

Esses produtos têm apresentado possibilidades de aplicações crescentes em diversos setores industriais, com destaque para construção civil e indústria moveleira. Com esse crescimento, torna-se essencial produzir novos materiais de forma sustentável, apresentando propriedades, durabilidade e qualidade semelhantes se comparados aos produtos industriais já disponíveis no mercado (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Apesar da característica neutra em carbono dos materiais à base de madeira, eles geralmente apresentam uma longa vida útil e uma cadeia produtiva multifuncional, provocando preocupações ligadas ao seu ciclo de vida. Nesse sentido, devido aos seus potenciais desafios, é fundamental atuar e compreender os aspectos ambientais para lidar com possíveis problemas (GARCIA; FREIRE, 2014). E a LCA é uma ferramenta eficaz para fazer essas avaliações (DENG *et al.*, 2023).

A LCA não é apenas um instrumento para melhorar o meio ambiente, mas também desempenha um papel importante no avanço do crescimento competitivo e sustentável como um instrumento para a indústria. A LCA tem potencial para revelar economia de custos e vantagens competitivas, além do seu papel na economia de recursos naturais e de energia e na minimização da poluição e do desperdício. A LCA apoia habilmente os tomadores de decisão com dados científicos e conjuntos de valores e é também uma fonte essencial para a rotulagem ecológica exigida por consumidores, ONGs e autoridades internacionais. Nesse sentido, novos materiais e produtos devem ser baseados no conceito de LCA (JENSEN *et al.*, 1997).

A LCA aborda os aspectos ambientais e os potenciais impactos ambientais, por exemplo, o uso de recursos e os efeitos ambientais das emissões, relacionados com a unidade funcional de um sistema ou produto através de um ciclo de vida desde a aquisição de matéria-prima até a produção, uso, tratamento ao fim de vida, reciclagem e disposição final (ISO, 2006b).

Existem numerosos estudos publicados que avaliaram os aspectos ambientais de produtos à base de madeira aplicados como materiais de construção na construção civil, como madeira em toras (DIAS; ARROJA, 2012; DIAS *et al.*, 2022; KUKA *et al.*, 2019), produtos estruturais de madeira (DIAS, A. M.A. *et al.*, 2021; DIAS *et al.*, 2020; HILL; DIBDIAKOVA, 2016; LAURENT *et al.*, 2016; SCOUSE *et al.*, 2020), pisos de madeira (DIAS, A. M.A. *et al.*, 2021; DIAS, André M.A. *et al.*, 2021; DOSSCHE *et al.*, 2018), portas de madeira (DENG *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2023), e diferentes tipos de painéis derivados de madeira ou produtos feitos com painéis de madeira (BENETTO *et al.*, 2009; ARAÚJO *et al.*, 2022; FARJANA *et al.*, 2023; FERRO *et al.*, 2018; GARCIA; FREIRE, 2014; GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2011; LI *et al.*, 2019; MAODUŠ *et al.*, 2016; RIVELA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2013).

No entanto, particularmente no que diz respeito aos painéis *Oriented Strand Board* (OSB), existe uma relativa escassez de informação relevante ao longo da avaliação da sustentabilidade do seu ciclo de vida. A maioria dos estudos disponíveis na literatura tem-se centrado apenas no desempenho dos painéis de madeira na medição das suas propriedades físicas e mecânicas (WERNER; RICHTER, 2007). Mas para fabricar materiais de construção sustentáveis, é imperativo avaliar também os seus impactos ambientais (SUGAHARA *et al.*, 2023).

Os edifícios com estruturas do tipo “*frame*” geralmente têm um impacto mais favorável no meio ambiente se comparados aos edifícios com paredes estruturais pesadas, que consomem mais materiais (JASIOŁEK *et al.*, 2023). E os painéis OSB são os painéis à base de madeira mais utilizados construção em estruturas leves de madeira (LEE *et al.*, 2023a).

A produção e o consumo de OSB a nível mundial estão a crescer, tendo aumentado aproximadamente 24% e 26%, respectivamente, entre os anos de 2016 e 2020 (FAO, 2022). Mas apesar do crescimento do consumo, é também notável que os componentes tradicionais do OSB podem possivelmente ser feitos de produtos químicos nocivos e podem ser questionáveis em termos de sustentabilidade (FARJANA *et al.*, 2023). Por exemplo, podem incorporar adesivos à base de formaldeído que podem apresentar natureza tóxica e cancerígena (BARBIRATO *et al.*, 2019a). Eles também podem conter o cupinicida piretróide. Este último é aplicado em painéis para melhorar sua durabilidade contra o ataque de organismos

apodrecedores da madeira, mas pode apresentar contribuições preocupantes ao impacto ambiental (FERRO *et al.*, 2018).

Os produtos de base biológica, como aqueles à base de madeira, tornaram-se uma área prioritária porque podem funcionar como uma solução para a substituição de materiais e, também, podem apresentar melhorias relacionadas com as preocupações de biodegradabilidade, renovabilidade ou compostabilidade dos produtos (BIANCO *et al.*, 2021).

Além da necessidade de materiais alternativos mais sustentáveis, é vital pesquisar diversos tipos de materiais e métodos para garantir que os painéis atendam aos requisitos (estruturais, de durabilidade e estéticos) para serem empregados com segurança. Diante disso, é imperativo estudar recursos lignocelulósicos alternativos, adesivos e técnicas para garantir a resistência ao ataque de cupins, substituindo conservantes químicos por sistemas possivelmente menos perigosos, como o tratamento térmico (SUGAHARA *et al.*, 2022).

Considerando esse cenário, a avaliação de *hotspots* ambientais ligados à fabricação de OSB é um campo de pesquisa contemporâneo, apropriado e de grande relevância (SUGAHARA *et al.*, 2023). Em trabalhos anteriores já foi constatado que painéis OSB experimentais confeccionados com madeira de eucalipto e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona obtiveram desempenho físico-mecânico compatível com a classificação EN 300 para OSB, apresentando viabilidade técnica e excelente perfil estrutural para aplicações na construção civil (SUGAHARA *et al.*, 2022b). No entanto, ainda não existe uma pesquisa de LCA que aborde o desempenho ambiental deste tipo de painéis.

Este capítulo teve os seguintes objetivos: i) estimar os potenciais impactos ambientais relacionados com a produção experimental de OSB tratado termicamente feito com estas matérias-primas alternativas, utilizando a metodologia LCA numa perspectiva *cradle-to-gate*; e ii) comparar os resultados com os impactos ambientais de painéis tradicionais e dados da literatura. Ao avaliar os potenciais impactos ambientais desta solução inovadora, este estudo relatou avanços no campo apresentando alternativas para contribuir para o alcance dos alvos de sustentabilidade global.

### 7.3 EXPERIMENTAL

Esta seção descreve os detalhes e limitações da modelagem LCA dos painéis OSB. Define também os objetivos e o escopo, a unidade funcional, os limites do sistema e as categorias de impacto em avaliação, bem como as fases de inventário do ciclo de vida (LCI), avaliação de impacto do ciclo de vida (LCIA) e interpretação.

### 7.3.1 Definição do objetivo e escopo

Este artigo teve como objetivo quantificar os potenciais impactos ambientais relacionados à produção experimental de OSB tratado termicamente (H\_OSB) feito com matérias-primas alternativas, utilizando a metodologia LCA. Os resultados foram analisados e comparados com os resultados de impacto ambiental dos painéis tradicionais (G\_OSB) disponíveis na base de dados do software e com dados da literatura.

Para avaliação dos painéis experimentais, os dados foram adquiridos por meio de levantamento junto ao fabricante seguindo a norma ISO 14040 (ISO, 2006a), estudos anteriores, revisão de literatura e banco de dados de processos disponíveis no software (por exemplo, Ecoinvent).

A unidade funcional adotada foi 1 m<sup>3</sup> de OSB, assumindo densidade nominal de 780 kg/m<sup>3</sup> para painel experimental, sem revestimento. O âmbito do estudo foi do berço ao portão (*cradle-to-gate*), incluindo a extração e preparação de matérias-primas e a produção de painéis OSB (as fases de construção, utilização do produto e fim de vida não foram consideradas nesta avaliação). Para este estudo, o público-alvo consiste em pesquisadores de OSB e matérias-primas, representantes da indústria, tomadores de decisão e profissionais de LCA.

Os fatores de caracterização descritos no método ReCiPe Midpoint (H) foram considerados para realizar a avaliação dos impactos ambientais associados ao sistema de produção de OSB. Foram analisados dez indicadores de categorias de impacto ambiental, conforme descrito no Quadro 4.

Para esta LCA, as comparações foram feitas considerando as limitações das categorias de impacto, lacunas de dados, modelos de caracterização, limites do sistema e inclusão/exclusão ou diferenças de insumos e produtos descritos na seção experimental.

Quadro 4 - Indicadores de categoria de impacto ambiental utilizados

(continua)

| <i><b>Categoria de Impacto</b></i>         | <i><b>Descrição</b></i>                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Mudanças climáticas (CC)</i>            | <i>Descreve o aumento da temperatura média do planeta devido às emissões de gases de efeito estufa de origem antrópica (ARAÚJO et al., 2022). Medido em kg CO<sub>2</sub> eq.</i>                                                                                                        |
| <i>Destruição da camada de ozônio (OD)</i> | <i>A destruição da camada de ozônio representa a força relativa de um produto ou processo para destruir a camada de ozônio estratosférico por meio de emissões antrópicas de substâncias destruidoras da camada de ozônio (ARAÚJO et al., 2022; DIAS, 2022). Medido em kg CFC-11 eq.</i> |

Quadro 4 - Indicadores de categoria de impacto ambiental utilizados (conclusão)

| <i><b>Categoria de Impacto</b></i>            | <i><b>Descrição</b></i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Acidificação terrestre (TA)</i>            | <i>Calculado em termos de liberações de <math>H^+</math> sem abordar o destino dos produtos químicos no ar e nas emissões do solo e após deposições. Acontece predominantemente devido à precipitação de <math>NH_3</math>, <math>NO_2</math>, <math>NO</math>, <math>SO_2</math> e <math>SO_3</math> (DIAS, 2022). Medido em kg <math>SO_2</math> eq.</i> |
| <i>Eutrofização de água doce (FE)</i>         | <i>Avalia os efeitos da eutrofização nos ecossistemas marítimos (DIAS, 2022). Associado ao elevado nível de nutrientes nos ecossistemas, especialmente na multiplicação de algas aquáticas (ARAÚJO et al., 2022). Medido em kg P eq (FE) e kg N eq (ME).</i>                                                                                               |
| <i>Eutrofização marinha (ME)</i>              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <i>Toxicidade humana (HT)</i>                 | <i>Avaliar os impactos dos elementos químicos na saúde humana através do ar, solo e água (DIAS, 2022) (com efeitos cancerígenos). Medido em kg 1,4-DCB.</i>                                                                                                                                                                                                |
| <i>Formação de oxidante fotoquímico (POF)</i> | <i>Aborda os impactos do ozônio e de outros compostos de oxigênio produzidos pela oxidação de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs), sob influência da luz solar (DIAS, 2022) na saúde humana. Medido em kg <math>NO_x</math> eq.</i>                                                                                                                        |
| <i>Ecotoxicidade terrestre (TET)</i>          | <i>Quantifica os impactos de substâncias químicas que afetam diferentes espécies e ecossistemas (ARAÚJO et al., 2022; DIAS, 2022). Medido em kg 1,4-DCB.</i>                                                                                                                                                                                               |
| <i>Ecotoxicidade de água doce (FET)</i>       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <i>Esgotamento Fóssil (FD)</i>                | <i>Relacionado ao uso de recursos fósseis (DIAS, 2022). Medido em kg óleo eq.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                          |

Fonte: Adaptado de Sugahara et al. (2024).

### 7.3.2 Estudo de caso

O objeto de investigação deste estudo são painéis OSB experimentais fabricados para atender aplicações destinadas a fins estruturais na construção civil seguindo os atuais processos de produção europeus disponíveis na base de dados Ecoinvent (ECOINVENT 3.6, 2019).

Os painéis OSB experimentais deste estudo foram baseados naqueles produzidos no trabalho de Sugahara et al., (2022b), adotando materiais e métodos semelhantes para produção e tratamento térmico.

Desta forma, como matéria-prima foi considerado o *Eucalyptus ssp.*, uma madeira reflorestada com densidade de 520 kg/m<sup>3</sup>. E o poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona, que é um adesivo biodegradável de origem renovável obtido a partir de óleo vegetal

(BARBIRATO *et al.*, 2019a). Após a produção, o OSB experimental foi submetido a tratamento térmico, em substituição ao uso de conservantes químicos para madeira, que podem apresentar potencial toxicidade (SUGAHARA *et al.*, 2022).

O modelo de LCA aplicado neste estudo seguiu os procedimentos das normas ISO 14040 (ISO, 2006a), ISO 14044 (ISO, 2006b) e EN 15804+A2 (CEN, 2019), considerando fatores de caracterização reportados pelo ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010), Método H.

O software SimaPro (PhD with Share & Collect, versão 9.1.0.7) foi usado para implementar os conjuntos de dados mundiais de impactos ambientais do LCI, como Ecoinvent 3, ELCD. Nas próximas seções, são detalhadas as quatro etapas de um estudo de LCA: definição de objetivo e escopo, inventário, avaliação de impacto e interpretação.

### 7.3.3 Descrição do Produto e Sistema em Avaliação

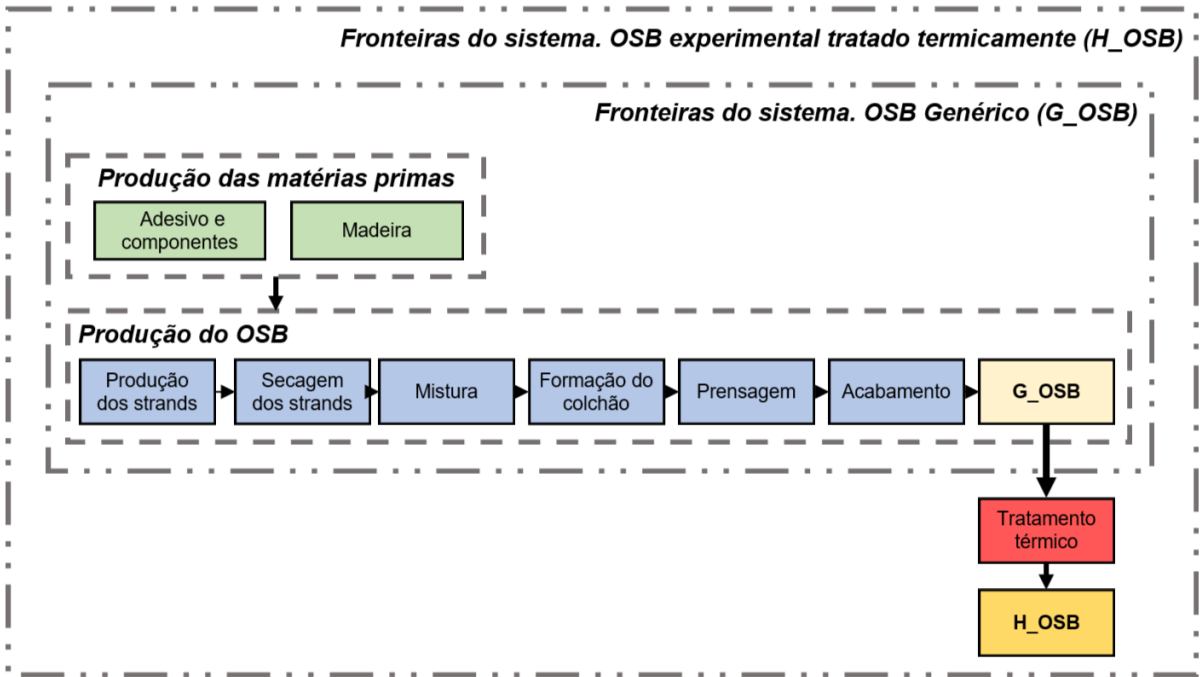
O OSB avaliado neste estudo é projetado para usos estruturais com propriedades físicas e mecânicas compatíveis com os requisitos da EN 300 (BSI, 2006). Os itens foram modelados com base nos painéis OSB já produzidos no trabalho anterior de Sugahara *et al.* (2022b), que atendem aos limites do sistema do OSB genérico (G\_OSB) disponível no inventário da base de dados Ecoinvent 3 (ECOINVENT 3.6, 2019). Esse processo foi utilizado como modelo de avaliação e comparação neste estudo.

O sistema de produção de G\_OSB consiste nas etapas de fabricação e secagem dos *strands*, mistura dos *strands* em tambor rotativo com névoa de resina e aditivos, formação do colchão de partículas em esteira transportadora contínua com serra de corte, prensagem sob alta temperatura e acabamento (ECOINVENT 3.6, 2019).

Para o OSB experimental (H\_OSB), foi considerado o mesmo sistema de produção do G\_OSB, porém, uma etapa de tratamento térmico foi adicionada após a produção do OSB. Os limites do sistema do ciclo de vida do OSB em estudo (do berço ao portão) são apresentados na Figura 39.



Figura 39 - Limites do sistema dos painéis OSB



Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2024).

Para a avaliação dos impactos ambientais dos painéis experimentais (H\_OSB), foram feitas algumas modificações nos dados do arquivo original (G\_OSB). Neste contexto, foram utilizados dados de fontes secundárias como base para o LCI.

Essas mudanças consistiram na substituição de alguns parâmetros específicos de produtos e processos disponíveis no conjunto de dados de software a partir de informações obtidas através de levantamento de fabricantes ou estudos anteriores e seguindo a norma ISO 14040 (ISO, 2006a). O Quadro 5 explica os detalhes dessas modificações.

Quadro 5 - Comentários e fontes de dados/procedimentos utilizados no LCI (continua)

| Item        | Ações e fontes de dados/procedimentos utilizados                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Painéis OSB | Foi considerado para o H_OSB; densidade nominal de 780 kg/m³; utilizou-se 10% de adesivo com base na massa seca dos strands de madeira (SUGAHARA <i>et al.</i> , 2022b).                                                                                                                                    |
| Madeira     | A madeira conífera genérica do G_OSB foi substituída por <i>Eucalyptus spp.</i> no H_OSB. Consequentemente, a quantidade de dióxido de carbono sequestrado foi substituída de acordo com a densidade da madeira utilizada no OSB experimental (520 kg/m³ a 12% de umidade) (SUGAHARA <i>et al.</i> , 2022b) |

Quadro 5 - Comentários e fontes de dados/procedimentos utilizados no LCI  
(conclusão)

| Item               | Ações e fontes de dados/procedimentos utilizados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Adesivo            | <i>O adesivo MDI foi substituído no H_OSB por um novo que foi criado para representar o adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona. Para modelar este produto, os dados utilizados foram fornecidos pela indústria do adesivo e modelados seguindo os mesmos procedimentos descritos no estudo de Sugahara et al. (2023).</i>                                                                                                                                                                                               |
| Tratamento Térmico | <i>O tratamento térmico do H_OSB modelado foi realizado em estufa convencional sem reposição de atmosfera a 175 °C, com o painel acomodado no forno em temperatura ambiente e ali mantido por 60 minutos de tratamento térmico após atingir a temperatura esperada, totalizando 125 min e taxa de aquecimento de aproximadamente 2,7 °C/min (SUGAHARA et al., 2022b).</i>                                                                                                                                                       |
| Outros             | <i>No H_OSB foram excluídos aditivos químicos como Acetaldeído, Formaldeído, Metanol e NMVOC (compostos orgânicos voláteis não metano, origem não especificada) e parafina relacionados ao processo de secagem da cola para madeira (SUGAHARA et al., 2023).</i><br><i>No G_OSB foi incluído o cupinicida piretróide, que é aplicado nos painéis para melhorar sua resistência ao ataque de organismos apodrecedores da madeira, na mesma quantidade utilizada para produzir um m³ de OSB no estudo de Ferro et al. (2018).</i> |

Fonte: Adaptado de Sugahara et al. (2024).

### 7.3.4 Inventário do Ciclo de Vida

O inventário de processos para modelar a LCA dos painéis baseou-se principalmente em processos pré-definidos incluídos na base de dados Ecoinvent ou criados/adaptados aos parâmetros específicos deste trabalho. Os dados do inventário global por unidade funcional do OSB experimental tratado termicamente (H\_OSB) e um modelo genérico de painéis tradicionais (G\_OSB) são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Inventário global de dados por unidade funcional

(continua)

|                                  | Unidade | G_OSB  | H_OSB  |
|----------------------------------|---------|--------|--------|
| <b>PRODUTOS</b>                  |         |        |        |
| Oriented Strand Board (OSB)      | m³      | 1,00   | 1,00   |
| <b>ENTRADAS DO MEIO AMBIENTE</b> |         |        |        |
| Água                             | Kg      | 204,18 | 204,18 |
| <b>ENTRADAS DA TECNOSFERA</b>    |         |        |        |
| <b>Materiais/Combustíveis</b>    |         |        |        |
| Madeira (madeira conífera)       | m³      | 1,91   | -      |
| Madeira ( <i>Eucalyptus</i> )    | m³      | -      | 1,36   |

Tabela 12 - Inventário global de dados por unidade funcional

(continua)

|                                                    | Unidade | G_OSB    | H_OSB    |
|----------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| Resina MDI                                         | Kg      | 18,30    | -        |
| Adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona     | Kg      | -        | 70,86    |
| Parafina                                           | Kg      | 10,94    | -        |
| Termicida piretróide                               | Kg      | 0,96     | -        |
| Químicos, orgânicos                                | Kg      | 5,21     | -        |
| Coletor de pó, precipitador eletrostático          | P       | 4,73E-06 | 4,73E-06 |
| Óleo lubrificante                                  | Kg      | 0,06     | 0,06     |
| Fábrica de painéis de madeira com ligação orgânica | P       | 3,79E-08 | 3,79E-08 |
| Instalação técnica de secagem de madeira           | P       | -        | 3,66E-06 |
| <b>Eletricidade/calor</b>                          |         |          |          |
| Diesel, queimado em máquina de construção          | MJ      | 33,52    | 33,52    |
| Eletricidade, média tensão                         | kWh     | 116,25   | 120,45   |
| Forno, lascas de madeira                           | P       | 2,36E-05 | 2,36E-05 |
| Forno, aparas de madeira, com silo                 | P       | 9,99E-05 | 9,99E-05 |
| Calor, distrital ou industrial, gás natural        | MJ      | 344,66   | 344,66   |
| Calor, distrital ou industrial, exceto gás natural | MJ      | 2,49     | 2,49     |
| <b>SAÍDAS PARA A TECNOSFERA</b>                    |         |          |          |
| <b>Resíduos para tratamento</b>                    |         |          |          |
| Cinzas                                             | Kg      | 1,70     | 1,70     |
| Biorresíduos                                       | Kg      | 0,26     | 0,26     |
| <b>SAÍDAS PARA O MEIO AMBIENTE</b>                 |         |          |          |
| <b>Emissões para o ar</b>                          |         |          |          |
| Acetaldeído                                        | Kg      | 5,59E-04 | -        |
| Amônia                                             | Kg      | 0,01     | 0,01     |
| Arsênico                                           | Kg      | 3,58E-06 | 3,58E-06 |
| Benzeno                                            | Kg      | 3,26E-03 | 3,26E-03 |
| Benzeno, etil-                                     | Kg      | 1,07E-04 | 1,07E-04 |
| Benzeno, hexacloro-                                | Kg      | 2,58E-11 | 2,58E-11 |
| Benzo(a)pireno                                     | Kg      | 1,79E-06 | 1,79E-06 |
| Bromo                                              | Kg      | 2,15E-04 | 2,15E-04 |
| Cádmio                                             | Kg      | 2,50E-06 | 2,50E-06 |
| Cálcio                                             | Kg      | 0,02     | 0,02     |

Tabela 12 - Inventário global de dados por unidade funcional

(conclusão)

|                                                        | Unidade | G_OSB    | H_OSB    |
|--------------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| Dióxido de carbono, biogênico                          | Kg      | 364.85   | 364.85   |
| Monóxido de carbono, biogênico                         | Kg      | 0.72     | 0.72     |
| Cloro                                                  | Kg      | 6,44E-04 | 6,44E-04 |
| Cromo                                                  | Kg      | 1,42E-05 | 1,42E-05 |
| Cromo VI                                               | Kg      | 1,43E-07 | 1,43E-07 |
| Cobre                                                  | Kg      | 7,87E-05 | 7,87E-05 |
| Monóxido de dinitrogênio                               | Kg      | 0,01     | 0,01     |
| Dioxina, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-                  | Kg      | 1,07E-10 | 1,07E-10 |
| Flúor                                                  | Kg      | 1,79E-04 | 1,79E-04 |
| Formaldeído                                            | Kg      | 0,02     | -        |
| Hidrocarbonetos alifáticos, alcanos, não especificados | Kg      | 3,26E-03 | 3,26E-03 |
| Hidrocarbonetos alifáticos insaturados                 | Kg      | 0,01     | 0,01     |
| Chumbo                                                 | Kg      | 8,94E-05 | 8,94E-05 |
| Magnésio                                               | Kg      | 1,29E-03 | 1,29E-03 |
| Manganês                                               | Kg      | 6,08E-04 | 6,08E-04 |
| Mercúrio                                               | Kg      | 1,07E-06 | 1,07E-06 |
| Metano, biogênico                                      | Kg      | 0,01     | 0,01     |
| Metanol                                                | Kg      | 0,02     | -        |
| m-Xileno                                               | Kg      | 4,29E-04 | 4,29E-04 |
| Níquel                                                 | Kg      | 2,15E-05 | 2,15E-05 |
| Óxidos de nitrogênio                                   | Kg      | 0,43     | 0,43     |
| NMVOC, compostos orgânicos voláteis não metano         | Kg      | 0,33     | -        |
| PAH, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos           | Kg      | 3,97E-05 | 3,97E-05 |
| Partículas, < 2.5 um                                   | Kg      | 0,01     | 0,01     |
| Partículas, > 10 um                                    | Kg      | 0,10     | 0,10     |
| Fenol, pentacloro-                                     | Kg      | 2,90E-08 | 2,90E-08 |
| Fósforo                                                | Kg      | 1,07E-03 | 1,07E-03 |
| Potássio                                               | Kg      | 0,08     | 0,08     |
| Sódio                                                  | Kg      | 4,65E-03 | 4,65E-03 |
| Dióxido de enxofre                                     | Kg      | 0,01     | 0,01     |
| Tolueno                                                | Kg      | 1,07E-03 | 1,07E-03 |
| Zinco                                                  | Kg      | 1,07E-03 | 1,07E-03 |

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2024).

## 7.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção descreve a avaliação de impacto do ciclo de vida (LCIA) e as fases de interpretação da avaliação. A Tabela 13 apresenta os impactos ambientais obtidos para cada categoria de impacto para 1 m<sup>3</sup> de H\_OSB e G\_OSB.

Para enriquecer a avaliação dos resultados, dados referentes ao trabalho de Ferro *et al.* (2018), que também utilizou o método ReCiPe para avaliar os aspectos ambientais da produção brasileira de OSB, são apresentados como fonte de dados da literatura para comparação (denominada como B\_OSB).

Tabela 13 - Potenciais Impactos Ambientais para 1 m<sup>3</sup> de OSB.

| <b>Categoria de Impacto</b>            | <b>Unidade</b>        | <b>H_OSB</b> | <b>G_OSB</b> | <b>B_OSB</b> |
|----------------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Mudanças climáticas (CC)               | kg CO <sub>2</sub> eq | 157,46       | 250,36       | 127,00       |
| Destruição da camada de ozônio (OD)    | kg CFC11 eq           | 8,64E-04     | 1,16E-03     | 8,30E-06     |
| Formação de ozônio, saúde humana (POF) | kg NO <sub>x</sub> eq | 1,03         | 1,15         | 1,86         |
| Acidificação terrestre (TA)            | kg SO <sub>2</sub> eq | 1,38         | 1,08         | 1,82*        |
| Eutrofização de água doce (FE)         | kg P eq               | 0,02         | 0,02         | 0,01         |
| Eutrofização marinha (ME)              | kg N eq               | 0,12         | 0,04         | 0,07         |
| Ecotoxicidade terrestre (TET)          | kg 1,4-DCB            | 417,40       | 789,26       | 0,03         |
| Ecotoxicidade de água doce (FET)       | kg 1,4-DCB            | 0,23         | 0,31         | 0,23         |
| Toxicidade humana carcinogênica (HT)   | kg 1,4-DCB            | 0,89         | 8,76         | 10,00        |
| Esgotamento Fóssil (FD)                | kg óleo eq            | 37,17        | 99,83        | 50,00        |

Nota: \*Valor em kg NMVOC eq

Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2024).

A análise dos potenciais impactos ambientais mostrou que o H\_OSB teve um desempenho melhor que o G\_OSB em 7 das 10 categorias de impacto (OD, POF, FE, TET, FET, HT, FD), enquanto o G\_OSB teve um desempenho melhor que o H\_OSB em 3 das 10 (CC, TA, ME).

Comparando os 3 tipos de OSB (H\_OSB, G\_OSB e B\_OSB), verifica-se que o H\_OSB apresentou os piores impactos ambientais potenciais (em termos de valores mais elevados) em

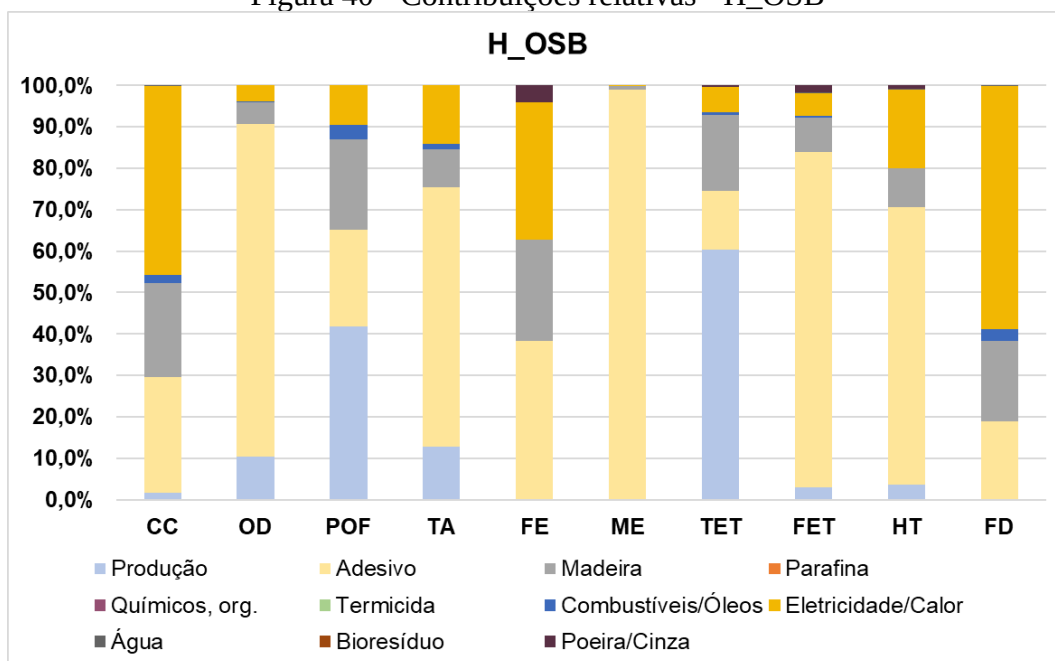
apenas uma categoria (ME). G\_OSB teve um desempenho inferior em 5 categorias (OD, FE, TET, FET, FD) e B\_OSB em 4 de 10 categorias (CC, POF, TA, HT).

As contribuições relativas (em %) dos principais fatores de contribuição envolvidos no ciclo de vida do berço ao portão dos painéis para cada categoria de impacto estão ilustradas na Figura 40 (H\_OSB) e Figura 41 (G\_OSB).

Para entender a discussão detalhada dos impactos em cada categoria é importante observar que os adesivos e as espécies de madeira são diferentes para ambos os tipos de OSB avaliados, ou seja, adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona e madeira de eucalipto para o OSB inovador (H\_OSB) e madeira de conífera genérica e resina MDI para o OSB genérico (G\_OSB).

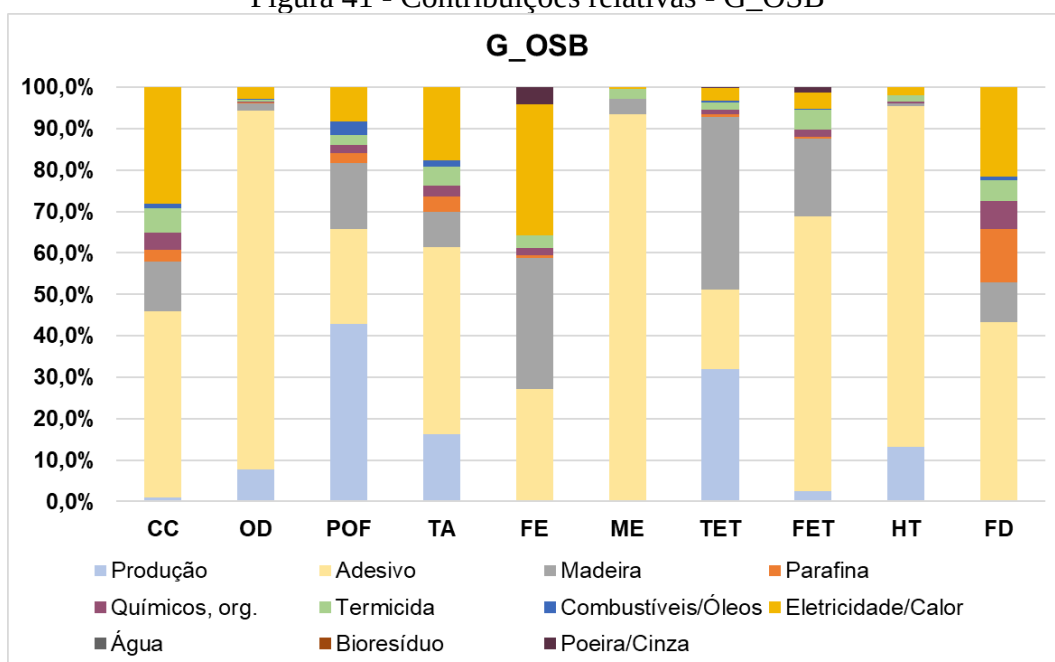
Os fatores de contribuição: termicida, químicos, org. e parafina não influenciaram a análise do H\_OSB em nenhuma categoria, uma vez que esses materiais não foram utilizados na produção do H\_OSB. Os parágrafos seguintes discutem e comparam a contribuição de cada processo unitário em cada categoria ambiental.

Figura 40 - Contribuições relativas - H\_OSB



Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2024).

Figura 41 - Contribuições relativas - G\_OSB



Fonte: Adaptado de Sugahara *et al.* (2024).

**Mudanças climáticas (CC):** Para H\_OSB, a eletricidade/calor (46%) foi o principal fator de contribuição, seguido por adesivo (28%), madeira (23%), combustíveis/óleos (2%) e produção (1%). Para G\_OSB o adesivo (45%) foi o principal contribuidor, seguido por eletricidade/calor (28%), madeira (12%), termicida (6%), produtos químicos, orgânicos (4%), parafina (3%), produção (1%) e combustíveis/óleos (1%).

Nesta categoria, enquanto o H\_OSB teve maior influência na eletricidade, possivelmente relacionado ao aumento da etapa de tratamento térmico que não existe no painel genérico, o G\_OSB teve maior influência relacionada ao adesivo utilizado.

H\_OSB e B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018) também apontaram o adesivo (MDI, uma resina à base de petróleo) como principal fator (38%) na categoria potencial de mudança climática, relacionando esse resultado ao uso de petróleo bruto em sua fabricação. As resinas à base de petróleo são poluidores significativos cujas emissões influenciam além da categoria aquecimento global, também a formação de oxidantes, acidificação, eutrofização e toxicidade (BUCKLIN *et al.*, 2022).

**Destruição da camada de ozônio (OD):** H\_OSB demonstrou contribuição de 80% do adesivo, 11% da produção, 5% da madeira e 4% da eletricidade/calor. G\_OSB teve 86% de adesivo, 8% de produção, 3% de eletricidade/calor, 2% de madeira e 1% de cupins.

Os 3 fatores mais influentes para B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018) foram produtos químicos, sendo 30% para parafina e cupinicida piretróide ligados ao metano (CH<sub>4</sub>) emitido durante a produção do cupinicida, madeira (19%) e adesivo (15%).

**Formação de ozônio, saúde humana (POF):** Para H\_OSB, a produção representa 42% da contribuição total, adesivo 23%, madeira 22%, eletricidade/calor 9% e combustíveis/óleos 4%. No G\_OSB, a produção representa 43%, adesivos 23%, madeira 16%, eletricidade/calor 8%, parafina 3%, e combustíveis/óleos 3%, cupins 2%, e produtos químicos, orgânicos 2%.

Comparando H\_OSB e G\_OSB nota-se que, apesar da diferença no que diz respeito ao tratamento térmico e alguns outros detalhes, os impactos do adesivo, da madeira e da eletricidade/calor apresentam a mesma ordem de influência e valores próximos.

O G\_OSB também possui presença de parafina, cupins e outros produtos químicos que não estão presentes no H\_OSB. Assim, a diferença nos impactos ambientais potenciais totais por 1 m<sup>3</sup> em kg NO<sub>x</sub> eq de H\_OSB (1,03), que é menor que a de G\_OSB (1,15), é possivelmente atribuível à presença desses fatores.

Para B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018), as emissões provenientes da geração de calor são responsáveis por 81% do total, seguidas pelo adesivo (7%), totalizando 1,86 kg NMVOC eq.

**Acidificação terrestre (TA):** H\_OSB apresentou uma contribuição de 63% de adesivo, 14% de eletricidade/calor, 13% de produção, 9% de madeira e 1% de combustíveis/óleos. G\_OSB tinha 45% de adesivo, 17% de eletricidade/calor, 16% de produção, 8% de madeira, 5% de cupins, 4% de parafina, 3% de produtos químicos, orgânicos e 2% de combustíveis/óleos.

No B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018) a geração de calor foi responsável por 71% seguida de adesivo com 12%.

**Eutrofização de água doce (FE):** Para H\_OSB, o adesivo (39%) foi o principal fator de contribuição, seguido por eletricidade/calor (33%), madeira (24%) e poeira/cinzas (4%). No H\_OSB a madeira (32%) foi o principal fator, seguida pela eletricidade/calor (31%), adesivo (27%), poeira/cinza (4%), cupinicida (3%), químicos, orgânicos (2%), e parafina (1%).

B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018) apresentou 35% da contribuição total relacionada à produção de produtos químicos (como parafina e cupinicida piretróide, onde o cupinicida piretróide foi o líder) e o segundo maior contribuinte (25%) foram as operações florestais.

**Eutrofização marinha (ME):** O adesivo foi o principal fator com quase toda a contribuição (99%) com uma pequena representação de 1% de madeira em H\_OSB. Para G\_OSB, o adesivo apresentou 94%, a madeira 4% e o cupinicida 2%.

Porém, para B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018), 75% dos impactos estavam relacionados às emissões produzidas durante o processo de geração de calor e o segundo principal contribuinte foi o adesivo com 9%.

**Ecotoxicidade terrestre (TET):** Nesta categoria, H\_OSB teve contribuição de 60% relacionada com a produção, seguido da madeira (18%), adesivos (14%), eletricidade/calor



(6%), combustíveis/óleos (1%) e poeiras/cinzas (1%). Para G\_OSB, 42% foram associados à madeira, seguido pela produção (32%), adesivo (19%), eletricidade/calor (3%), cupinizada (2%), químicos, orgânicos (1%) e parafina (1%).

No entanto, para B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018), a eletricidade representou mais de 72% dos impactos e o adesivo (10%) foi o segundo maior contribuinte.

**Ecotoxicidade de água doce (FET):** Para H\_OSB, o adesivo (81%) apresentou grande contribuição, acompanhado de madeira (8%), eletricidade/calor (6%), produção (3%) e poeira/cinzas (2%). No G\_OSB o adesivo (66%) também foi o fator principal, seguido pela madeira (19%), cupins (5%), eletricidade/calor (4%), produção (2%), produtos químicos, orgânicos (2%), poeira /cinza (1%) e parafina (1%).

B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018) apresentou 42% relacionados à produção de produtos químicos (principalmente o termicida piretróide) e o adesivo representou 16% dos impactos.

**Toxicidade humana carcinogênica (HT):** adesivo (67%) apresentou maior contribuição em H\_OSB, com menor influência da eletricidade/calor (19%), madeira (9%), produção (4%) e poeiras/cinzas (1%). Para G\_OSB, o adesivo teve a principal contribuição (82%), seguido pela produção (13%), eletricidade/calor (2%), cupinizada (1%), madeira (1%) e produtos químicos, orgânicos (1%).

No B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018), a maior contribuição (34%) esteve ligada à produção de produtos químicos (parafina e principalmente o cupinizada piretróide - devido às emissões atmosféricas de metais) e em segundo lugar ficou o adesivo com 17%.

**Esgotamento Fóssil (FD):** Nesta categoria, o H\_OSB obteve 59% associado à eletricidade/calor, seguido pela madeira (19%), adesivo (19%) e combustíveis/óleos (3%). Para G\_OSB, os resultados demonstraram 43% de adesivo, acompanhado de eletricidade/calor (22%), parafina (13%), madeira (10%), químicos, orgânicos (7%) e cupinizada (5%).

O adesivo (48%) foi o principal contribuinte no B\_OSB (FERRO *et al.*, 2018), e os produtos químicos (parafina e cupinizada piretróide) representaram 27%.

#### 7.4.1 Síntese dos resultados

De forma geral, das dez categorias consideradas, para H\_OSB o adesivo foi o principal contribuinte em 6 categorias (OD, TA, FE, ME, FET e HT), em segundo lugar ficou a produção com 2 categorias (POF e TET), e a eletricidade/calor em terceiro com 2 (CC e FD). Para G\_OSB, o adesivo também foi o principal contribuidor em 7 das 10 categorias (CC, OD, TA, ME, FET, HT e FD), seguido por madeira (FE e TET) e produção (POF).

Os perigosos poluentes químicos nos materiais de construção têm atraído preocupação porque podem impactar negativamente o conforto, a saúde e a produtividade humana. Portanto, conhecer as características de emissão dos materiais de construção e o risco à saúde associado é um requisito para escolher os materiais de forma eficaz, para construir de forma sustentável (XIONG *et al.*, 2016).

A concentração interior de VOC relacionada com os materiais de construção desempenha um papel importante na qualidade do ar, com diversas evidências científicas dos seus efeitos adversos para a saúde. Assim, uma das formas mais eficientes de limitar as emissões perigosas é através da remoção das principais fontes de emissão dentro de casa. Isso envolve identificar a fonte com base no entendimento da composição química e da intensidade da emissão (LIANG *et al.*, 2014).

É notável que o adesivo foi o principal *hotspot* ambiental nesta avaliação, mesmo com os 2 tipos de OSB apresentando diferentes tipos de adesivos (H\_OSB produzido com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona e G\_OSB com resina MDI).

Verifica-se também que o H\_OSB apresentou melhor comportamento (menor quantidade total de potenciais impactos ambientais) nas categorias relacionadas à saúde humana (POF, HT) além de não utilizar parafina, cupinicida e outros produtos químicos orgânicos em sua produção.

Segundo Ferro *et al.* (2018) uma vez que alterações no tipo de resina podem diminuir as propriedades técnicas dos painéis, é obrigatório, em primeiro lugar, avaliar os efeitos das bio-resinas nas propriedades físico-mecânicas das placas fabricadas.

Porém, o desempenho técnico do H\_OSB já foi avaliado com sucesso no trabalho de Sugahara *et al.* (2022b) e o potencial de utilização do adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona em painéis de madeira já foi estabelecido em diversos outros estudos (BARBIRATO *et al.*, 2019b, 2020; SUGAHARA *et al.*, 2022a; SUGAHARA *et al.*, 2019).

O tratamento térmico foi feito em H\_OSB para evitar o uso do cupinicida. Desta forma, o processo adicional em estufa para fazer o tratamento levou a um aumento no consumo elétrico. No entanto, a eletricidade/calor foi o principal contribuinte em apenas 2 categorias (CC e FD) em H\_OSB. Adicionalmente, a diferença no consumo de eletricidade (em kWh) de G\_OSB foi 3,6% superior aos dados do inventário global de H\_OSB (Tabela 12). O termiticida utilizado no G\_OSB apresentou alguma contribuição em todas as categorias avaliadas.

Estes são resultados importantes que podem apoiar os tomadores de decisão a fazerem boas escolhas na seleção dos materiais. Desta forma, este trabalho mostra o potencial do H\_OSB em ser menos prejudicial à humanidade e ao meio ambiente.

## 7.5 CONSIDERAÇÕES

Este capítulo utilizou a metodologia LCA numa perspectiva *cradle-to-gate* para quantificar os potenciais impactos ambientais relacionados à produção experimental de painéis OSB tratados termicamente feitos com madeira de eucalipto e poliuretano à base de óleo de mamona (H\_OSB) e comparou-os com os impactos ambientais de painéis tradicionais (G\_OSB) e dados de literatura (B\_OSB).

A pesquisa identificou os limites do sistema, os impactos ambientais e os pontos críticos ambientais na produção de OSB usando o método ReCiPe H em termos de dez categorias de impacto: Mudanças climáticas (CC), Destruição da camada de ozônio (OD), Formação de ozônio, saúde humana (POF), Acidificação terrestre (TA), Eutrofização de água doce (FE), Eutrofização marinha (ME), Ecotoxicidade terrestre (TET), Ecotoxicidade de água doce (FET), Toxicidade humana carcinogênica (HT), Esgotamento Fóssil (FD). Concluiu-se que:

H\_OSB teve um desempenho melhor que o G\_OSB em 7 de 10 categorias de impacto (OD, POF, TA, FE, ME, TET, FET, HT, FD), enquanto o G\_OSB teve um desempenho melhor que o H\_OSB em 3 de 10 (CC, TA, ME). Comparando os 3 tipos de OSB (H\_OSB, G\_OSB e B\_OSB), o H\_OSB tem o maior impacto ambiental potencial (em termos de valores mais elevados) em apenas uma categoria (ME).

Identificou-se que o adesivo é o principal *hotspot* ambiental desta avaliação para ambos os tipos de painéis analisados (H\_OSB e G\_OSB) mesmo com os painéis sendo confeccionados com diferentes tipos de adesivos (H\_OSB produzido com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona e G\_OSB com resina MDI). Porém, o H\_OSB apresentou melhor comportamento nas categorias relacionadas à saúde humana (POF, HT) além de não utilizar parafina, cupinicida e outros produtos químicos orgânicos presentes no G\_OSB.

Relativamente à utilização de tratamento térmico (H\_OSB) em vez do termicida (G\_OSB), a eletricidade/calor foi o principal contribuinte em apenas 2 categorias de H\_OSB (CC e FD). Apesar disso, apresentou um pequeno aumento no consumo de energia (3,6%), enquanto o cupinicida utilizado no G\_OSB apresentou contribuição em todas as categorias avaliadas.

Conclui-se que este trabalho estabelece o potencial do H\_OSB em ser menos prejudicial à humanidade e ao meio ambiente se em comparação aos genéricos avaliados nesta pesquisa (G\_OSB e B\_OSB).

## 8 CONCLUSÕES GERAIS DA TESE

Esta tese objetivou produzir e avaliar o desempenho de painéis OSB fabricados com madeira de eucalipto e resina poliuretana à base de mamona com duas diferentes proporções de partículas nas camadas, submetidos a tratamento térmico, visando verificar o potencial deste compósito para ser utilizado como componente construtivo com finalidades estruturais.

A partir da cinética de degradação térmica dos materiais utilizados na fabricação dos painéis foi possível conhecer o comportamento dos materiais quando expostos à altas temperaturas, permitindo verificar as temperaturas e tempos ideais de trabalho (para prensagem à quente e tratamento térmico), assim como conhecer o comportamento de cura do adesivo, de modo a não comprometer a integridade e qualidade do material, garantindo a segurança do compósito produzido aliado à otimização do processo produtivo.

Com relação à avaliação o desempenho físico e mecânico dos painéis, constatou-se que todas as propriedades estudadas foram plenamente atendidas, demonstrando a eficácia técnica obtida com a associação da madeira de eucalipto e resina poliuretana de óleo de mamona.

O tratamento térmico melhorou as propriedades físicas e estabilidade dimensional dos painéis, reduzindo a interação com a água.

Todas as temperaturas de tratamento térmico (175° e 200°C) e variação da composição de materiais nas 3 camadas (25:50:25 e 30:40:30); analisadas indicaram resultados para as propriedades físicas e mecânicas compatíveis com os intervalos definidos pelo instrumento normativo EN 300:2006 para o painel OSB do tipo 4, o qual apresenta maior exigência de requisitos, e também pela NBR 16936:2023 (ABNT, 2023), a norma brasileira que indica os requisitos para painéis OSB estruturais aplicáveis em edificações do tipo *light wood frame*.

O tratamento térmico não melhorou a resistência ao ataque de cupins. Entretanto, todos os painéis experimentais apresentaram bom desempenho compatível com os painéis comerciais disponíveis no mercado brasileiro. A combinação de madeira de eucalipto e adesivo de mamona demonstrou resistência natural ao ataque de cupins compatível com os painéis comerciais, mesmo sem utilização de aditivos químicos para aumentar a durabilidade. Os painéis comerciais apresentaram maior dano visual se comparados painéis experimentais sem nenhum tratamento.

A Avaliação do Ciclo de Vida dos painéis demonstrou que, comparando-se os painéis experimentais (tratados termicamente, H\_OSB) e tradicionais (G\_OSB), H\_OSB obteve melhor desempenho ambiental na maioria das categorias de impacto e apresentou

comportamento mais seguro em categorias relacionadas à saúde humana. O adesivo foi o principal *hotspot* ambiental para ambos os tipos de painéis.

Desta forma, o compósito estudado demonstrou eficácia e viabilidade técnica em todas as avaliações efetuadas, indicando que o uso de matérias-primas alternativas como a madeira de eucalipto e a resina poliuretana à base de óleo de mamona, mesmo sem a utilização de tratamento térmico, se apresenta como possibilidade muito favorável para este segmento que vem crescendo nos últimos anos, especialmente com a industrialização da construção civil para sistemas construtivos do tipo *light frame*.

## **9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para continuidade da avaliação do desempenho dos painéis, sugere-se que sejam efetuados estudos que permitam conhecer a durabilidade dos mesmos, principalmente no que diz respeito à:

- a) Avaliação da resistência ao ataque de fungos;
- b) Avaliação da resistência ao envelhecimento natural e/ou acelerado; e
- c) Comparação dos resultados obtidos com resultados de painéis comerciais.

## REFERÊNCIAS

- ALLDRITT, K.; SINHA, A.; MILLER, T. H. Designing a strand orientation pattern for improved shear properties of oriented strand board. **Journal of materials in civil engineering**, New York, v. 26, n. 7, p. 1-9, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001033. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001033>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1-1999**: particleboard. Gaithersburg: ANSI, 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS. **ASTM D 3345-74**: standard test method for laboratory evaluation of wood and other cellulosic materials for resistance to termites. West Conshohocken: ASTM, 1999.
- AMERICAN WOOD PROTECTION ASSOCIATION. **AWPA E 1-16**: laboratory methods for evaluating the termite resistance of wood-based materials: choice and no-choice tests. Clermont: AWP book of standards, 2016.
- ARAÚJO, C. K. C.; FERREIRA, M. B.; SALVADOR, R.; ARAÚJO, C. K. C. C.; CAMARGO, B. S.; CAMARGO, S. K. C. A.; CAMPOS, C. I.; PIEKARSKI, C. M. Life cycle assessment as a guide for designing circular business models in the wood panel industry: a critical review. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 355, p. 1-14, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131729. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622013427?via%3Dihub>. Acesso em: 26 ago. 2023.
- ARO, M. D.; BRASHAW, B. K.; DONAHUE, P. K. Mechanical and physical properties of thermally modified plywood and oriented strand board panels. **Forest products society**, LaGrange, v. 64, n.7, p.1-9, 2014. DOI:10.13073/FPJ-D-14-00037. Disponível em: <https://meridian.allenpress.com/fpj/article/64/7-8/281/136415/Mechanical-and-Physical-Properties-of-Thermally>. Acesso em: 26 jun. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Nova norma deve impulsionar o uso do light wood frame no brasil**. Curitiba: ABIMCI [2021]. Disponível em <https://abimci.com.br/nova-norma-deve-impulsionar-o-uso-do-light-wood-frame-no-brasil/>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16936**: edificações em light wood frame. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Normas técnicas impactam na qualidade e nas demandas de mercado do setor de madeira**. ABNT [2018]. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/noticias/6055-normas-tecnicas-impactam-na-qualidade-e-nas-demandas-de-mercado-do-setor-de-madeira>. Acesso em: 9 maio 2020.
- AYRILMIS, N.; WINANDY, J. E. Effects of post heat-treatment on surface characteristics and adhesive bonding performance of medium density fiberboard effects of post heat-treatment on surface characteristics. **Materials and manufacturing processes**, London, v.

24, n.5, p.594-599, 6914, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426910902748032>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426910902748032>. Acesso em: 12 ago. 2020.

BARBIRATO, G. H. A.; FIORELLI, J.; MEJIAA, J.; SARASINI, F.; TIRILLÒ, J.; FERRANTE, L. Quasi-static and dynamic response of oriented strand boards based on balsa wood waste. **Composite structures**, Oxford, v. 219, n. July, p. 83–89, 2019a. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.03.062. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822318343757?via%3Dihub>. Acesso em: 21 jul. 2021.

BARBIRATO, G. H. A.; LOPES JUNIOR, W. E.; HELLMEISTER, V.; PAVESI, M.; FIORELLI, J. OSB panels with balsa wood waste and castor oil polyurethane resin. **Waste and biomass valorization**, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 743–751, 2020. DOI: 10.1007/s12649-018-0474-8. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-018-0474-8>. Acesso em: 24 set. 2021.

BARBIRATO, G. H. A.; LOPES JUNIOR, W. E.; OLIVEIRA, D. C. G.; NAGATA, E. Y.; CANEPPELE, F. L.; FIORELLI, J. Thermal performance of aviary prototypes fitted with OSB panel ceiling made of balsa wood wastes. **Brazilian journal of biosystems engineering**, Tupã, v. 13, n. 3, p. 237–249, 2019b. DOI: 10.18011/bioeng2019v13n3p237-249. Disponível em: <https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/799>. Acesso em: 24 set. 2021.

BELINI, U. L.; LEITE, M. K.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAIX, G.; BAUDASSE, C.; LEMENAGER, N.; THEVENON, M. F. Bioassays on panels made with eucalyptus and sugarcane bagasse. **Revista árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 361–368, 2014. DOI: 10.1590/S0100-67622014000200017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/Mw8yswk8Q94T5xnKkFtwcdM/?lang=pt>. Acesso em: 17 jun. 2021.

BENETTO, E.; BECKER, M.; WELFRING, J. Life cycle assessment of oriented strand boards (OSB): from process innovation to ecodesign. **Environmental science and technology**, Easton, v. 43, n. 15, p. 6003–6009, 2009. DOI: 10.1021/es900707u. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es900707u>. Acesso em: 13 mar. 2022.

BIANCO, I.; THIÉBAT, F.; CARBONARO, C.; PAGLIOLICO, S.; BLENGINI, G. A.; COMINO, E. Life cycle assessment (LCA)-based tools for the eco-design of wooden furniture. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 324, p. 1–11, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129249. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621034351?via%3Dihub>. Acesso em: 26 ago. 2023.

BONIGUT, J.; KRUG, D.; STUCKENBERG, P. Dimensional stability and irreversible thickness swell of thermally treated oriented strandboards (OSB). **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 72, p. 593–599, 2014. DOI: 10.1007/s00107-014-0820-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-014-0820-x>. Acesso em: 22 jun. 2020.



BOTELHO, E. C.; ALMEIDA, R. S.; PARDINI, L. C.; REZENDE, M. C. Influence of hygrothermal conditioning on the elastic properties of carall laminates. **Applied composite materials**, [S.l.], v. 14, n. 3, p. 209–222, 2007. DOI: 10.1007/s10443-007-9041-3. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/225529464\\_Influence\\_of\\_Hygrothermal\\_Conditioning\\_on\\_the\\_Elastic\\_Properties\\_of\\_Carall\\_Laminates](https://www.researchgate.net/publication/225529464_Influence_of_Hygrothermal_Conditioning_on_the_Elastic_Properties_of_Carall_Laminates). Acesso em: 11 nov. 2022.

BOTELHO, E. C.; SCHERBAKOFF, N.; REZENDE, M. C. Porosity control in glassy carbon by rheological study of the furfuryl resin. **Carbon**, Elmsford, NY, v. 39, n. 4, p. 45–52, 2001. DOI: 10.1016/S0008-6223(00)00080-4. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622300000804>. Acesso em: 11 nov. 2022.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 300**: Oriented strand boards (OSB): definitions, classification and specifications. Brussels: CEN - European committee for standardization, 2006.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 310**: Wood-based panels: determination of modulus of elasticity in bending and bending strength. Brussels: CEN - European committee for standardization, 1993a.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 317**: particleboards and fiberboards: determination of swelling in thickness after immersion in water. Brussels: CEN - European committee for standardization, 1993b.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 319**: particleboards and fiberboards: determination of tensile strength perpendicular to the plane of board. Brussels: CEN - European committee for standardization, 1993c.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 320**: particleboards and fibreboards: determination of resistance to axial withdrawal of screws. Brussels: CEN - European committee for standardization, 2011.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 322**: wood-based panels: determination of moisture content. Brussels: CEN - European committee for standardization, 1993d.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 323**: wood-based panels: determination of density: specifies a method for determining the density of test pieces of wood-based panels. Brussels: CEN - European committee for standardization, 1993e.

BRITO, J. O.; SILVA, F. G.; LEÃO, M. M.; ALMEIDA, G. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. **Bioresource technology**, Essex, v. 99, n. 18, p. 8545–8548, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.03.069. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408003064>. Acesso em: 17 jun. 2021.

BROCCO, V. F.; PAES, J. B.; COSTA, L. G. Da; KIRKER, G. T.; BRAZOLIN, S. Wood color changes and termiticidal properties of teak heartwood extract used as a wood preservative. **Holzforschung**, Berlin, v. 74, n. 3, p. 1–13, 2019. DOI: 10.1515/hf-2019-0138 Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/337112510\\_Wood\\_color\\_changes\\_and\\_termiticidal\\_properties\\_of\\_teak\\_heartwood\\_extract\\_used\\_as\\_a\\_wood\\_preservative](https://www.researchgate.net/publication/337112510_Wood_color_changes_and_termiticidal_properties_of_teak_heartwood_extract_used_as_a_wood_preservative). Acesso em: 16 ago. 2023.

BUCKLIN, O.; MENGES, A.; AMTSBERG, F.; DREXLER, H.; ROHR, A.; KRIEG, O. D. Mono-material wood wall: novel building envelope using subtractive manufacturing of timber profiles to improve thermal performance and airtightness of solid wood construction. **Energy and buildings**, Lausanne, v. 254, p. 1–15, 2022. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111597.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821008811?via%3Dihub>. Acesso em: 29 set. 2023.

BUZO, A. L. S. C.; SUGAHARA, E. S.; SILVA, S. A. M. da; MORALES, E. A. M.; AZAMBUJA, M. dos A. Painéis de pinus e bagaço de cana empregando-se dois adesivos para uso na construção civil. **Ambiente construído**, São Paulo, v. 19, n. 4, p. 183–193, 2019. DOI: 10.1590/s1678-86212019000400350. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ac/a/5dnD8vDCY4trw3bTvNPY9FQ/?lang=pt>. Acesso em: 15 out. 2020.

CABRAL, M. R.; FIORELLI, J.; SAVASTANO JUNIOR, H.; LAGACÉ, R.; GODBOUT, S.; PALACIOS, J. H. Study of the potential use of the sugarcane bagasse in cement-panels. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE SCIENCE AND TECHNOLOGY ICCST*, 10., 2015, Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2015. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/284189510\\_STUDY\\_OF\\_THE\\_POTENTIAL\\_USE\\_OF\\_THE\\_SUGARCANE\\_BAGASSE\\_IN\\_CEMENT-PANELS](https://www.researchgate.net/publication/284189510_STUDY_OF_THE_POTENTIAL_USE_OF_THE_SUGARCANE_BAGASSE_IN_CEMENT-PANELS). Acesso em: 14 jun. 2021.

CAHYONO, T. D.; YANTI, H.; MASSIJAYA, M. Y.; ISWANTO, A. H.; ULUPUTTY, M. R. The durability of OSB composite plywood with avocado, mahogany, and pine wood veneers against drywood and subterranean termites. *In: IOP CONFERENCE SERIES: earth and environmental science*, 2., 2019, Medan. **Anais [...]**. Medan: [S.l.], 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/260/1/012067>. Acesso em: 17 ago. 2023.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **CAIXA financia o primeiro prédio construído em madeira no Brasil**. [S.l.]: CAIXA, 2016. Disponível em:

<https://caixanoticias.caixa.gov.br/noticia/18316/caixa-financia-o-primeiro-predio-construido-em-madeira-no-brasil>. Acesso em: 10 maio 2020.

CAPPELLAZZI, J.; KONKLER, M. J.; SINHA, A.; MORRELL, J. J. Potential for decay in mass timber elements: a review of the risks and identifying possible solutions. **Wood material science and engineering**, London, v. 15, n. 6, p. 351–360, 2020. DOI: 10.1080/17480272.2020.1720804. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1720804>. Acesso em: 26 out. 2021.

CARVALHO, A. G.; ZANUNCIO, A. J. V.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; DA SILVA, C. M. S.; TONOLI, G. H. D. Hydrothermal treatment of strand particles of pine for the improvement of OSB panels. **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 76, n. 1, p. 155–162, 2018. DOI: 10.1007/s00107-017-1234-3. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-017-1234-3>. Acesso em: 11 out. 2021.

CASCIONE, V.; ROBERTS, M.; ALLEN, S.; DAMS, B.; MASKELL, D.; SHEA, A.; WALKER, P.; EMMITT, S. Integration of life cycle assessments (LCA) in circular bio-based wall panel design. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 344, p. 1–15, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130938. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622005753?via%3Dihub>. Acesso em: 13 mar. 2022.

CETERA, P.; NEGRO, F.; CREMONINI, C.; TODARO, L.; ZANUTTINI, R. Physico-mechanical properties of thermally treated poplar OSB. **Forests**, Basel, v. 9, n. 6, p. 1–9, 2018. DOI:10.3390/f9060345. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/9/6/345>. Acesso em: 22 jun. 2020.

CHENG, Q.; TANG, J. D.; ZHOU, C.; JIANG, W.; HU, L.; NICHOLAS, D. D.; VIA, B. Performance of oriented strand board made with soy substituted resin in termite choice tests with southern yellow pine. **Forest products journal**, Madison, v. 71, n. 3, p. 199–208, 2021. DOI: 10.13073/FPJ-D-21-00011. Disponível em: <https://meridian.allenpress.com/fpj/article/71/3/199/468157/Performance-of-Oriented-Strand-Board-Made-with-Soy>. Acesso em: 17 set. 2023.

CHRISTIANSEN, A. W. How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives: a critical review of the literature: part I: physical responses. **Wood and fiber science**, Madison, v. 22, n. 4, p. 441–459, 1990. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2105>. Acesso em: 12 ago. 2020.

CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DO PARANÁ. **ABNT publica norma técnica para construção de casas em wood frame**. Paraná: CREA-PR, 2023. Disponível em: <https://www.crea-pr.org.br/ws/abnt-publica-norma-tencica-para-construcao-de-casas-em-wood-frame/>. Acesso em: 12 out. 2023.

COPAK, A.; JIROUŠ-RAJKOVIĆ, V.; ŠPANIĆ, N.; MIKLEČIĆ, J. The impact of post-manufacture treatments on the surface characteristics important for finishing of OSB and particleboard. **Forests**, Basel, v. 12, n. 8, p. 1–13, 2021. DOI: 10.3390/f12080975. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f12080975>. Acesso em: 09 maio 2022.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, R. Q.; THOMPSON, R. M.; TEIXEIRA, D. E.; OKINO, E. Y. A.; COSTA, A. F. Properties after weathering and decay resistance of a thermally modified wood structural board. **International biodeterioration and biodegradation**, Barking, v. 62, n. 4, p. 448–454, 2008a. DOI: 10.1016/j.ibiod.2007.11.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830508000875>. Acesso em: 25 jun. 2020.

DEL MENEZZI, C. H. S.; RIBEIRO, R. B.; STERNADT, G. H.; TEIXEIRA, D. E.; OKINO, E. Y. A. Effect of thermal post-treatment on some surface-related properties of oriented Strandboards. **Drvena industrija**, Zagreb, v. 59, n. 2, p. 61–67, 2008b. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/26522121\\_Effect\\_of\\_thermal\\_post-treatment\\_on\\_some\\_surface-related\\_properties\\_of\\_oriented\\_Strandboards](https://www.researchgate.net/publication/26522121_Effect_of_thermal_post-treatment_on_some_surface-related_properties_of_oriented_Strandboards). Acesso em: 22 jun. 2020.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I. Contact thermal post-treatment of oriented strandboard to improve dimensional stability: a preliminary study. **Holz als roh - und**

**werkstoff**, Berlin, v. 64, p. 212–217, 2006. DOI: 10.1007/s00107-005-0052-1 Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-005-0052-1>. Acesso em: 25 jun. 2020.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I.; SOUZA, M. R. Avaliação não-destrutiva de painéis OSB modificados termicamente: parte 1: efeito do tratamento térmico sobre a velocidade de propagação de ondas de tensão. **Scientia forestalis/Forest sciences**, Piracicaba, v. 76, p. 67–75, 2007. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/10464>. Acesso em: 25 jun. 2020.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I.; OKINO, E. Y. A.; TEIXEIRA, D. E.; SANTANA, M. A. E. Thermal modification of consolidated oriented strandboards: effects on dimensional stability, mechanical properties, chemical composition and surface color. **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 67, p. 383–396, 2009. DOI: 10.1007/s00107-009-0332-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-009-0332-2>. Acesso em: 22 jun. 2020.

DENG, N.; WANG, J.; SUN, J.; CAO, N. Life cycle assessment and optimization scenario of solid wood composite doors: a case study in the east of China. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 868, p. 1–13, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161494. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723001092?via%3Dihub>. Acesso em: 12 jul. 2023.

DIAS, A. M. A. **Life cycle assessment of timber structures: a cradle-to-grave perspective**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2022. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/100337>. Acesso em: 16 out. 2022.

DIAS, A. C.; ARROJA, L. Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 37, p. 368–376, 2012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.056. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612004027?via%3Dihub>. Acesso em: 21 nov. 2022.

DIAS, A. M. A.; DIAS, A. M. P. G.; SILVESTRE, J. D.; BRITO, J. Comparison of the environmental and structural performance of solid and glued laminated timber products based on EPDs. **Structures**, London, v. 26, p. 128–138, 2020. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.04.015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012420301703?via%3Dihub>. Acesso em: 21 nov. 2022.

DIAS, A. M. A.; DIAS, A. M. P. G.; SILVESTRE, J. D.; BRITO, J. Comparison of environmental impacts of structurally equivalent wood-based floors. **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 79, n. 6, p. 1607–1622, 2021. DOI: 10.1007/s00107-021-01742-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-021-01742-x>. Acesso em: 13 mar. 2022.

DIAS, A. M.; MACHADO, J. S.; DIAS, A. M. P. G.; SILVESTRE, J. D.; BRITO, J. Influence of the wood species, forest management practice and allocation method on the environmental impacts of roundwood and biomass. **Forests**, Basel, v. 13, n. 9, p. 1–13, 2022.

DOI: 10.3390/f13091357. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/9/1357>. Acesso em: 10 nov. 2022.

DIAS, A. M. A.; SANTOS, P. G. G.; DIAS, A. M. P. G.; SILVESTRE, J. D.; BRITO, J. Life cycle assessment of a preservative treated wooden deck. **Wood material science and engineering**, v.17, n.6, [S.l.], 2021. DOI: 10.1080/17480272.2021.1897673. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17480272.2021.1897673>. Acesso em: 13 mar. 2022.

DIAS, G. L.; SANTOS, A. C.; LIMA, A. L.; SZÜCS, C. A. Determinação de propriedades mecânicas do OSB. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2004, Cuiabá. **Anais [...]**. Cuiabá: [S.l.], 2004.

DIRESKE, M.; BONIGUT, J.; WENDERDEL, C.; SCHEIDING, W.; KRUG, D. Effects of MDI content on properties of thermally treated oriented strand board (OSB). **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 76, n. 3, p. 823-831, 2018. DOI: 10.1007/s00107-017-1256-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-017-1256-x>. Acesso em: 22 jun. 2020.

DOSSCHE, C.; BOEL, V.; CORTE, W. Comparative material-based life cycle analysis of structural beam-floor systems. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 194, p. 327–341, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.062. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618313921>. Acesso em: 21 nov. 2022.

ECOINVENT 3.6. **Oriented strand board production RER - Process**: Dataset documentation. Zurich: [Generated by Frank Werner], 2019. 10 p.

ESTEVES, B.; PEREIRA, H. Wood modification by heat treatment: a review. **Bioresources**, Raleigh, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009. Disponível em: [https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes\\_04/BioRes\\_04\\_1\\_0370\\_Esteves\\_P\\_Wood\\_Mod\\_Heat\\_Treatment\\_Rev\\_367.pdf](https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_04/BioRes_04_1_0370_Esteves_P_Wood_Mod_Heat_Treatment_Rev_367.pdf). Acesso em: 12 ago. 2020.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15804:2012+A2**: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels: CEN, 2019.

FAN, M.; ENJILY, V. Structural properties of oriented wood strand composite: effect of strand orientation and modeling prediction. **Journal of engineering mechanics**, New York, v. 135, n. 11, p. 1323–1330, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:11(1323). Disponível em: <https://ascelibrary.com/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9399%282009%29135%3A11%281323%29>. Acesso em: 26 mar. 2022.

FARJANA, S. H.; TOKEDE, O.; TAO, Z.; ASHRAF, M. Life cycle assessment of end-of-life engineered wood. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 887, p. 1–11, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723026396?via%3Dihub>. Acesso em: 12 jul. 2023.

FEBRIANTO, F.; SAHRONI; HIDAYAT, W.; BAKAR, E. S.; KWON, G. J.; KWON, J. H.; HONG, S. Il; KIM, N. H. Properties of oriented strand board made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper* (Schultes.f) Backer ex Heyne). **Wood science and technology**, New York, v. 46, p. 53–62, 2012. DOI: 10.1007/s00226-010-0385-8. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-010-0385-8>. Acesso em: 17 out. 2023.

FERRO, F. S. **Painéis OSB com madeira *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona**: viabilidade técnica de produção. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002344278>. Acesso em: 17 jun. 2021.

FERRO, F.; DOS SANTOS, L.; ALMEIDA, T.; ICIMOTO, F.; LAHR, F. R. Performance of OSB with different preservative treatments to dry wood termites attack. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING - WCTE, 17., 2016, Vienna. **Anais [...]**. Vienna: Vienna University of Technology, 2016. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002782090>. Acesso em: 05 nov. 2023.

FERRO, F. S.; SILVA, D. A. L.; LAHR, F. A. R.; ARGENTON, M.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Environmental aspects of oriented strand boards production: a Brazilian case study. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 183, p. 710–719, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618304931?via%3Dihub>. Acesso em: 01 jul. 2020.

FIORELLI, J.; BUENO, S. B.; CABRAL, M. R. Assessment of multilayer particleboards produced with green coconut and sugarcane bagasse fibers. **Construction and building materials**, Guildford, v. 205, p. 1–9, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819303083?via%3Dihub>. Acesso em: 21 jul. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO**: yearbook of forest products 2019. Rome, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/forestry/statistics/80570/en/>. Acesso em: 30 dez. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO**: yearbook of forest products 2020. Rome, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc3475m>. Acesso em: 28 set. 2023.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook**: wood as an engineering material. Centennial. ed. Madison: FPL, United States Department of Agriculture, 2010. 509 p.

GAEFKE, C. B.; BOTELHO, E. C.; FERREIRA, N. G.; REZENDE, M. C. Effect of furfuryl alcohol addition on the cure of furfuryl alcohol resin used in the glassy carbon manufacture. **Journal of applied polymer science**, New York, v. 106, p. 2274–2281, 2007. DOI: 10.1002/app.26938. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.26938>. Acesso em: 11 nov. 2022.

GARCIA, R.; FREIRE, F. Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG protocol, PAS 2050 and climate declaration. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 66, p. 199–209, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.11.073. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613008494?via%3Dihub>. Acesso em: 22 out. 2022.

GARZÓN-BARRERO, N. M. **Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74133/tde-16032016-161005/publico/DO7749404COR.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2021.

GARZÓN-BARRERO, N. M.; SHIRAKAWA, M. A.; BRAZOLIN, S.; PEREIRA, R. G. de F. N. B.; LARA, I. A. R.; SAVASTANO, H. Evaluation of mold growth on sugarcane bagasse particleboards in natural exposure and in accelerated test. **International biodeterioration and biodegradation**, Barking, v. 115, p. 266–276, 2016. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.09.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830516303535?via%3Dihub>. Acesso em: 16 dez. 2021.

GELDERMANN, J.; KOLBE, L. M.; KRAUSE, A.; MAI, C.; MILITZ, H.; OSBURG, V. S.; SCHÖBEL, A.; SCHUMANN, M.; TOPOROWSKI, W.; WESTPHAL, S. Improved resource efficiency and cascading utilisation of renewable materials. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 110, p. 1–8, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.092. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615013207?via%3Dihub>. Acesso em: 15 out. 2020.

GÉRARDIN, P. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood: a review. **Annals of forest science**, Les Ulis, v. 73, p. 559–570, 2016. DOI: 10.1007/s13595-015-0531-4. Disponível em: <https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-015-0531-4>. Acesso em: 12 ago. 2020.

GONÇALVES, F. G.; ALVES, S. D.; SEGUNDINHO, P. G. A.; OLIVEIRA, R. G. E.; PAES, J. B.; SUUCHI, M. A.; CHAVES, I. L. S.; QUEVEDO, R. C.; BATISTA, D. C.; LOPEZ, Y. M.; LOPES, D. J. V.; BRITO, A. S. Feasibility of incorporating thermally treated lignocellulosic waste in particleboard composites. **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 80, p. 647–656, 2022. DOI: 10.1007/s00107-022-01804-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01804-8>. Acesso em: 07 fev. 2023.

GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P. G. A.; FASSARELLA, M. V.; MININI, D.; TINTI, V. P.; LOPEZ, Y. M.; FELBERG, M. J. K. F. S. Relationship between elastic and biological properties in eucalypt wood waste particleboards. **Revista materia**, [S.l.], v. 26, n. 3, 2021a. DOI: 10.1590/S1517-707620210003.13048. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/YgCvXFZZbCHNPxF3VNHZCGR/?lang=pt>. Acesso em: 17 out. 2023.

GONÇALVES, F. G.; PAES, J. B.; LOPEZ, Y. M.; SEGUNDINHO, P. G. A.; OLIVEIRA, R. G. E.; FASSARELLA, M. V.; BRITO, A. S.; CHAVES, I. L. S.; MARTINS, R. S. F.





HILL, C. **Wood modification**: Chemical, thermal and other processes. West Sussex: Wiley Seried, John Wiley & Sons Ltd., 2006. 249 p.

HILL, C. DIBDIAKOVA, J. The environmental impact of wood compared to other building materials. **International wood products journal**, London, v. 7, n. 4, p. 215–219, 2016. DOI: 10.1080/20426445.2016.1190166. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1190166>. Acesso em: 26 mar. 2022.

ICEL, B.; BERAM, A. Effects of industrial heat treatment on some physical and mechanical properties of iroko wood. **Drvna industrija**, Zagreb, v. 68, n. 5, p. 229–239, 2017. DOI:10.5552/drind.2017.1720. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/320204393\\_Effects\\_of\\_Industrial\\_Heat\\_Treatment\\_on\\_Some\\_Physical\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Iroko\\_Wood](https://www.researchgate.net/publication/320204393_Effects_of_Industrial_Heat_Treatment_on_Some_Physical_and_Mechanical_Properties_of_Iroko_Wood). Acesso em: 12 ago. 2020.

IMKEN, A. A. P.; BRISCHKE, C.; KÖGEL, S.; KRAUSE, K. C.; MAI, C. Resistance of different wood-based materials against mould fungi: a comparison of methods. **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 78, p. 661–671, 2020. DOI: 10.1007/s00107-020-01554-5. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-020-01554-5>. Acesso em: 12 fev. 2022.

IMPERVEG. **Imperveg® Agt 1315**: ficha técnica. [S.l.]: Imperveg, [2021]. Disponível em: <http://imperveg.com.br/wp-content/uploads/2015/05/FICHA-TÉCNICA-IMPERVEG-AGT-1315.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual IBÁ 2020**. São Paulo: IBÁ, 2020. Disponível em: <http://abpa-br.org/relatorios/>. Acesso em: 17 jun. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **IPT/DIMAD D–2**: ensaio acelerado de laboratório da resistência natural ou madeira preservada ao ataque de térmitas do gênero *Cryptotermes* (Fam. *Kalotermitidae*). [São Paulo]: IPT 1157, 1980.

INSTITUTO FALCÃO BAUER DA QUALIDADE. **Sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada**: tecverde (tipo light wood framing): DATec N° 020-C. São Paulo: IFBQ, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**: environmental management: life cycle assessment: principles and framework. Genebra: ISO, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044 (E)**: environmental management: life cycle assessment: requirements and guidelines. Genebra: ISO, 2006b.

ISLAM, H.; JOLLANDS, M.; SETUNGE, S. Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, [S.l.], v. 42, p. 129–140, 2015a. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008235?via%3Dihub>. Acesso em: 13 mar. 2022.

ISLAM, H.; JOLLANDS, M.; SETUNGE, S.; HAQUE, N.; BHUIYAN, M. A. Life cycle assessment and life cycle cost implications for roofing and floor designs in residential buildings. **Energy and buildings**, Lausanne, v. 104, p. 250–263, 2015b. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815301341?via%3Dihub>. Acesso em: 13 mar. 2022.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 254 p.

JASIOŁEK, A.; NOSZCZYK, P.; ŁĄTKA, J. F. Paper-based building envelopes: thermal and environmental properties of original envelope designs. **Energy and buildings**, Lausanne, v. 289, p. 1–12, 2023. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113062. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877882300292X?via%3Dihub>. Acesso em: 29 set. 2023.

JENSEN, A. A.; ELKINGTON, J.; CHRISTIANSEN, K.; HOFFMANN, L.; MØLLER, B. T.; SCHMIDT, A.; VAN DIJK, F. **Life cycle assessment (LCA): a guide to approaches, experiences and information sources: environmental issues series 6**. Kongens Nytorv: European Environment Agency (EEA), 1997. 116 p.

JIANG, C.; LI, D.; ZHANG, P.; LI, J.; WANG, J.; YU, J. Formaldehyde and volatile organic compound (VOC) emissions from particleboard: identification of odorous compounds and effects of heat treatment. **Building and environment**, Oxford, v. 117, p. 118–126, 2017. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.03.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317300914?via%3Dihub>. Acesso em: 17 jun. 2021.

JOHANSSON, D. **Strenght and colour response of solid wood to heat treatment**. 2005. Thesis (Licentiate) - Department of Skellefteå Campus, Division of Wood Technology, Luleå University of Technology, Luleå, 2005. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:998987/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2021.

KAMDEM, D. P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. **Holz als roh - und werkstoff**, Berlin, v. 60, p. 1–6, 2002. DOI: 10.1007/s00107-001-0261-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-001-0261-1>. Acesso em: 12 ago. 2020.

KAMPERIDOU, V. Chemical and structural characterization of poplar and black pine wood exposed to short thermal modification. **Drvna industrija**, Zagreb, v. 72, n. 2, p. 155–167, 2021. DOI: 10.5552/drvind.2021.2026. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001033>. Acesso em: 21 nov. 2022.

KARLINASARI, L.; SEJATI, P. S.; ADZKIA, U.; ARINANA, A.; HIZIROGLU, S. Some of the physical and mechanical properties of particleboard made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*). **Applied sciences**, Basel, v. 11, p. 1–13, 2021. DOI: 10.3390/app11083682. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11083682>. Acesso em: 07 nov. 2023.

KELLY, M. W. **Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard**. Madison: USDA forest service, 1977. 70 p.

KLÍMEK, P.; WIMMER, R.; MEINLSCHMIDT, P.; KÚDELA, J. Utilizing miscanthus stalks as raw material for particleboards. **Industrial crops and products**, [S.l.], v. 111, p. 270–276, 2018. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.10.032. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669017307161?via%3Dihub>. Acesso em: 15 out. 2020.

KOKUBUN, Y. E. **O processo de produção de um sistema construtivo em painéis estruturais pré-fabricados em madeira**. 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-02072014-101053/publico/Dissertacao\\_Kokubun\\_2014.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-02072014-101053/publico/Dissertacao_Kokubun_2014.pdf). Acesso em: 14 jun. 2021.

KRÜGER, E. L.; LAROCA, C. Avaliação de desempenho térmico de protótipo de baixo custo em madeira de reflorestamento. **REM - International engineering journal**, Ouro Preto, v. 62, n. 4, p. 447–454, 2009. DOI: 10.1590/S0370-44672009000400006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/DshWg6vqkthmXvJrJtFj44M/?lang=pt>. Acesso em: 03 dez. 2021.

KUILEN, J. W. G.; DIAS, A. M. P. G. Long-term load-deformation behaviour of timber-concrete joints. **Proceedings of the institution of civil engineers: structures and buildings**, London, v. 164, n. 2, p. 143–154, 2011. DOI: doi/10.1680/stbu.10.00021. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/stbu.10.00021>. Acesso em: 12 out. 2023.

KUKA, E.; CIRULE, D.; ANDERSONE, I.; MIKLASEVICS, Z.; ANDERSONS, B. Life cycle inventory for currently produced pine roundwood. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 235, p. 613–625, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.07.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619323376?via%3Dihub>. Acesso em: 21 nov. 2022.

LAURENT, A. B.; MENARD, J. F.; LESAGE, P.; BEAUREGARD, R. Cradle-to-gate environmental life cycle assessment of the portfolio of an innovative forest products manufacturing unit. **Bioresources**, Raleigh, v. 11, n. 4, p. 8981–9001, 2016. DOI: 10.15376/biores.11.4.8981-9001. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/cradle-to-gate-life-cycle-assessment-of-the-portfolio-of-an-innovative-forest-products-manufacturing-unit/>. Acesso em: 23 out. 2023.

LEE, M.; KANG, E. C.; LEE, S. M. Decay and termite resistance performance of structural particleboard. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIO-BASED BUILDING MATERIALS, 5., 2023, Vienna. **Anais [...]**. Vienna: [S.l.], 2023a.

LEE, M.; KANG, E. C.; LEE, S.-M.; YOON, S. M. Mechanical properties of structural particleboard and termite and decay resistance. **Bioresources**, Raleigh, v. 18, n. 3, p. 6169–6182, 2023b. DOI: 10.15376/biores.18.3.6169-6182. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/mechanical-properties-of-structural-particleboard-and-termite-and-decay-resistance/>. Acesso em: 07 nov. 2023.

LI, C.; TANG, Y.; WANG, Y.; YUAN, X.; ZHANG, B.; WU, Z. A novel environment-friendly adhesive based on recycling of *Broussonetia papyrifera* leaf forestry waste protein. **Forests**, Basel, v. 13, n. 2, p. 1–11, 2022. DOI: 10.3390/f13020291. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/2/291>. Acesso em: 26 mar. 2022.

LI, S.; YUAN, Y.; WANG, J.; GUO, M. Do novel wooden composites provide an environmentally favorable alternative for panel-type furniture?. **Bioresources**, Raleigh, v. 14, n. 2, p. 2740–2758, 2019. DOI: 10.15376/biores.14.2.2740-2758. Disponível em: [https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/02/BioRes\\_14\\_2\\_2740\\_Li\\_YWG\\_Novel\\_Wooden\\_Composites\\_Environment\\_Altern\\_Panel\\_Furniture\\_14967-1.pdf](https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/02/BioRes_14_2_2740_Li_YWG_Novel_Wooden_Composites_Environment_Altern_Panel_Furniture_14967-1.pdf). Acesso em: 23 dez. 2023.

LIANG, W.; WANG, C.; YANG, C.; YANG, X. Volatile organic compounds in different interior construction stages of an apartment. **Building and environment**, Oxford, v. 81, p. 380–387, 2014. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.07.015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231400239X?via%3Dihub>. Acesso em: 26 set. 2023.

LOPES JUNIOR, W. E. **Estudo da durabilidade de painéis OSB de madeira Balsa residual com revestimento químico e natural**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74133/tde-19072021-151539/pt-br.php>. Acesso em: 16 dez. 2021.

LOPES JUNIOR, W. E.; BARBIRATO, G. H. A.; PAVESI, M.; SORIANO, J.; FIORELLI, J. Avaliação do teor ótimo de resinas orgânicas para produção de painéis OSB de madeira Balsa (*Ochroma pyramidale*) residual. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 49, n. 129, p. 1–11, 2021. DOI: 10.18671/scifor.v49n129.22. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.22>. Acesso em: 24 set. 2021.

LOVRIĆ, A.; ZDRAVKOVIĆ, V.; POPADIĆ, R.; MILIĆ, G. Properties of plywood boards composed of thermally modified and non-modified poplar veneer. **Bioresources**, Raleigh, v. 12, n. 4, p. 8581–8594, 2017. DOI: 10.15376/biores.12.4.8581-8594. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/properties-of-plywood-boards-composed-of-thermally-modified-and-non-modified-poplar-veneer/>. Acesso em: 12 ago. 2020.

LP CORPORATION. **LP OSB APA estrutural**. Curitiba, [2021]. Disponível em: <https://www.lpbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/06/OSB-APA-230120-BRA.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2021.

LP CORPORATION. **CES: Construção energitêmica sustentável: Steel frame e wood frame**. Curitiba, [2017]. Disponível em: [https://www.lpbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/06/Construção-CES\\_PDV.pdf](https://www.lpbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/06/Construção-CES_PDV.pdf). Acesso em: 05 out. 2021.

MALIK, J.; AINI, E. N.; TRISATYA, D. R.; SUHARTANA, S.; WAHYUDI, I.; AUGUSTINA, S. Dimensional stability and durability of hybrid sandwich panel made from oil palm lumber, sengon and gmelina with boron-alum impregnation. **Wood research**, Kyoto, v. 67, n. 6, p. 1017–1031, 2022. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/67.6.10171031. Disponível em: <http://www.woodresearch.sk/cms/dimensional-stability-and-durability-of-hybrid->

sandwich-panel-made-from-oil-palm-lumber-sengon-and-gmelina-with-boron-alum-impregnation/. Acesso em: 17 nov. 2023.

MAODUŠ, N.; AGARSKI, B.; KOČETOV MIŠULIĆ, T.; BUDAK, I.; RADEKA, M. Life cycle and energy performance assessment of three wall types in south-eastern Europe region. **Energy and buildings**, Lausanne, v. 133, p. 605–614, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.10.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816311409?via%3Dihub>. Acesso em: 29 set. 2023.

MARCON, B.; VIGUIER, J.; CANDELIER, K.; THEVENON, M.; BUTAUD, J.; PIGNOLET, L.; GARTILI, A.; DENAUD, L.; COLLET, R. Heat treatment of poplar plywood: modifications in physical, mechanical and durability properties. **iForest - Biogeosciences and forestry**, Viberto, v. 16, p. 1–9, 2023. DOI: 10.3832/ifor4159-015. Disponível em: <https://iforest.sisef.org/contents/?id=ifor4159-015>. Acesso em: 07 nov. 2023.

MEDEIROS, J. R. **Efeito da modificação térmica na resistência biológica da madeira de eucalipto**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2021. Disponível em: <https://cienciasflorestais.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGCFL/detalhes-da-tese?id=15226>. Acesso em: 08 fev. 2023.

MELO, D. Q.; SOUSA NETO, V. O.; BARROS, F. C. F.; RAULINO, G. S. C.; VIDAL, C. B.; NASCIMENTO, R. F. Chemical modifications of lignocellulosic materials and their application for removal of cations and anions from aqueous solutions. **Journal of applied polymer science**, New York, v. 133, n. 15, p. 1–22, 2016. DOI: 10.1002/app.43286. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.43286>. Acesso em: 19 out. 2023.

MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002153588>. Acesso em: 17 jun. 2021.

MENDES, R. F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; ALMEIDA, N. F.; SURDI, P. G.; BARBEIRO, I. N. Effects of thermal pre-treatment and variables of production on properties of OSB panels of *Pinus taeda*. **Maderas: ciencia y tecnologia**, Concepcion, v. 15, n. 2, p. 141–152, 2013a. DOI 10.4067/S0718-221X2013005000012. Disponível em: [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2013000200002&script=sci\\_abstract](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2013000200002&script=sci_abstract). Acesso em: 22 jun. 2020.

MENDES, R. F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; GARLET, A.; ALMEIDA, N. F.; SURDI, P. G. Resistência ao ataque de fungos apodrecedores em painéis OSB termicamente tratados. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 551–557, 2013b. DOI: 10.1590/S0104-77602013000400004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/QwQQ93rz8MgGf9p6S7QXvSK/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 22 jun. 2020.

MENDES, R. F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. ; ALMEIDA, N. F.; SURDI, P. G.; BARBEIRO, I. N. Effect of thermal treatment on properties of OSB panels. **Wood science**

**and technology**, New York, v. 47, p. 243–256, 2013c. DOI: 10.1007/s00226-012-0494-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-012-0494-7>. Acesso em: 26 mar. 2022.

MONTEIRO, S. R. S.; DIAS, A. M. P. G.; LOPES, S. M. R. Bi-dimensional numerical modeling of timber–concrete slab-type structures. **Materials and structures/Materiaux et constructions**, London, v. 48, p. 3391–3406, 2015. DOI: 10.1617/s11527-014-0407-3. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-014-0407-3>. Acesso em: 12 out. 2023.

NASCIMENTO, M. F.; BERTOLINI, M. da S.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Painéis OSB fabricados com madeiras da caatinga do nordeste do Brasil. **Ambiente construído**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 41–48, 2015. DOI: 10.1590/S1678-86212015000100005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212015000100005>. Acesso em: 12 fev. 2022.

NAVI, P.; SANDBERG, D. Heat treatment. In: NAVI, P.; SANDBERG, D. **Thermo-hydro-mechanical processing of wood**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2011. cap. 9, p. 249–286.

NICACIO, M. A.; PAES, J. B.; BUFALINO, L.; LOPEZ, Y. M.; SOUSA, S. F.; LOPES, D. J. V. Effect of silica bionanoparticles obtained from rice husk for the treatment of wood of *Pinus elliottii*. **Journal of wood chemistry and technology**, London, v. 42, n. 3, p. 158–170, 2022. DOI: 10.1080/02773813.2022.2055074. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02773813.2022.2055074>. Acesso em: 04 nov. 2023.

NOROUZI, M.; HADDAD, A. N.; JIMÉNEZ, L.; HOSEINZADEH, S.; BOER, D. Carbon footprint of low-energy buildings in the United Kingdom: effects of mitigating technological pathways and decarbonization strategies. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 882, p. 1–19, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163490. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723021095?via%3Dihub>. Acesso em: 29 set. 2023.

NUNES, A. M.; REGAZZI, A. J.; GONÇALVES, F. G.; PAES, J. B.; ALMEIDA, A. T. S.; BATISTA, D. C. Resistance to biodeterioration of plywood manufactured with veneers treated with boron compounds. **Journal of the Indian academy of wood science**, Bengaluru, v. 20, p. 138–148, 2023. DOI: 10.1007/s13196-023-00322-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13196-023-00322-1>. Acesso em: 07 nov. 2023.

OKINO, E. Y. A.; TEIXEIRA, D. E.; DEL MENEZZI, C. H. S. Post-thermal treatment of oriented strandboard (OSB) made from cypress (*Cupressus glauca* Lam.). **Maderas: ciencia y tecnologia**, Concepcion, v. 9, n. 3, p. 199–210, 2007. DOI: 10.4067/S0718-221X2007000300001. Disponível em: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-221X2007000300001](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2007000300001). Acesso em: 25 jun. 2020.

OLIVEIRA, L. A. **Tecnologia de painéis pré-fabricados arquitetônicos de concreto para emprego em fachadas de edifícios**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-04062003-100758/publico/Oliveira2002.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2021.

PAES, J. B.; MAFFIOLETTI, F. D.; SILVA, M. R.; RAMALHO, A. H. C.; MEDEIROS, J. R.; LOPEZ, Y. M.; SEGUNDINHO, P. G. A.; LAHR, F. A. R. Biological resistance of sandwich particleboard made with sugarcane, thermally-treated pinus wood and malva fiber. **Journal of wood chemistry and technology**, London, v. 42, n. 3, p. 171–180, 2022. DOI: 10.1080/02773813.2022.2056612. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02773813.2022.2056612>. Acesso em: 08 fev. 2023.

PAUL, W.; OHLMEYER, M.; LEITHOFF, H. Thermal modification of OSB-strands by a one-step heat pre-treatment: influence of temperature on weight loss, hygroscopicity and improved fungal resistance. **Holz als roh - und werkstoff**, Berlin, v. 65, n. 1, p. 57–63, 2007. DOI 10.1007/s00107-006-0146-4. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-006-0146-4>. Acesso em: 22 jun. 2020.

PAUL, W.; OHLMEYER, M.; LEITHOFF, H.; BOONSTRA, M. J.; PIZZI, A. Optimising the properties of OSB by a one-step heat pre-treatment process. **Holz als roh - und werkstoff**, Berlin, v. 64, n. 3, p. 227–234, 2006. DOI: 10.1007/s00107-005-0073-9. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-005-0073-9>. Acesso em: 25 jun. 2020.

PEREIRA, G. F.; IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; RIOS, P. D. A.; RAIA, R. Z. Influence of thermal modification on the physical and mechanical properties of *Eucalyptus badjensis* mixed particleboard / OSB panels. **Floresta**, [S.l.], v. 51, n. 2, p. 419–428, 2021. DOI: 10.5380/rf.v51i2.69403. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/69403>. Acesso em: 27 dez. 2022.

PESSOA, A. M. D. C.; BERTI FILHO, E.; BRITO, J. O. Avaliação da madeira termorretrificada de *Eucalyptus grandis*, submetida ao ataque de cupim de madeira seca, *Cryptotermes brevis*. **Scientia forestalis/Forest sciences**, Piracicaba, v. 72, p. 11–16, 2006. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr72.aspx>. Acesso em: 17 jun. 2021.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; BRITO, J. O.; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorretrificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia forestalis/Forest sciences**, Piracicaba, n. 61, p. 122–132, 2002. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr61/cap11.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2021.

PIPIŠKA, T.; PAŘIL, P.; ČERMÁK, P.; DÖMÉNY, J.; KRÁL, P.; KAMKE, F. Effect of chemical and thermal modification, and material replacement on strand board properties. **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 78, p. 565–575, 2020. DOI: 10.1007/s00107-020-01527-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01527-8>. Acesso em: 22 jun. 2020.

POZZER, T.; GAUSS, C.; BARBIRATO, G. H. A.; FIORELLI, J. Trapezoidal core sandwich panel produced with sugarcane bagasse. **Construction and building materials**, Guildford, v. 264, p. 1-6, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120718. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120718>. Acesso em: 01 dez. 2021.

PUETTMANN, M.; KAESTNER, D.; TAYLOR, A. **Corrim report: Module E life cycle assessment of oriented strandboard (OSB) production**. [s.l.], North american structural and architectural wood products. 2016. Disponível em: <https://corrim.org/wp-content/uploads/Module-E-OSB-Final-w-survey.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2022.

RIVELA, B.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G. Life cycle inventory of medium density fibreboard. **International journal of life cycle assessment**, Heidelberg, v. 12, p. 143–150, 2007. DOI: 10.1065/lca2006.12.290. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2006.12.290>. Acesso em: 29 set. 2023.

ROWELL, R. M. Chemical modification of wood. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 1983. cap. 14, p. 383–413.

ROWELL, R. M. Chemical modification of wood: A short review. **Wood material science and engineering**, London, v. 1, n. 1, p. 29–33, 2006. DOI: 10.1080/17480270600670923. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480270600670923>. Acesso em: 26 out. 2021.

ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005. 473 p.

ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. 687 p.

ROWELL, R. M.; DRIVE, O. G. P. Chemical modification of lignocellulosics. In: GATENHOLM, P. and CHIHANI, T. (ed.). **International workshop on frontiers of surface modification and characterization of lignocellulosic fibers**. Madison: USDA forest service, 1999. cap. 2, p. 31–47.

SALDANHA, L. K. **Alternativas tecnológicas para produção de chapas de partículas orientadas “OSB”**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/26675>. Acesso em: 06 mar. 2022.

SALEM, M. Z. M.; BÖHM, M.; ŠEDIVKA, P.; NASSER, R. A.; ALI, H. M.; ABO ELGAT, W. A. A. Some physico-mechanical characteristics of uncoated OSB eco-products made from scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and bonded with pMDI resin. **Bioresources**, Raleigh, v. 13, n. 1, p. 1814–1828, 2018. DOI: 10.15376/biores.13.1.1814-1828. Disponível em: [https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2018/01/BioRes\\_13\\_1\\_1814\\_Salem\\_BNABEES\\_Physico\\_Mechanical\\_Charac\\_Uncoat\\_OSb\\_Pine\\_pMDI\\_13155.pdf](https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2018/01/BioRes_13_1_1814_Salem_BNABEES_Physico_Mechanical_Charac_Uncoat_OSb_Pine_pMDI_13155.pdf). Acesso em: 12 fev. 2022.

SANDBERG, D.; KUTNAR, A.; MANTANIS, G. Wood modification technologies: a review. **IForest**, Viberto, v. 10, p. 895–908, 2017. DOI: 10.3832/ifor2380-010. Disponível em: <https://iforest.sisef.org/abstract/?id=ifor2380-010>. Acesso em: 17 jun. 2020.

SANTOS, M. F. N. dos; BATTISTELLE, R. Ap. G.; BEZERRA, B. S.; VARUM, H. S. A. Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (*Saccharum* spp.) and pine wood shavings (*Pinus elliottii*). **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 64, p. 345–355, 2014. DOI:



10.1016/j.jclepro.2013.06.039. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.039>. Acesso em: 17 jun. 2021.

SANTOS, P.; CORREIA, J. R.; GODINHO, L.; DIAS, A. M. P. G.; DIAS, A. Life cycle analysis of cross-insulated timber panels. **Structures**, London, v. 31, p. 1311–1324, 2021. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.008. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.008>. Acesso em: 13 mar. 2022.

SANTOS, A. M. L.; SOUZA, F.; COSTA, M. A.; TELES, R. F.; PAZETTO, V. M. F.; DEL MENEZZI, C. H. S. Efeito do tratamento térmico sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola em painéis OSB. **Ciencia Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 31–40, 2009. DOI: 10.5902/19805098417. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/19805098417>. Acesso em: 22 jun. 2020.

SANTOS, P. G. G.; MARTINS, C. E. J.; SKINNER, J.; HARRIS, R.; DIAS, A. M. P. G.; GODINHO, L. M. C. Modal frequencies of a reinforced timber-concrete composite floor: testing and modeling. **Journal of structural engineering**, New York, v. 141, n. 11, p. 1–11, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001275. Disponível em:  
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0001275>. Acesso em: 12 out. 2023.

SARTORI, T.; TOMASI, R. Experimental investigation on sheathing-to-framing connections in wood shear walls. **Engineering structures**, Oxford, v. 56, p. 2197–2205, 2013. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.08.039. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.039>. Acesso em: 02 jan. 2022.

SCHULZ, H. R.; ACOSTA, A. P.; BARBOSA, K. T.; JUNIOR, M. A. P. da S.; GALLIO, E.; DELUCIS, R. Á.; GATTO, D. A. Chemical, mechanical, thermal, and colorimetric features of the thermally treated *Eucalyptus grandis* wood planted in Brazil. **Journal of the korean wood science and technology**, Seoul, v. 49, n. 3, p. 1–8, 2021. DOI: 10.5658/WOOD.2021.49.3.226. Disponível em:  
<https://doi.org/10.5658/WOOD.2021.49.3.226>. Acesso em: 21 fev. 2022.

SCOUSE, A. A.; KELLEY, S. S.; VENDITTI, R. A.; MCCONNEL, T. E. Evaluating sustainable product alternatives by combining life cycle assessment with full-cost accounting: a highway guardrail case study. **Bioresources**, Raleigh, v. 15, n. 4, p. 9103–9127, 2020. DOI: 10.15376/biores.15.4.9103-9127. Disponível em:  
<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/evaluating-sustainable-product-alternatives-by-combining-life-cycle-assessment-with-full-cost-accounting-a-highway-guardrail-case-study/>. Acesso em: 23 out. 2023.

SERPA, P. N.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; PIMENTA, A. S. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 723–733, 2003. DOI: 10.1590/S0100-67622003000500015. Disponível em:  
<https://www.scielo.br/j/rarv/a/Ysh8ynB5rpNrHRTdFhspFsg/>. Acesso em: 13 mar. 2022.

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest products and wood science an introduction**. 6. ed. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2011. 483 p.

SILVA, J. V. F.; CAMPOS, C. I.; FERREIRA, B. S.; FERNANDA, M. Production and characterization of heat treated OSB made of *Pinus taeda*. **Acta scientiarum technology**, Maringá, v. 41, p. 1–6, 2019. DOI: 10.4025/actascitechnol.v41i1.39505. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/39505>. Acesso em: 05 out. 2021.

SILVA, D. A. L.; LAHR, F. A. R.; GARCIA, R. P.; FREIRE, F. M. C. S.; OMETTO, A. R. Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. **International journal of life cycle assessment**, Heidelberg, v. 18, p. 1404–1411, 2013. DOI: 10.1007/s11367-013-0583-3. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-013-0583-3>. Acesso em: 21 fev. 2022.

SINHA, A.; GUPTA, R.; NAIRN, J. A. Effect of heat on the mechanical properties of wood and wood composites. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING - WCTE 2010, 11., 2010, Trentino. **Anais [...]**. Trentino: [S.l.], 2010. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/290017145\\_Effect\\_of\\_heat\\_on\\_the\\_mechanical\\_properties\\_of\\_wood\\_and\\_wood\\_composites](https://www.researchgate.net/publication/290017145_Effect_of_heat_on_the_mechanical_properties_of_wood_and_wood_composites). Acesso em: 22 jun. 2020.

SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS. **Diretriz SiNAT nº 005**: rev. 02: Sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada com fechamentos em chapas: sistemas leves tipo “light wood framing”. Brasília: PBQP-H, Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat, 2017.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Boletim SNIF 2019**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2019. Disponível em: [https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim-SNIF\\_Ed1\\_2019.pdf](https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim-SNIF_Ed1_2019.pdf). Acesso em: 02 jan. 2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Boletim SNIF 2020**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2021. Disponível em: [https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim\\_SNIF\\_ed1\\_2020\\_vfinal.pdf](https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim_SNIF_ed1_2020_vfinal.pdf). Acesso em: 02 jan. 2022.

SUGAHARA, E. S. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de eucalipto e bagaço de cana, com adesivos ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/0731ea7a-7edb-4be0-bc64-2c18cdba0106>. Acesso em: 12 fev. 2020.

SUGAHARA, E. S.; ARROYO, F. N.; CAMPOS, C. I.; BOTELHO, E. C.; CHRISTOFORO, A. L.; COSTA, M. L.; LAHR, F. A. R. Thermal treatment of OSB panels: a systematic and bibliometric overview. **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 80, p. 1293–1307, 2022. DOI: 10.1007/s00107-022-01849-9. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-022-01849-9>. Acesso em: 03 out. 2022.

SUGAHARA, E.; CASAGRANDE, B.; ARROYO, F.; ARAUJO, V.; SANTOS, H.; FAUSTINO, E.; CHRISTOFORO, A.; CAMPOS, C. Comparative study of plywood boards produced with castor oil-based polyurethane and phenol-formaldehyde using *Pinus taeda* l. veneers treated with chromated copper arsenate. **Forests**, Basel, v. 13, p. 1-16, 2022a. DOI:

10.3390/f13071144. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f13071144>. Acesso em: 03 out. 2022.

SUGAHARA, E. S.; DA SILVA, S. A. M.; BUZO, A. L. S. C.; CAMPOS, C. I.; MORALES, E. A. M.; FERREIRA, B. S.; AZAMBUJA, M. dos A.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. High-density particleboard made from agro-industrial waste and different adhesives. **Bioresources**, Raleigh, v. 14, n. 3, p. 5162–5170, 2019. DOI: 10.15376/biores.14.3.5162-5170. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/high-density-particleboard-made-from-agro-industrial-waste-and-different-adhesives/>. Acesso em: 15 out. 2020.

SUGAHARA, E.; DIAS, A.; ARROYO, F.; CHRISTOFORO, A.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C.; DIAS, A. M. P. G.; CAMPOS, C. Study of the influence of heat treatment on OSB panels produced with eucalyptus wood in different layer compositions. **Forests**, Basel, v. 13, p. 1–18, 2022b. DOI: 10.3390/f13122083. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f13122083>. Acesso em: 07 dez. 2022.

SUGAHARA, E.; DIAS, A.; BOTELHO, E.; CAMPOS, C.; DIAS, A.. Life cycle assessment of OSB panels produced with alternative raw materials. AMZIANE, S.; MERTA, I.; PAGE, J. (ed.). **In: Bio-Based Building Materials**. Cham: Springer, 2023. v. 45, cap. 74, p. 959–972.

SUGAHARA, E. S.; DIAS, A. M. A.; BOTELHO, E. C.; DIAS, A. M. P. G.; CAMPOS, C. I. Environmental evaluation of experimental heat-treated oriented strand board. **Bioresources**, Raleigh, v. 19, n. 1, p. 732–750, 2024. DOI: 10.15376/biores.19.1.732-750. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/environmental-evaluation-of-experimental-heat-treated-oriented-strand-board/>. Acesso em: 07 dez. 2023.

SURDI, P. G. **Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) a partir da madeira de um híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002296426>. Acesso em: 12 fev. 2022.

SUZUKI, S.; TAKEDA, K. Production and properties of Japanese oriented strand board: effect of strand length and orientation on strength properties of sugi oriented strand board. **Journal of wood science**, Tokyo, v. 46, p. 289–295, 2000. DOI: 10.1007/BF00766219. Disponível em: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/BF00766219>. Acesso em: 26 mar. 2022.

TASCIOGLU, C.; YOSHIMURA, T.; TSUNODA, K. Biological decay and termite resistance of post-treated wood-based composites under protected above-ground conditions: a preliminary study after 36 months of exposure. **Bioresources**, Raleigh, v. 8, n. 1, p. 833–843, 2013. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/biological-decay-and-termite-resistance-of-post-treated-wood-based-composites-under-protected-above-ground-conditions-a-preliminary-study-after-36-months-of-exposure/>. Acesso em: 07 nov. 2023.

TERZI, E. Thermal degradation of particleboards incorporated with colemanite and common boron-based fire retardants. **Bioresources**, Raleigh, v. 13, n. 2, p. 4239–4251, 2018. DOI: 10.15376/biores.13.2.4239-4251. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp->

content/uploads/2018/04/BioRes\_13\_2\_4239\_Terzi\_Thermal\_Degrad\_Particleboards\_Colemanite\_Boron\_Fire\_Retardants\_13354.pdf. Acesso em: 17 jun. 2021.

UNITED NATIONS. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**, [s.l.]: [2022]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 24 mar. 2022.

UNITED NATIONS. Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development. **UN documents**. Oslo: 1987. 25p.

UNITED NATIONS. **The SDGS in action**. What are the sustainable development goals?, [s.l.], [2015]. Disponível em: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>. Acesso em: 16 out. 2022.

UNSAL, O.; CANDAN, Z.; BUYUKSARI, U.; KORKUT, S.; BABIAK, M. Effects of thermal modification on surface characteristics of OSB panels. **Wood research**, Kyoto, v. 55, n. 4, p. 51–58, 2010. Disponível em: <http://www.woodresearch.sk/wr/201004/05.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2020.

UNSAL, Ö.; NAMI KARTAL, S.; CANDAN, Z.; ARANGO, R.; CLAUSEN, C. A.; GREEN, F. Preliminary investigation of biological resistance, water absorption and swelling of thermally compressed pine wood panels. In: THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PROTECTION, 39., 2008, Istanbul. **Anais [...]**. Istanbul: IRG secretariat, 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/254167993\\_Preliminary\\_investigation\\_of\\_biological\\_resistance\\_water\\_absorption\\_and\\_swelling\\_of\\_thermally\\_compressed\\_pine\\_wood\\_panels](https://www.researchgate.net/publication/254167993_Preliminary_investigation_of_biological_resistance_water_absorption_and_swelling_of_thermally_compressed_pine_wood_panels). Acesso em: 06 nov. 2023.

WANG, J.; CAO, X.; LIU, H. A review of the long-term effects of humidity on the mechanical properties of wood and wood-based products. **European journal of wood and wood products**, Berlin, v. 79, p. 245–259, 2021. DOI: 10.1007/s00107-020-01623-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01623-9>. Acesso em: 09 mar. 2023.

WANG, J.; DENG, N.; CAO, N.; LI, J.; SUN, J. Life cycle analysis of a novel treatment method for recycling wood processing residues into the core material of wooden doors. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 415, p. 1–12, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137798. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137798>. Acesso em: 12 jul. 2023.

WANG, Zheng; XIE, W.; LU, Y.; LI, H.; WANG, Zhiheng; LI, Z. Dynamic and static testing methods for shear modulus of oriented strand board. **Construction and building materials**, Guildford, v. 216, p. 542–551, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.004>. Acesso em: 01 dez. 2021.

WASIM, M.; NGO, T. D.; LAW, D. A state-of-the-art review on the durability of geopolymer concrete for sustainable structures and infrastructure. **Construction and building materials**, Guildford, v. 291, p. 1-21, 2021. DOI: /10.1016/j.conbuildmat.2021.123381. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123381>. Acesso em: 09 mar. 2023.

WERNER, F.; ALTHAUS, H. J.; RICHTER, K.; SCHOLZ, R. W. Post-consumer waste wood in attributive product LCA: context specific evaluation of allocation procedures in a

functionalistic conception of LCA. **International journal of life cycle assessment**, Heidelberg, v. 12, p. 160–172, 2007. DOI: 10.1065/lca2006.05.249. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2006.05.249>. Acesso em: 21 nov. 2022.

WERNER, F.; RICHTER, K. Wooden building products in comparative LCA: a literature review. **International journal of life cycle assessment**, Heidelberg, v. 12, p. 470–479, 2007. DOI: 10.1065/lca2007.04.317. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2007.04.317>. Acesso em: 13 mar. 2022.

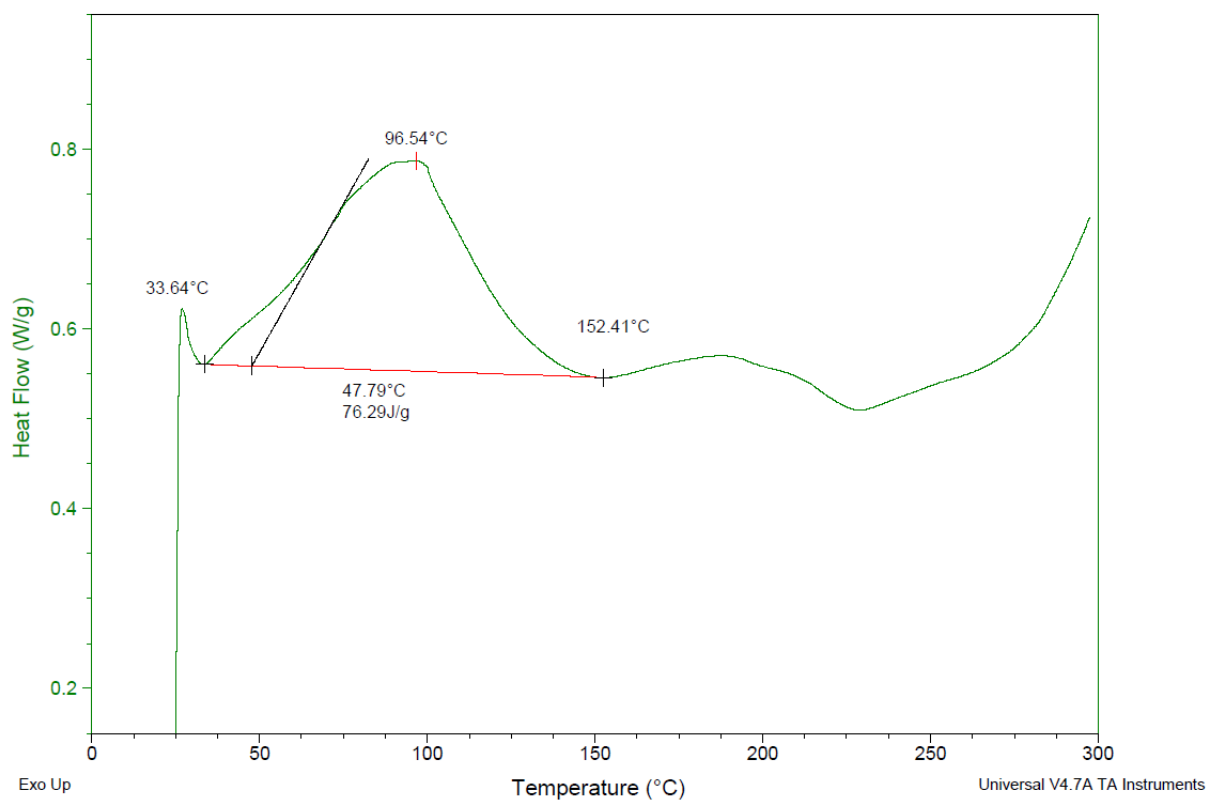
WILCZAK, L.; TRIANOSKI, R.; NETO, S. C.; PEREIRA PAULA, C. R.; VILLANOVA, R. L.; AZEVEDO, E. Efficiency of castor oil-based polyurethane in the production of plywood panels. **Scientia forestalis/Forest sciences**, Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 463–471, 2019. DOI: 10.18671/scifor.v47n123.08. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr123/cap08.pdf>. Acesso em: 13 maio 2022.

WINDEISEN, E.; STROBEL, C.; WEGENER, G. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. **Wood science and technology**, New York, v. 41, p. 523–536, 2007. DOI: 10.1007/s00226-007-0146-5. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-007-0146-5>. Acesso em: 17 jun. 2021.

WINDT, I.; LI, W.; BULCKE, J. V. D.; VAN ACKER, J. Classification of uncoated plywood based on moisture dynamics. **Construction and building materials**, Guildford, v. 158, p. 814–822, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.194. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.194>. Acesso em: 13 maio 2022.

XIONG, J.; ZHANG, P.; HUANG, S.; ZHANG, Y. Comprehensive influence of environmental factors on the emission rate of formaldehyde and VOCs in building materials: Correlation development and exposure assessment. **Environmental research**, San Diego, v. 151, p. 734–741, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2016.09.003>. Acesso em: 25 set. 2023.

ZHUANG, B.; CLOUTIER, A. Physical and mechanical properties of oriented strand board made from eastern canadian softwood species. **Forests**, Basel, v. 13, p. 1–10, 2022. DOI: 10.3390/f13040523. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f13040523>. Acesso em: 09 maio 2022.

**APÊNDICE A – DSC do adesivo**

**APÊNDICE B – Isoterma do adesivo a 120°C**