

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**RODRIGO ANDRAUS BISPO**

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE PARTÍCULA COM RESINA  
ALTERNATIVA DE POLIETILENO TEREFALATO E BREU COLOFÔNIA**

Ilha Solteira  
2025

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS -**  
**PPGCM**

**RODRIGO ANDRAUS BISPO**

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE PARTÍCULA COM  
RESINA ALTERNATIVA DE POLIETILENO TEREFALATO E BREU  
COLOFÔNIA**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em ciência e engenharia dos materiais. Linha de pesquisa: Materiais funcionais e estruturais.

Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki  
**Orientador**

Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva  
**Coorientador**

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

B622p Bispo, Rodrigo Andraus.  
Produção e avaliação de painéis de partícula com resina alternativa de polietileno tereftalato e breu colofônia / Rodrigo Andraus Bispo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025  
139 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciência e Engenharia de Materiais, 2025

Orientador: Jorge Luís Akasaki  
Coorientador: Sérgio Augusto Mello Da Silva  
Inclui bibliografia

1. Painel de partículas. 2. Polietileno tereftalato. 3. Breu colofônia. 4. Madeira de pinus. 5. Propriedades físico-mecânicas.

### **Impacto potencial desta pesquisa**

A pesquisa apresenta solução sustentável para o descarte de PET, convertendo resíduos plásticos em painéis para construção civil e setor moveleiro. A proposta contribui para reduzir a poluição, preservar recursos naturais e promover a economia circular com menor impacto ambiental.

### **Potential impact of this research**

The research presents a sustainable solution for PET disposal, converting plastic waste into particleboards for the construction and furniture industries. The proposal helps reduce pollution, preserve natural resources and promote a circular economy with a lower environmental impact.

## **CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

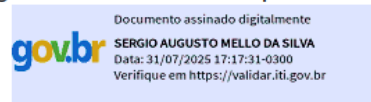
**TÍTULO DA TESE:** Produção e avaliação de painéis de partícula com resina alternativa de polietileno tereftalato e breu colofônia

**AUTOR: RODRIGO ANDRAUS BISPO**

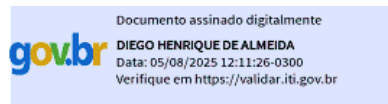
**ORIENTADOR: JORGE LUIS AKASAKI**

**COORDENADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA**

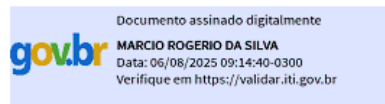
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciência dos Materiais, área: Ciência e Engenharia dos Materiais pela Comissão Examinadora:



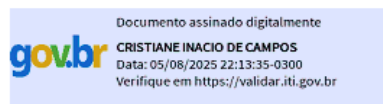
Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



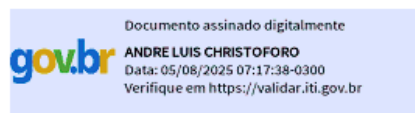
Prof. Dr. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA (Participação Virtual)  
Departamento Acadêmico de Engenharia Civil / Universidade Federal de Rondônia - UNIR



Prof. Dr. MARCIO ROGÉRIO DA SILVA (Participação Virtual)  
Faculdade de Etnodiversidade / Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Dr. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências e Tecnologia / Instituto de Ciências e Engenharia - UNESP



Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Ilha Solteira, 01 de agosto de 2025

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Benevides Bispo Neto e  
Miriam Brandão Andraus Bispo.

## **AGRADECIMENTOS**

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

Ao longo de seu desenvolvimento o Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais financiou o custeio do valor da inscrição e da estadia do autor para participação nos seguintes congressos: 24º CBECiMat (2022), XXI B-MRS Meeting (2023) e 25º CBECiMat (2024).

Agradeço a Deus na Trindade Divina.

À Virgem Maria, Auxílio dos cristãos.

A meu orientador Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki e a meu coorientador Prof. Dr. Sérgio Augusto Melo da Silva.

Aos professores Dr. José Antônio Malmonge (presidente), Dr. Devaney Ribeiro do Carmo e Dr. Fernando Rogério de Paula por comporem a banca do Exame Geral de Qualificação – EGQ e aos professores Dr. André Luis Christoforo, Dra. Cristiane Inácio de Campos, Dr. Diego Henrique de Almeida, Dr. Márcio Rogério da Silva e Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva (presidente) por comporem a banca examinadora da defesa deste trabalho.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência dos Materiais – PPGCM da FEIS/UNESP e a todos os seus professores, em especial aos que tive a oportunidade de ser aluno em disciplinas ao longo do curso do doutorado.

Ao Departamento de Engenharia Civil – DEC da FEIS/UNESP a seus laboratórios e a todos os seus servidores técnicos por contribuírem com os ensaios mecânicos de Módulo de Resistência à Flexão Estática – MOR, Módulo de Elasticidade – MOE e Tração Perpendicular – TP.

Ao Departamento de Física e Química – DFQ da FEIS/UNESP a seus laboratórios e a todos seus servidores técnicos por contribuírem com os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV e Termogravimetria – TG.

Ao Departamento de Matemática – DMAT da FEIS/UNESP na pessoa de sua chefe à ocasião – Profa. Dra. Christiane Marie Schweitzer – por me receber como professor substituto do conjunto de disciplinas: Cálculo I, Álgebra Linear, Matemática

Aplicada, Matemática I e Matemática II, ministradas aos cursos de Zootecnia, Engenharia Civil, Mecânica, Elétrica e Agronômica e ao DEC na pessoa de seu chefe à ocasião – Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima – por me receber com igual consideração como professor substituto do conjunto de disciplinas: Maciços e Obras de Terra e Fundações ministradas ao curso de Engenharia Civil.

À Seção de Manutenção e Conservação – Diretoria de Serviços da FEIS/UNESP, em nome do servidor da marcenaria o senhor Luiz Doniseti Belezze por contribuir com a produção das partículas de madeira e com o preparo dos corpos de prova.

Ao grupo de pesquisa Materiais Alternativos de Construção – MAC, o qual tenho o prazer de integrar desde o ano de 2020 na pessoa de seus coordenadores, Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki e Mauro Mitsuuchi Tachima.

Aos professores Dr. Jorge Luís Akasaki, Dr. Marco Antonio de Moraes Alcântara, Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva (área de construção civil), Dr. Adriano Souza, Dr. José Augusto Di Lollo (área de geotecnia), Dr. Artur Pantoja Marques e Dra. Luzenira Alves Brasileiro (área de transportes) por me convidarem a integrar bancas de Trabalhos de Conclusão de Curso – TCC de seus orientados.

À empresa Global PET<sup>®</sup> pela doação do poliuretano tereftalato – PET utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

“Sermão do 4º Domingo da Ascensão

A mim, a imagem dos meus pecados me comove muito mais que essa imagem do Cristo crucificado. Diante dessa imagem do Cristo crucificado eu sou levado a ensoberbecer-me por ver o preço pelo qual Deus me comprou. Diante da imagem dos meus pecados é que eu me apequeno por ver o preço pelo qual eu me vendi. Por ver que Deus me compra com todo o seu sangue, eu sou levado a pensar que eu sou muito, que eu valho muito. Mas quando noto que eu me vendo pelos nada do mundo, aí eu vejo que eu sou nada. Eu valho nada.”

Sermões do Padre Antônio Vieira, 1679.

## RESUMO

O polietileno tereftalato (PET) é um polímero da família do poliéster que se tornou amplamente difundido quando utilizado na produção de garrafas de refrigerantes e água potável. O descarte inadequado desse material e a falta de alternativas de reuso são problemas significativos que geram poluição e contribuem para o acúmulo de plástico nos oceanos. O objetivo deste trabalho foi produzir e avaliar painéis de partículas homogêneas feitos de madeira de pinus – conhecida por sua baixa densidade e rápido crescimento – aglomerados com adesivo alternativo de polietileno tereftalato reciclado (PETr) e breu colofônia, com potencial para aplicação na construção civil e indústria moveleira. Para produção dos painéis, o polímero reciclado e a resina foram moídos até atingirem diâmetro médio de partícula inferior a 250  $\mu\text{m}$ , contribuindo para o aumento da superfície específica e auxiliando o processo de fusão e adesão às partículas de madeira. A madeira de pinus foi caracterizada quanto a densidade e geometria das partículas. As partículas foram homogeneizadas e prensadas para consolidar os painéis sob temperatura e pressão controladas ( $T = 160^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 5,7\text{MPa}$ ). Três níveis de adesivo alternativo foram propostos (10%, 20% e 30%) em relação à massa seca de pinus, com diferentes teores de mistura entre PETr e breu (100% - 0%, 75% - 25%, 50% - 50%, 25% - 75% e 0% - 100%). Os painéis produzidos foram avaliados quanto às propriedades físicas de densidade (D), teor de umidade (U), inchamento em espessura após 24 horas (I), absorção de água (AA) e absorção superficial (AS) bem como propriedades mecânicas, incluindo módulo de resistência à flexão estática (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e resistência à tração perpendicular (TP), além de propriedades morfológicas avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia óptica (MO). Os resultados indicaram que os painéis das composições C2<sup>30</sup> e C3<sup>30</sup> atenderam aos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas brasileira ABNT NBR 14810-2 (2024), americanas ANSI A208.1 (2022) e CS 236-66 (1996) e europeia EN 312 (2010), apresentando uma alternativa com menor impacto ambiental em relação aos painéis atualmente em uso.

**Palavras-chave:** painel de partículas; polietileno tereftalato; breu colofônia; madeira de pinus; propriedades físico-mecânicas.

## ABSTRACT

Polyethylene terephthalate (PET) is a polymer from the polyester family that has become widely used in the production of soft drink and potable water bottles. The improper disposal of this material and the lack of reuse alternatives are significant issues that cause pollution and contribute to the accumulation of plastic in the oceans. The objective of this study was to produce and evaluate homogeneous particleboards made from pine wood - known for its low density and fast growth - bonded with an alternative adhesive composed of recycled polyethylene terephthalate (PETr) and colophony rosin, with potential applications in civil construction and the furniture industry. For the production of the panels, the recycled polymer and the rosin were ground until reaching an average particle diameter of less than 250  $\mu\text{m}$ , increasing the specific surface area and aiding the fusion and adhesion process to the wood particles. The pine wood was characterized in terms of particle density and geometry. The particles were homogenized and pressed to consolidate the panels under controlled temperature and pressure conditions ( $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 5,7\text{ MPa}$ ). Three levels of alternative adhesive were proposed (10%, 20%, and 30%) relative to the dry mass of pine, with different mixing ratios of PETr and rosin (100%-0%, 75%-25%, 50%-50%, 25%-75%, and 0%-100%). The produced panels were evaluated for physical properties including density ( $D$ ), moisture content ( $U$ ), thickness swelling after 24 hours ( $I$ ), water absorption ( $WA$ ), and surface absorption ( $SA$ ), as well as mechanical properties such as modulus of rupture ( $MOR$ ), modulus of elasticity ( $MOE$ ), and internal bond strength ( $IB$ ). Morphological properties were also assessed using scanning electron microscopy ( $SEM$ ) and optical microscopy ( $OM$ ). The results indicated that the produced panels of the  $C2^{30}$  and  $C3^{30}$  compositions met the minimum requirements established by the Brazilian standard ABNT NBR 14810-2 (2024), the American standards ANSI A208.1 (2022) and CS 236-66 (1996), and the European standard EN 312 (2010), offering an environmentally friendlier alternative compared to conventional particleboards currently in use.

**Keywords:** particleboards; polyethylene terephthalate; colophony rosin; pine wood; physical-mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b>  | Número de publicações anuais relacionadas à palavra chave particleboard via bases de dados <i>Science Direct</i> e <i>Springer Nature</i> .....                                                                                                                         | 31 |
| <b>Figura 2</b>  | Esquema dos grupos de painéis de partículas.....                                                                                                                                                                                                                        | 32 |
| <b>Figura 3</b>  | Balanço entre expostação e absorção do mercado interno da produção brasileira de painéis de partículas.....                                                                                                                                                             | 36 |
| <b>Figura 4</b>  | Taxa de exportação, importação e consumo interno de painéis de madeira no Brasil em milhões de m <sup>3</sup> entre 2014 e 2023.....                                                                                                                                    | 36 |
| <b>Figura 5</b>  | Principais países produtores de painéis de madeira reconstituída em milhões de m <sup>3</sup> .....                                                                                                                                                                     | 37 |
| <b>Figura 6</b>  | Produção mundial de painéis de partículas no mundo em metros cúbicos.....                                                                                                                                                                                               | 37 |
| <b>Figura 7</b>  | Diferenciação de área de floresta nativa e de floresta plantada...                                                                                                                                                                                                      | 42 |
| <b>Figura 8</b>  | Distribuição de áreas de florestas plantadas no Brasil por espécies.....                                                                                                                                                                                                | 42 |
| <b>Figura 9</b>  | Distribuição das florestas plantadas de pinus no Brasil no ano de 2023.....                                                                                                                                                                                             | 42 |
| <b>Figura 10</b> | Efeitos negativos do plástico no ecossistema marinho: (a) ingestão de plástico por tubarão, (b) Fixação em detritos plásticos por levas, (c) cobertura parcial de poluentes plásticos em colônia de ostras, e (d) enredamento de filhote em fio plástico sintético..... | 46 |
| <b>Figura 11</b> | Síntese da produção de PET: (a) processo de TPA, e (b) DMT.....                                                                                                                                                                                                         | 47 |
| <b>Figura 12</b> | Decomposição térmica das partículas de PET por Dwivedi (2025): (a) TG, e (b) DTG.....                                                                                                                                                                                   | 48 |
| <b>Figura 13</b> | Decomposição térmica das partículas de PET por Shixian (2025): (a) TG, e (b) DTG.....                                                                                                                                                                                   | 50 |
| <b>Figura 14</b> | Breu: (a) branco, e (b) de sorva.....                                                                                                                                                                                                                                   | 51 |

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 15</b> | Exemplo de aplicação de breu colofônia no esporte: (a) levantamento de peso, e (b) balé.....                                                                                                                                                             | 51 |
| <b>Figura 16</b> | Processo de obtenção da goma de pinus de floresta plantadas: (a) execução de estrias no lenho da árvore, e (b) acúmulo da goma de pinus.....                                                                                                             | 52 |
| <b>Figura 17</b> | Extração da goma de pinus.....                                                                                                                                                                                                                           | 52 |
| <b>Figura 18</b> | Breu colofônia após processo de destilação da goma de pinus...                                                                                                                                                                                           | 53 |
| <b>Figura 19</b> | Breu colofônia comercial.....                                                                                                                                                                                                                            | 53 |
| <b>Figura 20</b> | TG e DTG das partículas de breu colofônia.....                                                                                                                                                                                                           | 54 |
| <b>Figura 21</b> | TG e DTG do óleo de pinho – <i>tall oil based rosin acid</i> (TO) com teores de ácido colofônico variando em 2% (TO02), 10% (TO10) e 20% (TO20).....                                                                                                     | 55 |
| <b>Figura 22</b> | Propriedades mecânicas dos painéis de partícula de bambu aglutinados com adesivos alternativos a base de óleo de soja e de palma: (a) resistência à tração, e (b) resistência a flexão simples.....                                                      | 57 |
| <b>Figura 23</b> | Propriedades físico-mecânicas dos painéis produzidos: (a) Inchamento em espessura e absorção de água; (b) MOR e MOE; e (c) resistência à tração.....                                                                                                     | 58 |
| <b>Figura 24</b> | Resistência de ligação úmida e seca dos adesivos: (a) para diferentes formulações de LAs; e (b) para diferentes temperaturas e tempos de prensagem a quente.....                                                                                         | 60 |
| <b>Figura 25</b> | Propriedades físicas e mecânicas dos painéis alternativos produzidos com adesivo em pó de lignina kraft e resina epóxi-poliéster.....                                                                                                                    | 61 |
| <b>Figura 26</b> | Classificação em sete grupos da biomassa não lenhosa utilizada na produção de painéis de partícula alternativos.....                                                                                                                                     | 63 |
| <b>Figura 27</b> | Flocos de PET em contato com o tratamento de plasma.....                                                                                                                                                                                                 | 64 |
| <b>Figura 28</b> | Ganho nas propriedades físicas de absorção de água (%) e teor de umidade (%) e nas propriedades mecânicas de MOR (N/mm <sup>2</sup> ) e MOE (N/mm <sup>2</sup> ) dos painéis de partícula com substituição parcial de partículas de madeira por PET..... | 65 |
| <b>Figura 29</b> | PET triturado proveniente de resíduos de garrafa plásticas.....                                                                                                                                                                                          | 66 |

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 30</b> | Resultados das propriedades físicas de absorção de água (%) e inchamento em espessura (%) e das propriedades mecânicas de MOR (kgf/cm <sup>2</sup> ) e MOE (kgf/cm <sup>2</sup> ) dos painéis de partícula com substituição parcial de madeira por resíduos de garrafas PET..... | 67 |
| <b>Figura 31</b> | PET triturado proveniente de resíduos de garrafa plásticas.....                                                                                                                                                                                                                  | 68 |
| <b>Figura 32</b> | Resultados das propriedades físicas de absorção de água (%) e inchamento em espessura (%) e das propriedades mecânicas de MOR (kgf/cm <sup>2</sup> ) e MOE (kgf/cm <sup>2</sup> ) dos painéis de partícula com substituição parcial de madeira por resíduos de garrafas PET..... | 69 |
| <b>Figura 33</b> | Classificação em sete grupos da biomassa não lenhosa utilizada na produção de painéis de partícula alternativos.....                                                                                                                                                             | 70 |
| <b>Figura 34</b> | Amostras de resina de breu colofônia após submissão a ensaio de envelhecimento em estufa por períodos de 4, 8 e 24 horas....                                                                                                                                                     | 72 |
| <b>Figura 35</b> | Partículas de PETr: (a) antes do beneficiamento, e (b) depois do beneficiamento.....                                                                                                                                                                                             | 74 |
| <b>Figura 36</b> | Breu Calofônia: (a) antes do beneficiamento, e (b) depois do beneficiamento.....                                                                                                                                                                                                 | 75 |
| <b>Figura 37</b> | Processo de maceração do Breu Colofônia em almofariz de porcelana.....                                                                                                                                                                                                           | 75 |
| <b>Figura 38</b> | Madeira de pinus: (a) cavacos, e (b) partículas.....                                                                                                                                                                                                                             | 76 |
| <b>Figura 39</b> | Conjunto de peneiras e agitador.....                                                                                                                                                                                                                                             | 77 |
| <b>Figura 40</b> | Curvas granulométricas das partículas de PETr, breu colofônia e pinus.....                                                                                                                                                                                                       | 78 |
| <b>Figura 41</b> | TG e DTG das partículas de breu colofônia (BREU).....                                                                                                                                                                                                                            | 80 |
| <b>Figura 42</b> | TG e DTG das partículas de PETr.....                                                                                                                                                                                                                                             | 80 |
| <b>Figura 43</b> | Processo de redução do teor de umidade das partículas de madeira: (a) estufa, e (b) balança determinadora de umidade.....                                                                                                                                                        | 81 |
| <b>Figura 44</b> | Preparação das composições propostas: (a) representação da pesagem dos materiais, e (b) homogeneização prévia da composição C1 <sup>10</sup> .....                                                                                                                               | 82 |

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 45</b> | Preparação do colchão de partículas: (a) formadora de colchão, (b) deposição do particulado e retificação superficial, e (c) adição da tampa do conjunto.....                                                                                               | 83  |
| <b>Figura 46</b> | Aferição da temperatura das faces da prensa hidráulica com equipamento externo.....                                                                                                                                                                         | 83  |
| <b>Figura 47</b> | Produção do painel de partículas: (a) conjunto disposto em prensa hidráulica, (b) remoção do fundo falso, (c) remoção da forma lateral, (d) remoção da tampa, (e) adição do filme plástico de poliéster superior, e (f) painel após ciclo de prensagem..... | 84  |
| <b>Figura 48</b> | Esquema do ciclo de prensagem empregado na produção dos painéis alternativos.....                                                                                                                                                                           | 85  |
| <b>Figura 49</b> | Remoção do filme plástico e cura dos painéis de partículas.....                                                                                                                                                                                             | 85  |
| <b>Figura 50</b> | Ambiente com controle de temperatura e umidade.....                                                                                                                                                                                                         | 86  |
| <b>Figura 51</b> | Exemplo de corpo de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm da pertencente à composição C1 <sup>30</sup> .....                                                                                                                                                 | 87  |
| <b>Figura 52</b> | Malha metálica para garantir a submersão dos CP's ensaiados em água deionizada.....                                                                                                                                                                         | 91  |
| <b>Figura 53</b> | Esquadro empregado para manutenção da inclinação de 60° ± 5°: (a) esquema normativo ABNT (2024), e (b) aparelhagem empregada no ensaio.....                                                                                                                 | 93  |
| <b>Figura 54</b> | Ensaio de flexão estática com dois apoios e aplicação de carga no centro de um corpo de prova da composição C3 <sup>20</sup> .....                                                                                                                          | 94  |
| <b>Figura 55</b> | Ensaio de flexão estática de um CP da composição C1 <sup>20</sup> .....                                                                                                                                                                                     | 96  |
| <b>Figura 56</b> | Corpo de prova posicionado na máquina universal de ensaios: (a) antes da ruptura, e (b) após a ruptura.....                                                                                                                                                 | 98  |
| <b>Figura 57</b> | Amostras empregadas nas análises de microscopia.....                                                                                                                                                                                                        | 99  |
| <b>Figura 58</b> | Malha delineada pelas densidades médias das composições estudadas.....                                                                                                                                                                                      | 102 |
| <b>Figura 59</b> | Malha delineada pelos teores de umidade médios das composições estudadas.....                                                                                                                                                                               | 105 |
| <b>Figura 60</b> | Malha delineada pelos resultados de inchamento em espessura após 24 horas das composições estudadas.....                                                                                                                                                    | 107 |

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 61</b> | Corpo de prova nº9 da composição C5 <sup>10</sup> após 24 horas de imersão em água deionizada.....                                                                                                                                                      | 108 |
| <b>Figura 62</b> | Malha delineada pelos resultados de absorção de água após 24 horas das composições estudadas.....                                                                                                                                                       | 110 |
| <b>Figura 63</b> | Escorrimento do tolueno de grau analítico em ensaio de absorção superficial para diferentes composições: (a) C1 <sup>10</sup> , (b) C2 <sup>10</sup> , (c) C3 <sup>20</sup> , e (d) C5 <sup>30</sup> .....                                              | 111 |
| <b>Figura 64</b> | Malha delineada pelos resultados de absorção superficial das composições estudadas.....                                                                                                                                                                 | 112 |
| <b>Figura 65</b> | Malha delineada pelos módulos de resistência à flexão estática médios das composições estudada.....                                                                                                                                                     | 115 |
| <b>Figura 66</b> | Malha delineada pelos módulos de elasticidade médios das composições estudadas.....                                                                                                                                                                     | 117 |
| <b>Figura 67</b> | Malha delineada pelos resultados de resistência à tração perpendicular médios das composições estudadas.....                                                                                                                                            | 119 |
| <b>Figura 68</b> | Imagem de microscópio óptico de corpos de prova das composições estudadas: (a) C1 <sup>10</sup> , (b) C1 <sup>20</sup> , (c) C1 <sup>30</sup> , (d) C2 <sup>10</sup> , (e) C2 <sup>20</sup> , (f) C2 <sup>30</sup> , [...] e (o) C5 <sup>30</sup> ..... | 120 |
| <b>Figura 69</b> | Painéis de partículas exploratórios produzidos contendo 0% de PETr e 100% de breu colofônia como adesivo alternativo: (a) teor de 40% de adesivo, e (b) teor de 50% de adesivo.....                                                                     | 121 |
| <b>Figura 70</b> | MEV de amostras dos painéis de partícula produzidos com teor de 30% de adesivo alternativo: (a) C2 <sup>30</sup> ; (b) C3 <sup>30</sup> ; e (c) C4 <sup>30</sup> .....                                                                                  | 122 |
| <b>Figura 71</b> | MEV de amostras dos painéis de partícula produzidos com teor de 30% de adesivo de breu (C5 <sup>30</sup> ): (a) deposição de breu na superfície; e (b) fraturas.....                                                                                    | 124 |
| <b>Figura 72</b> | Superfície de painéis de partículas pertencentes às respectivas composições: (a) C1 <sup>10</sup> ; e (b) C5 <sup>30</sup> .....                                                                                                                        | 125 |
| <b>Figura 73</b> | MEV de amostras dos painéis de partícula produzidos com teor de 10% de adesivo de PETr (C1 <sup>10</sup> ): (a) superfície irregular; e (b) fraturas.....                                                                                               | 125 |
| <b>Figura 74</b> | Resutados das propriedades físicas dos painéis.....                                                                                                                                                                                                     | 126 |

|                  |                                                                                       |     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 75</b> | Resutados das proprieadades mecânicas dos painéis.....                                | 127 |
| <b>Figura 76</b> | Gráficos de interação entre fatores (%Res × %PETr) das<br>propriedades físicas.....   | 129 |
| <b>Figura 77</b> | Gráficos de interação entre fatores (%Res × %PETr) das<br>propriedades mecânicas..... | 130 |
| <b>Figura 78</b> | Gráficos de superfície das propriedades físicas.....                                  | 132 |
| <b>Figura 79</b> | Gráficos de superfície das propriedades mecânicas.....                                | 132 |

## LISTA DE TABELAS

|                  |                                                                                                                                            |     |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 1</b>  | Exemplos de produtos pertencentes a cada grupo.....                                                                                        | 35  |
| <b>Tabela 2</b>  | Composições propostas para a produção de painéis aglomerados alternativos.....                                                             | 73  |
| <b>Tabela 3</b>  | Conjunto de peneiras empregadas no ensaio para determinação da composição granulométrica do particulado.....                               | 77  |
| <b>Tabela 4</b>  | Massa específica do pinus, PETr e breu colofônia.....                                                                                      | 79  |
| <b>Tabela 5</b>  | Massa específica das composições propostas.....                                                                                            | 79  |
| <b>Tabela 6</b>  | Intervalos preconizados pelos documentos normativos de densidade média de painéis de partícula.....                                        | 89  |
| <b>Tabela 7</b>  | Intervalos preconizados pelos documentos normativos de teores de umidade de painéis de partícula.....                                      | 90  |
| <b>Tabela 8</b>  | Inchamento em espessura após 24 horas máximo por finalidade de uso.....                                                                    | 92  |
| <b>Tabela 9</b>  | Módulo de resistência à flexão estática mínimo por finalidade de uso.....                                                                  | 95  |
| <b>Tabela 10</b> | Módulo de elasticidade mínimo por finalidade de uso.....                                                                                   | 97  |
| <b>Tabela 11</b> | Resistência à tração perpendicular mínima por finalidade de uso.....                                                                       | 99  |
| <b>Tabela 12</b> | Valores médios de densidade, respectivos coeficientes de variação e máxima variação percentual da densidade das composições estudadas..... | 101 |
| <b>Tabela 13</b> | Valores da razão de compactação das composições estudadas.....                                                                             | 102 |
| <b>Tabela 14</b> | Valores da razão de compactação das composições estudadas considerando apenas a densidade da madeira de pinus.....                         | 103 |
| <b>Tabela 15</b> | Valores médios de teor de umidade e respectivos coeficientes de variação das composições estudadas.....                                    | 104 |

|                  |                                                                                                                               |     |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 16</b> | Valores médios de inchamento em espessura após 24 horas e respectivos coeficientes de variação das composições estudadas..... | 106 |
| <b>Tabela 17</b> | Valores médios de absorção de água após 24 horas e respectivos coeficientes de variação das composições estudadas.....        | 109 |
| <b>Tabela 18</b> | Valores médios de absorção superficial das composições estudadas.....                                                         | 111 |
| <b>Tabela 19</b> | Valores médios de resistência à flexão estática e sua classificação normativa.....                                            | 114 |
| <b>Tabela 20</b> | Valores médios de módulo de elasticidade e sua classificação normativa.....                                                   | 116 |
| <b>Tabela 21</b> | Valores médios de resistência à tração perpendicular e sua classificação normativa.....                                       | 118 |
| <b>Tabela 22</b> | Resultados do teste de contraste de médias de Tukey.....                                                                      | 126 |
| <b>Tabela 23</b> | Modelos e valores extremos.....                                                                                               | 130 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|      |                                                                |
|------|----------------------------------------------------------------|
| AA   | Absorção de Água após 24 horas                                 |
| AP   | Resistência ao Arrancamento de Parafuso                        |
| APS  | Arranque de Parafuso na Superfície                             |
| APT  | Arranque de Parafuso no Topo                                   |
| AS   | Absorção Superficial de Água                                   |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas                       |
| ANSI | <i>American National Standards Institute</i>                   |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i>              |
| CP   | Corpo de Prova                                                 |
| D    | Densidade – <i>Density</i>                                     |
| D    | <i>Manufactured home decking</i>                               |
| DMT  | Tereftalato de dimetila                                        |
| E    | Espessura                                                      |
| EG   | Etilenoglicol                                                  |
| EMIC | Equipamentos e Sistemas de Ensaios Ltda.                       |
| EN   | <i>European Norm</i>                                           |
| FAO  | <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> |
| FEIS | Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira                       |
| FF   | Fenol Formaldeído                                              |
| H    | <i>High density</i>                                            |
| HPL  | <i>High Pressure Laminate</i>                                  |
| I    | Inchamento em Espessura após 24 horas                          |
| IB   | Internal Bond                                                  |
| IBÁ  | Indústria Brasileiro da Árvore                                 |
| ISO  | <i>International Standards Organization</i>                    |
| LD   | <i>Low Density</i>                                             |
| M    | <i>Medium Density</i>                                          |
| MC   | <i>Moisture Content</i>                                        |
| MDF  | <i>Medium Density Fibreboard</i>                               |
| MDP  | <i>Medium Density Particleboard</i>                            |
| MEV  | Microscopia Eletrônica de Varredura                            |
| MO   | Microscopia Óptica                                             |

|                |                                                                                |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| MOE            | Módulo de Elasticidade – <i>Modulus of Elasticity</i>                          |
| MOR            | Módulo de Resistência à Flexão Estática – <i>Modulus of Rupture</i>            |
| N <sub>2</sub> | Nitrogênio                                                                     |
| NBR            | Norma Brasileira                                                               |
| NEPAE          | Núcleo de Ensino e Pesquisa em Alvenaria Estrutural                            |
| NM             | Norma Mercosul                                                                 |
| OM             | <i>Optical Microscopy</i>                                                      |
| OSB            | <i>Oriented Strand Board</i>                                                   |
| PBU            | <i>Underlayment</i>                                                            |
| PE             | Polietileno                                                                    |
| PET            | Polietileno Tereftalato – <i>Polyethylene Terephthalate</i>                    |
| PETr           | Polietileno Tereftalato Reciclado – <i>Recicled Polyethylene Terephthalate</i> |
| PF             | <i>Phenol Formaldehyde</i> ou <i>Phenolic Formaldehyde</i>                     |
| PP             | Polipropileno                                                                  |
| PSA            | <i>Pressure-Sensitive Adhesives</i>                                            |
| SA             | <i>Surface Absorption</i>                                                      |
| SEM            | <i>Scanning Electron Microscopy</i>                                            |
| SH             | <i>Screw-holding</i>                                                           |
| SNIF           | Sistema Nacional de Informações Florestais                                     |
| TP             | Resistência à Tração Perpendicular                                             |
| TPA            | Ácido Tereftalático                                                            |
| TS             | <i>Thickness Swelling</i>                                                      |
| U              | Teor de Umidade                                                                |
| UF             | Ureia Formaldeído – <i>Urea Formaldehyde</i>                                   |
| UNESP          | Universidade Estadual Paulista                                                 |
| USP            | Universidade de São Paulo                                                      |
| WA             | <i>Water Absorption</i>                                                        |
| WPC            | <i>Wood Plastic Composite</i>                                                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|             |                                                                              |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $B$         | Largura do corpo de prova (mm);                                              |
| $CV$        | Coeficiente de variação (%);                                                 |
| $D$         | Densidade (g/cm <sup>3</sup> );                                              |
| $D_{cp}$    | Densidade do corpo de prova (g/cm <sup>3</sup> );                            |
| $D_p$       | Densidade nominal do painel (g/cm <sup>3</sup> );                            |
| $D_a$       | Distância entre os apoios do aparelho (mm);                                  |
| $D\%$       | Variação percentual da densidade;                                            |
| $D_{média}$ | Densidade média das composições (g/cm <sup>3</sup> );                        |
| $E$         | Espessura do corpo de prova (mm);                                            |
| $E_0$       | Espessura do corpo de prova antes da imersão (mm);                           |
| $E_1$       | Espessura do corpo de prova após o período de 24 horas de imersão (mm);      |
| $I$         | Inchamento em espessura do corpo de prova (%);                               |
| $M_p$       | Massa de partículas (g);                                                     |
| $M_{cp}$    | Massa do corpo de prova (g);                                                 |
| $M_1$       | Massa do conjunto (picnômetro + álcool absoluto + partículas submersas) (g); |
| $M_2$       | Massa do conjunto (picnômetro + álcool absoluto) (g);                        |
| $M_{An}$    | Massa de água necessária para atingir o teor de umidade desejado (g);        |
| $MOE$       | Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> );                                 |
| $MOR$       | Módulo de resistência à flexão estática (N/mm <sup>2</sup> );                |
| $MP_i$      | Massa das partículas no teor de umidade inicial (g);                         |
| $M_s$       | Massa seca das partículas (g);                                               |
| $M_u$       | Massa úmida das partículas (g);                                              |
| $P$         | Carga de ruptura (N);                                                        |
| $P_1$       | Carga no limite proporcional, lida no indicador de cargas (N);               |
| $S$         | Área da superfície do corpo de prova (mm <sup>2</sup> );                     |
| $TP$        | Resistência à tração perpendicular (N/mm <sup>2</sup> );                     |
| $U$         | Teor de umidade das partículas (%);                                          |
| $U_d$       | Teor de umidade desejado das partículas (%);                                 |

|             |                                                           |
|-------------|-----------------------------------------------------------|
| $U_i$       | Teor de umidade inicial das partículas (%);               |
| $V_{cp}$    | Volume do corpo de prova (mm <sup>3</sup> );              |
| $V_p$       | Volume final do painel (cm <sup>3</sup> );                |
| $b_1 e b_2$ | Dimensões das arestas dos corpos de prova (mm);           |
| $d$         | Deflexão correspondente à carga P1 (mm);                  |
| $e$         | Espessura do corpo de prova (mm);                         |
| $\rho_s$    | Massa específica das partículas (g/cm <sup>3</sup> );     |
| $\rho_w$    | Massa específica do álcool absoluto (g/cm <sup>3</sup> ); |
| $\pm$       | Mais ou menos;                                            |
| %           | Percentual;                                               |
| °C          | Graus Célsius;                                            |
| "           | Polegadas.                                                |

## SUMÁRIO

|              |                                                          |           |
|--------------|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                   | <b>27</b> |
| 1.1          | CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....                              | 27        |
| 1.2          | OBJETIVOS.....                                           | 30        |
| <b>1.2.1</b> | <b>Objetivo geral.....</b>                               | <b>30</b> |
| <b>1.2.2</b> | <b>Objetivos específicos.....</b>                        | <b>30</b> |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                        | <b>31</b> |
| 2.1          | PAINEL DE PARTÍCULAS – <i>PARTICLEBOARDS</i> .....       | 31        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Definição.....</b>                                    | <b>31</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Classificação por finalidade de uso.....</b>          | <b>33</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Desempenho econômico e industrial.....</b>            | <b>34</b> |
| <b>2.1.4</b> | <b>Características gerais.....</b>                       | <b>38</b> |
| 2.2          | FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES DOS PAINEIS..... | 39        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Geometria das partículas.....</b>                     | <b>39</b> |
| <b>2.2.2</b> | <b>Densidade das partículas.....</b>                     | <b>40</b> |
| 2.3          | PARTÍCULAS.....                                          | 41        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Pinus.....</b>                                        | <b>41</b> |
| 2.4          | ADESIVO.....                                             | 43        |
| <b>2.4.1</b> | <b>Adesivos convencionais.....</b>                       | <b>43</b> |
| 2.4.1.1      | Fenol-Formaldeído (FF).....                              | 44        |
| 2.4.1.2      | Ureia-formaldeído (UF).....                              | 45        |
| <b>2.4.2</b> | <b>Adesivos alternativos.....</b>                        | <b>45</b> |
| 2.4.2.1      | PETr.....                                                | 46        |
| 2.4.2.2      | Breu Colofônia.....                                      | 50        |
| <b>2.4.3</b> | <b>Teores e proporções de adesivo.....</b>               | <b>56</b> |
| 2.5          | PAINÉIS DE PARTÍCULAS ALTERNATIVOS.....                  | 56        |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                          | <b>73</b> |
| 3.1          | COMPOSIÇÕES PROPOSTAS.....                               | 73        |
| 3.2          | MATERIAIS.....                                           | 74        |
| 3.3          | CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....                        | 76        |
| <b>3.3.1</b> | <b>Composição granulométrica.....</b>                    | <b>76</b> |
| <b>3.3.2</b> | <b>Massa específica das partículas.....</b>              | <b>78</b> |

|              |                                                           |            |
|--------------|-----------------------------------------------------------|------------|
| <b>3.3.3</b> | <b>Análise termogravimétrica (TG/DTG).....</b>            | <b>80</b>  |
| <b>3.4</b>   | <b>PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE PARTÍCULA.....</b>             | <b>81</b>  |
| <b>3.4.1</b> | <b>Preparo das composições estudadas.....</b>             | <b>81</b>  |
| <b>3.4.2</b> | <b>Preparo do colchão de partícula.....</b>               | <b>82</b>  |
| <b>3.4.3</b> | <b>Prensagem do colchão de partículas.....</b>            | <b>83</b>  |
| <b>3.4.4</b> | <b>Preparo do corpos de prova (CP).....</b>               | <b>86</b>  |
| <b>3.5</b>   | <b>ENSAIOS FÍSICOS.....</b>                               | <b>87</b>  |
| <b>3.5.1</b> | <b>Densidade (D).....</b>                                 | <b>87</b>  |
| <b>3.5.2</b> | <b>Teor de umidade (U).....</b>                           | <b>89</b>  |
| <b>3.5.3</b> | <b>Inchamento em espessura após 24h (I).....</b>          | <b>90</b>  |
| <b>3.5.4</b> | <b>Absorção de água após 24h (AA).....</b>                | <b>92</b>  |
| <b>3.5.5</b> | <b>Absorção superficial (AS).....</b>                     | <b>93</b>  |
| <b>3.6</b>   | <b>ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>                             | <b>94</b>  |
| <b>3.6.1</b> | <b>Módulo de resistência à flexão estática (MOR).....</b> | <b>94</b>  |
| <b>3.6.2</b> | <b>Módulo de elasticidade (MOE).....</b>                  | <b>96</b>  |
| <b>3.6.3</b> | <b>Resistência à tração perpendicular (TP).....</b>       | <b>97</b>  |
| <b>3.7</b>   | <b>ANÁLISES MICROSCÓPICAS.....</b>                        | <b>99</b>  |
| <b>3.7.1</b> | <b>Microscopia Optica (MO).....</b>                       | <b>99</b>  |
| <b>3.7.2</b> | <b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</b>     | <b>100</b> |
| <b>3.8</b>   | <b>AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS.....</b>                       | <b>100</b> |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                       | <b>100</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>ENSAIOS FÍSICOS.....</b>                               | <b>100</b> |
| <b>4.1.1</b> | <b>Densidade (D).....</b>                                 | <b>100</b> |
| <b>4.1.2</b> | <b>Teor de umidade (U).....</b>                           | <b>104</b> |
| <b>4.1.3</b> | <b>Inchamento em espessura após 24h (I).....</b>          | <b>105</b> |
| <b>4.1.4</b> | <b>Absorção (AA).....</b>                                 | <b>108</b> |
| <b>4.1.5</b> | <b>Absorção superficial (AS).....</b>                     | <b>110</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>                             | <b>113</b> |
| <b>4.2.1</b> | <b>Módulo de resistência à flexão estática (MOR).....</b> | <b>113</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Módulo de elasticidade (MOE).....</b>                  | <b>115</b> |
| <b>4.2.3</b> | <b>Resistência à tração perpendicular (TP).....</b>       | <b>117</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>ANÁLISES MICROSCÓPICAS.....</b>                        | <b>119</b> |
| <b>4.3.1</b> | <b>Microscopia Óptica (MO).....</b>                       | <b>119</b> |

|              |                                                       |            |
|--------------|-------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.3.2</b> | <b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</b> | <b>122</b> |
| <b>4.4</b>   | <b>AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS.....</b>                   | <b>125</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                 | <b>132</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                               | <b>133</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A madeira destaca-se como um dos insumos mais importantes na construção civil e indústria moveleira. Projetos que utilizam madeira podem ter um menor impacto ambiental, contribuindo para a redução de emissões e da pegada de carbono - *footprint* (WETHTHASINGHE, 2022; LAO, 2024).

O uso de partículas de madeira na produção de produtos derivados já se consolidou como uma alternativa viável à madeira maciça devido à sua versatilidade de formato, eliminação de efeitos da anisotropia da madeira, maior estabilidade dimensional, eliminação de fatores redutores de resistência como nós, inclinação de grã e idade do lenho, consistência e controle do padrão de qualidade, acabamento superior, redução do desperdício e menor exigência em termos de matéria-prima como diâmetro, idade, defeitos e formato do fuste (IWAKIRI, 2020).

O processo produtivo dos painéis reconstituídos – produtos derivados – envolve a aglomeração de pequenos fragmentos de madeira, como cavacos, aparas, maravalhas, virutas e flocos, utilizando um ligante de origem mineral ou resina sintética para a fabricação de chapas, conhecido como madeira aglomerada ou painéis aglomerados (BAUER, 2019).

O adesivo é o componente de maior custo na produção de painéis aglomerados, os adesivos químicos ainda correspondem a cerca de 30% a 50% do custo total de fabricação de painéis de partículas (LEE, 2022). Os principais tipos de adesivos empregados na produção de painéis são a base de formaldeído, como ureia-formaldeído e fenol-formaldeído (IWAKIRI, 2020).

Entretanto, o uso desses adesivos na produção de painéis reconstituídos de madeira pode trazer inúmeros malefícios, especialmente relacionados à saúde humana e ao meio ambiente devido a alta emissão de formaldeído que pode causar irritação nos olhos, nariz, garganta, além de problemas respiratórios, relatados pela primeira vez em meados da década de 1960 (SALTHAMMER, 2010).

Ademais, algumas pessoas podem desenvolver sensibilidades ou alergias a esses compostos, levando a reações adversas quando expostas a ambientes fechados onde esses materiais são utilizados, contudo, o maior risco à saúde está relacionado à sua toxicidade. O formaldeído é classificado como um carcinógeno

humano, uma vez que a exposição prolongada pode aumentar o risco de câncer (SALTHAMMER, 2010).

Além disso, a produção e o descarte inadequado de produtos que contêm esses compostos podem contaminar o solo e a água, afetando diretamente a fauna e flora locais e na saúde pública.

Por essas razões, é importante investigar alternativas mais seguras e sustentáveis na produção de painéis aglomerados de madeira, visando reduzir os riscos à saúde e ao meio ambiente (LI, 2017). A poluição por formaldeído e a escassez de materiais são dois problemas importantes na produção de painéis de partícula (XU, 2024).

Neste contexto, a busca por adesivos alternativos – *non-formaldehyd adhesives* – aos de base formaldeído, torna-se essencial. O uso de adesivos alternativos de origem reciclada ou de origem natural não apenas contribuem para a mitigação de riscos à integridade humana e ambiental, mas também proporcionam uma sobrevida a materiais que, de outra forma, seriam descartados, convertendo-os em recursos com aplicações mais nobres reduzindo custos de produção e cumprindo metas de desenvolvimento social (ZHANG, 2024; FARIA, 2024; XIE, 2025).

O polietileno tereftalato – PET é um exemplo de material largamente utilizado no mundo nos mais diversos setores. A estimativa para o ano de 2025 é de uma produção global de 600 milhões de toneladas de plástico, sendo que cerca de 40% dos produtos plásticos viram lixo em menos de um mês. Sem reciclagem, o Brasil descarta 4 bilhões e 700 milhões de garrafas PET de forma indevida na natureza por ano. (ATLAS, 2020).

O descarte irregular de lixo plástico é um grande desafio ambiental visto que por muitas vezes acaba em aterros sanitários ou no oceano, causando sérios danos à vida marinha ao ecossistema e à saúde humana (FAO, 2021; JOSEPH, 2024). O acúmulo crescente de resíduos de polietileno tereftalato apresenta um desafio ambiental crítico que, apesar dos esforços significativos, enfrenta inúmeras limitações nos métodos tradicionais de reciclagem, levando à exploração de novas abordagens de reciclagem (UMDAGAS, 2025).

O emprego de PET na produção de painéis de partículas tem se mostrado viável, especialmente quando associado a outros adesivos (CAZELLA, 2024; CAMPOS, 2023). O breu colofônia é um adesivo natural proveniente de uma mistura

de ácidos resínicos, oriundo da árvore de pinus. Os ácidos resínicos apresentam boa compatibilidade com polímeros promovendo a adesão entre diferentes componentes. A utilização do breu se deu inicialmente na produção de papel, borrachas sintéticas, tintas, adesivos, goma de mascar e sabão (IPEF, 1978), atualmente é essencialmente destinado à produção de adesivos e colas em geral (FLORPINUS, 2021). O hidrofenantreno hidrofóbico volumoso e a rigidez característica da colofônia difundiram sua utilização nas áreas de agentes de colagem de papel, ligantes, resina aderente em adesivos sensíveis à pressão – *resin in pressure-sensitive adhesives (PSA)* – e revestimentos superficiais (WANG, 2018; NAKANISHI, 2019).

Este trabalho teve como objetivo principal estudar o emprego de polietileno tereftalato reciclado (PETr) e breu colofônia como adesivos alternativos para produção de painéis de partículas de madeira de pinus. Esta é a primeira vez que polietileno e breu foram associados e empregados como adesivos para painéis de partículas, com base na literatura científica internacional.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho propôs produzir ABNT 14810-1 (2013), ABNT 14810-2 (2024) e avaliar as propriedades físico-mecânicas de painéis homogêneos de partículas com base nos documentos normativos ANSI A208.1 (2022), EN 312 (2010) e CS 236-66 (1966) para produção de painéis do tipo MDP (*Medium Density Particleboard*) empregando adesivos alternativos de polietileno tereftalato reciclado (PETr) e breu colofônia em diferentes teores e proporções associados à partículas de madeira de pínus (*Pinus sp.*).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

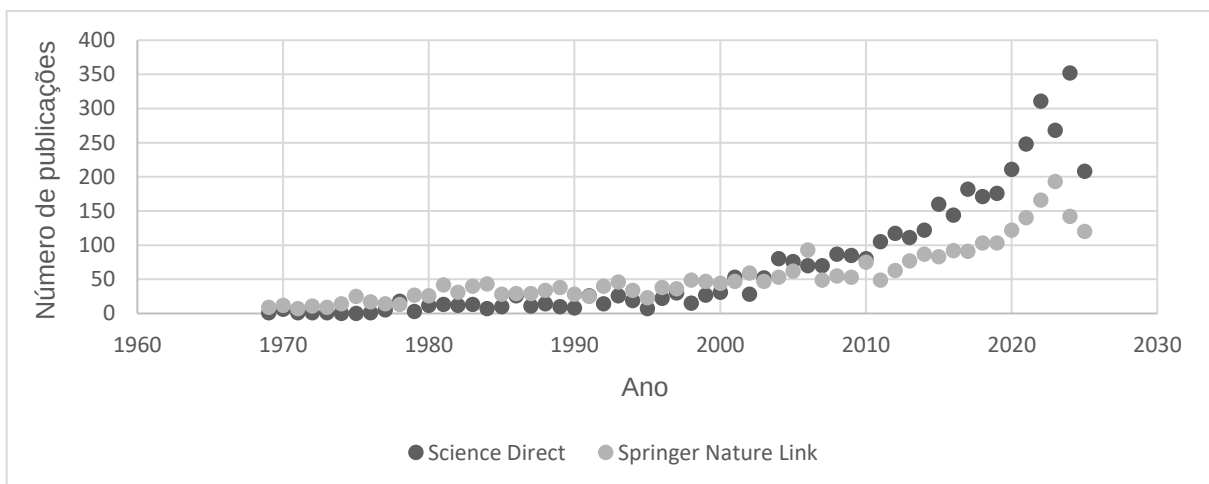
- Produzir painéis de partículas homogêneos de madeira de *Pinus sp.* com teores de 10%, 20% e 30% de adesivo alternativo de polietileno tereftalato e breu colofônia em relação à massa seca de madeira, associados nas seguintes proporções (PETr / breu): 100% e 0%; 75% e 25%; 50% e 50%; 25% e 75%; 0% e 100%.
- Classificar os painéis quanto ao uso, por meio de seu comportamento físico-mecânico com base na ABNT (2013; 2024), ANSI (2022), EN (2010) e CS (1966) e avaliar a interação microscópica entre as partículas de madeira e os adesivos.
- Avaliar as composições quanto ao teor e proporção de adesivo mais eficiente e a viabilidade do emprego de polietileno tereftalato reciclado e breu colofônia como adesivos alternativos na produção de painéis de partículas de madeira de *Pinus sp.*

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 PAINEL DE PARTÍCULAS – *PARTICLEBOARDS*

Diversas pesquisas científicas vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos sobre painéis de partículas. A Figura 1 apresenta a tendência crescente no número de publicações anuais, ligadas à palavra-chave *particleboard*, obtidas através de levantamento realizado nas bases de dados *Science Direct* e *Springer Nature*. O levantamento de dados se deu no curso do ano de 2025, apresentando, portanto, valores parciais para esta data. O ano base do levantamento foi de 1969.

Figura 1 – Número de publicações anuais relacionadas à palavra chave *particleboard* via bases de dados *Science Direct* e *Springer Nature*



Fonte: Elaboração pelo próprio autor

Nas mesmas bases de dados, quando associadas as palavras chave *particleboard* e *PET* foram encontrados 170 e 59 trabalhos respectivamente para *Science Direct* e *Springer Nature*. Quando associada a palavra *rosin* nenhum trabalho foi encontrado, destacando a originalidade desta pesquisa.

#### 2.1.1 Definição

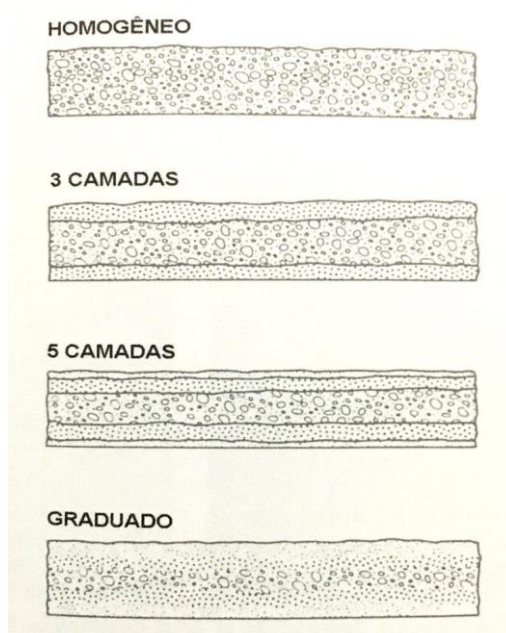
A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2013) define painéis de partículas – *particleboards*, por chapa de madeira aglomerada ou chapa de partículas de madeira com espessura entre 3 mm e 50 mm, aglutinada com resinas naturais ou sintéticas, termofixas, sob ação de pressão e calor.

Este processo de prensagem à quente resulta do confinamento de uma massa de partículas impregnada (encolada) por um determinado adesivo, disposta entre pratos paralelos com suas faces aquecidas, que exercem a força de compressão quando associados à prensa hidráulica.

O Instituto Nacional Americano de Normas – *American National Standard Institute* – ANSI (2022) define *particleboards* como um termo genérico para painel compósito preferencialmente composto por material celulósico, geralmente madeira, aglutinado por um sistema de colagem que pode conter adesivos. Para a Norma Comercial – *Commercial Standard* – CS (1966) painéis de partícula de madeira podem ser classificados em dois tipos, um para aplicações interiores e outro para aplicações exteriores, em geral distintos entre si por diferentes graus de classificação de densidade. Podem ainda ser produzidos de duas formas, homogeneamente ou multicamadas.

Entretanto, para Moslemi (1974) os painéis de partículas podem ser classificados em três grupos: homogêneo, multicamadas e camadas graduadas, apresentando respectivamente: distribuição uniforme das partículas, distribuição por camadas com variação na granulometria das partículas entre elas e por fim distribuição por gradiente granulométrico, com partículas de diâmetro médio menor nas faces e maior no centro (Figura 2).

Figura 2 - Esquema dos grupos de painéis de partícula



Fonte: Iwakiri, 2020

Para a ABNT (2013), uma chapa de madeira aglomerada homogênea é aquela composta por uma única camada de partículas de madeira dispostas em colchão de partículas sem discriminação de níveis granulométricos. Por fim, delimita um intervalo de densidade de 0,551 g/cm<sup>3</sup> à 0,75 g/cm<sup>3</sup> para chapas de madeira aglomerada de média densidade.

### **2.1.2 Classificação por finalidade de uso**

A ABNT (2024) classifica os painéis de partículas em seis diferentes grupos, quanto a seu desempenho frente a testes destrutivos e não destrutivos que avaliam propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Em síntese, os painéis são discriminados quanto à aptidão estrutural e de utilização em condições úmidas. A seguir são descritos todos os grupos normativos (ABNT, 2024).

- P2 – Painéis não estruturais para uso interno em condições secas;
- P3 – Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
- P4 – Painéis estruturais para uso em condições secas;
- P5 – Painéis estruturais para uso em condições úmidas;
- P6 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições secas;
- P7 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas.

De forma análoga, a Norma Europeia – *European Norm* – EN (2010) classifica os painéis de partícula em sete tipos, distinguindo-os da seguinte forma:

- P1 – Painéis de uso geral para uso em condições secas;
- P2 – Painéis para móveis de interior para uso em condições secas;
- P3 – Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
- P4 – Painéis estruturais para uso em condições secas;
- P5 – Painéis estruturais para uso em condições úmidas;
- P6 – Painéis estruturais com elevada carga para uso em condições secas;

- P7 – Painéis estruturais com elevada carga para uso em condições úmidas.

Por sua vez, a ANSI (2022) classifica os painéis quanto a sua densidade, sendo alta, média e baixa e quanto a usos específicos, como pisos e bases para pisos feitos de painéis de partícula.

- H – *High density* – alta densidade (geralmente acima de 0,8 g/cm<sup>3</sup>);
- M – *Medium density* – média densidade (geralmente entre 0,64 e 0,8 g/cm<sup>3</sup>);
- LD – *Low density* – baixa densidade (geralmente abaixo de 0,64 g/cm<sup>3</sup>);
- D – *Manufactured home decking* – decks residenciais pré-fabricados;
- PBU – *Underlayment* – base para pisos.

Além disso, as siglas são acompanhadas de um dígito (1, 2 ou 3) que indica o grau de classificação, sendo o dígito 3 o mais exigente, referente à características especiais de durabilidade.

Por fim, a pioneira CS (1966) classifica os painéis de partícula em dois tipo (Type 1 & Type 2) acompanhados de duas classes (Class 1 & Class 2):

- Tipo 1 – Pinéis (geralmente aglutinados com resina de ureia-formaldeído) adequados para aplicações internas;
- Tipo 2 – Painéis feitos com ligante durável e altamente resistente à umidade e ao calor (geralmente resinas fenólicas), adequado para aplicações internas e certas aplicações externas quando assim rotulado;
- Classe 1 e 2: Classificações de resistência com base nas propriedades dos painéis atualmente produzidos.

### 2.1.3 Desempenho econômico e industrial

De acordo com o Serviço Nacional de Informações Florestais – SNIF (2024) os produtos florestais madeireiros podem ser classificados em três grupos: produtos

de extração, produtos primários de madeira e produtos secundários de madeira e papel. A Tabela 1 apresenta alguns exemplos de produtos que pertencem a cada grupo, com destaque à classificação dos painéis de madeira.

Tabela 1 – Exemplos de produtos pertencentes a cada grupo

| Grupos                                  | Exemplos                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Produtos de extração                    | Toras de madeira ou madeira bruta; utilizadas como lenha, combustível, celulose ou posterior tratamento industrial.                       |
| Produtos primários de madeira           | Carvão vegetal, partículas de madeira, madeira serrada, <b>painéis de madeira</b> , pallets e briquetes, papel e papelão para embalagens. |
| Produtos secundários de madeira e papel | Produtos processados para uso final, ferramentas de madeira, móveis predominantemente de madeira e papel pautado.                         |

Fonte: adaptado de SNIF, 2024 e JFSQ, 2024

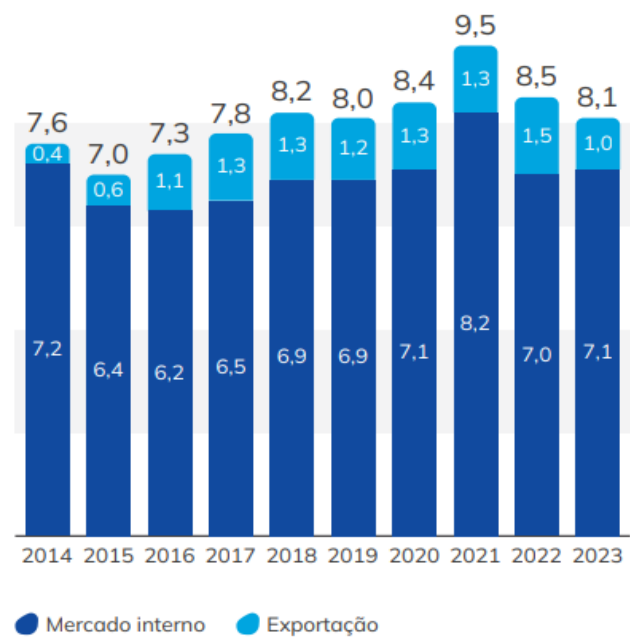
Dados da produção nacional de painéis à base de madeira (painéis de partícula, painéis de fibra e compensados) do ano de 2022 apontam para um volume produzido de cerca de 15,18 milhões de m<sup>3</sup> enquanto a comercialização destes produtos no ano de 2023 resultou em um montante aproximado de 1 bilhão e 48 milhões de dólares com operações de exportação de cerca de 3,62 milhões de m<sup>3</sup> de painéis (SNIF,2024).

No ano de 2023, segundo dados mais recentes da Indústria Brasileira da Árvore – IBÁ, 2024, as vendas domésticas de painéis reconstituídos de madeira cresceram 1,5% quando comparadas ao ano de 2022, atingindo um montante de 7 milhões e 100 mil metros cúbicos. Outro destaque se dá aos pisos laminados que somaram uma produção de 10 milhões e 400 mil m<sup>3</sup> (IBÁ, 2024).

Além disso, cerca de 1 milhão de m<sup>3</sup> de painéis foram exportados, totalizando um montante produzido de 8 milhões e 100 mil m<sup>3</sup>. A América do Norte foi o principal continente de destino das exportações brasileiras (34,5%), seguida de perto pela América do Sul (33,6%) além da América Central (12%) e Europa (12%). Destaque

deve ser dado à China, que sozinha importou cerca de 6,3% da produção nacional. A Figura 3 apresenta o balanço do destino da produção nacional de painéis ao longo dos últimos 10 anos.

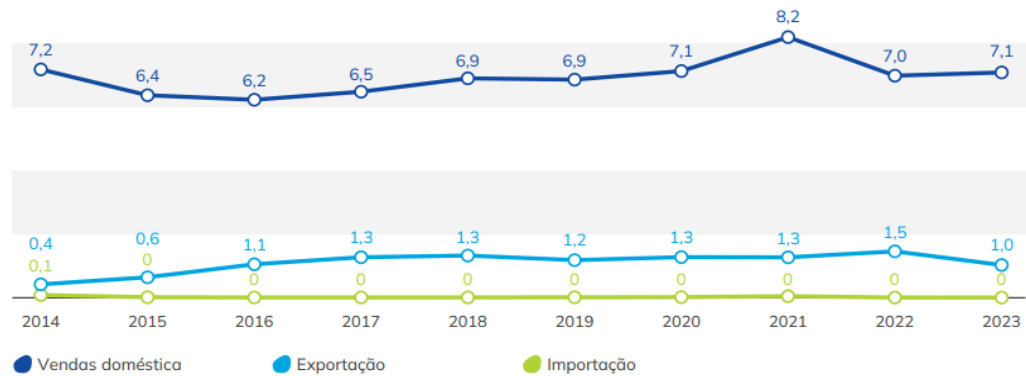
Figura 3 – Balanço entre exposição e absorção do mercado interno da produção brasileira de painéis de partículas



Fonte: IBÁ, 2024

A Figura 4, por sua vez destaca a irrisória taxa de importação de painéis de madeira pelo Brail, em que, desde o ano de 2015 é zerada a importação, indicando que o país pode ser considerado como autossuficiente neste setor.

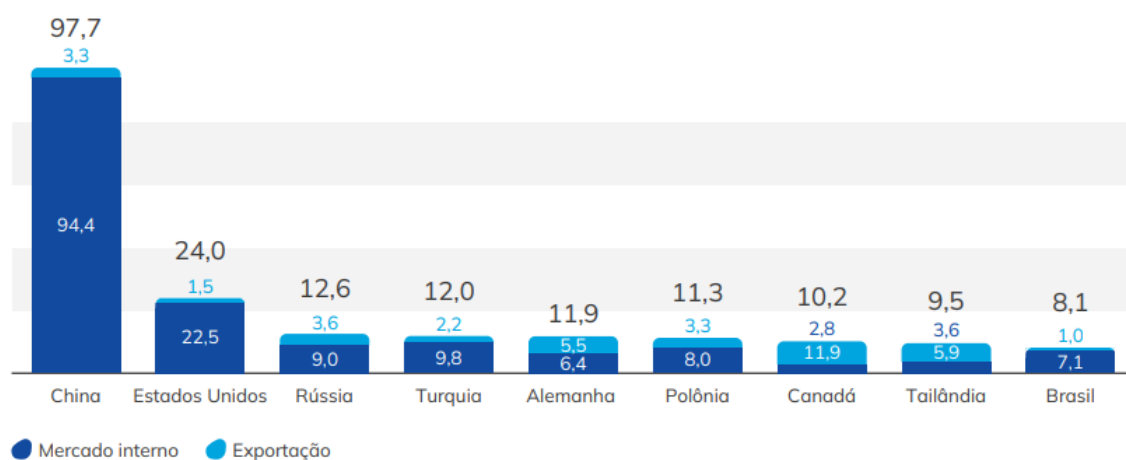
Figura 4 – Taxa de exportação, importação e consumo interno de painéis de madeira no Brasil em milhões de m³ entre 2014 e 2023.



Fonte: IBÁ, 2024

No cenário internacional, a China se destaca como maior produtora de painéis de madeira, com aproximadamente 98 milhões de m<sup>3</sup>, representando uma fatia de 37% da produção mundial. A Figura 5 apresenta dados de produção dos maiores *player* mundiais do setor, deflagrado o percentual consumido pelos próprios mercados internos e o percentual destinado à exportação.

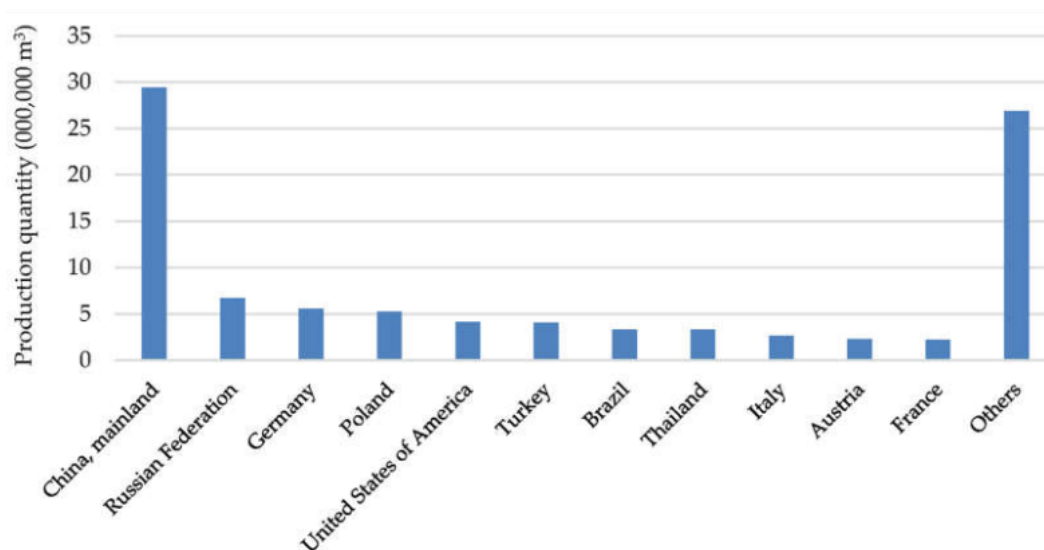
Figura 5 – Principais países produtores de painéis de madeira reconstituída em milhões de m<sup>3</sup>



Fonte: IBÁ, 2024

A Figura 6 a apresenta os valores em m<sup>3</sup> da produção mundial de painéis de partículas – *particleboards* para o ano de 2020, por país.

Figura 6 – Produção mundial de painéis de partículas no mundo em metros cúbicos



Fonte: Lee, 2022

Pode-se observar que de todos os países citados acima, a China detém o menor percentual de exportação em relação à seus pares (cerca de 3,4% dos 97,7 m<sup>3</sup> produzidos), indicando uma demanda interna elevada, especialmente quando comparada ao Brasil que exporta cerca de 12,35% dos 8,1 m<sup>3</sup> produzidos. Esse dado mostra que o consumo do mercado interno brasileiro tem muito a crescer, e que a exportação para países como a China pode ter crescimento significativo nos próximos anos, indicando vasto campo para crescimentos da produção de painéis no Brasil.

#### 2.1.4 Características gerais

Os painéis de partículas podem ser classificados de diferentes maneiras, sendo a densidade um dos principais critérios de diferenciação. De acordo com a norma americana ANSI (2022), esses painéis são divididos em três categorias: baixa densidade (*low-density*), média densidade (*medium-density*) e alta densidade (*high-density*). No primeiro caso, enquadram-se os painéis cuja densidade é inferior a 0,64 g/cm<sup>3</sup>. Já o grupo de média densidade abrange aqueles com valores entre 0,64 g/cm<sup>3</sup> e 0,8 g/cm<sup>3</sup>. Por fim, os painéis classificados como de alta densidade apresentam densidade acima de 0,8 g/cm<sup>3</sup>.

No entanto, de acordo com a ABNT (2013), no Brasil é considerado Paineis de Partículas de Média Densidade — *Medium Density Particleboard* (MDP) — aquele cuja densidade se situa entre 0,551 g/cm<sup>3</sup> e 0,75 g/cm<sup>3</sup>, correspondendo aos valores mínimo e máximo, respectivamente.

Os painéis de partículas apresentam isotropia, característica que proporciona comportamento mecânico uniforme frente a esforços aplicados em diferentes direções — radial, longitudinal e tangencial — o que lhes confere elevada estabilidade dimensional. Essa propriedade os distingue da madeira maciça, que possui comportamento anisotrópico, segundo Pfeil (2003), tornando os painéis mais vantajosos em diversas aplicações. Adicionalmente, a madeira maciça serrada possui restrições geométricas, limitadas pelas dimensões do lenho de origem, além de defeitos naturais, como nós e fissuras longitudinais, que reduzem sua resistência. Tais imperfeições não ocorrem em painéis de partículas, uma vez que o processo de produção controla rigorosamente essas variáveis (PFEIL, 2003; IWAKIRI, 2020).

Além disso, os painéis de partículas apresentam a vantagem de otimizar o uso da matéria-prima, pois permitem o aproveitamento de toras com menor exigência de qualidade, não sendo fator limitante o diâmetro ou a conformação do fuste (IWAKIRI, 2020).

Essa ampla aceitação de diferentes características da madeira inclui o uso de espécies de rápido crescimento e baixa densidade, como a madeira de pinus, que são convertidas em partículas para a produção dos painéis.

Dentre os aspectos positivos dos painéis de partícula frente à madeira maciça, amplamente conhecidos, destacam-se: a eliminação dos efeitos da anisotropia; a estabilidade dimensional; a menor exigência em relação às características da tora, como diâmetro e forma; a supressão de fatores que diminuem a resistência, como nós, inclinação de fibras e idade das toras; e a possibilidade de controlar propriedades físico-mecânicas por meio de ajustes no processo de fabricação, como o tipo de resina utilizada, a forma e o tamanho das partículas, além da densidade final do painel.

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES DOS PAINEIS

Muitos aspectos podem afetar as propriedades físicas e mecânicas finais dos painéis de partículas, como os tipos de adesivo, a geometria das partículas e sua homogeneidade, a densidade das partículas e a razão de compactação dos painéis, podendo ser modificados para produzir produtos adequados aos mais diversos usos e finalidades (ABNT, 2013; IWAKIRI, 2020).

### 2.2.1 Geometria das partículas

As partículas são pequenos fragmentos de material lignocelulósico (ANSI, 2022) em geral, madeira, que constituem os elementos básicos na formação de uma chapa de madeira aglomerada. A geometria dessas partículas refere-se ao seu tamanho e forma, características que influenciam diretamente as propriedades da chapa (ABNT, 2013).

Produtos de madeira reconstituída têm como ponto de partida elementos de madeira maciça, provenientes de diferentes espécies. Sua produção ocorre por meio da trituração de toras, o que gera partículas de natureza heterogênea (FAO, 2020).

Materiais como lascas, serragem, flocos e aparas podem ser quantificados em termos de volume e massa. De um volume de  $1,0 \text{ m}^3$  de madeira maciça, obtêm-se, em média, cerca de  $2,8 \text{ m}^3$  de cavacos ou  $2,87 \text{ m}^3$  de serragem. Esse aumento expressivo de volume ocorre devido ao arranjo das partículas, que, por apresentarem formas irregulares, deixam espaços vazios entre si (FAO, 2020).

A serragem, por sua vez, apresenta ganho volumétrico ainda mais elevado em comparação aos cavacos, resultado de sua área superficial específica maior. Isso se explica pelo fato de as partículas de serragem terem, em geral, diâmetro médio inferior ao das partículas de cavaco. A heterogeneidade das partículas dentro de faixas de distribuição granulométricas favorece na diminuição de vazios e na melhor densificação de um painel de partículas.

### **2.2.2 Densidade das partículas**

A densidade, característica representada pelo quociente da relação entre a massa e o volume de um corpo para determinado teor de umidade (ABNT, 2013), é uma variável de grande relevância para as propriedades dos painéis de partículas. Maloney (1977) destaca que o aumento do peso específico é uma das formas mais eficazes de aprimorar as características de um painel de madeira reconstituída, ressaltando ainda que a densidade da madeira utilizada como matéria-prima exerce impacto direto na densidade final e, conseqüentemente, na qualidade do painel obtido.

Segundo Dias (2005), para que os painéis de partículas alcancem uma boa densificação, recomenda-se utilizar madeiras de baixa densidade, garantindo uma razão de compactação — relação entre a densidade do painel e a densidade da madeira — de no mínimo 1,3. As partículas de madeira podem originar painéis com densidade maior ou menor que a da madeira maciça de origem, sendo incomum que um metro cúbico de madeira sólida corresponda exatamente a um metro cúbico de painel de partículas. Por essa razão, a produção desses painéis costuma ser calculada com base no peso das partículas, e não apenas em seu volume (FAO, 2020).

Assim, quanto mais baixa for a densidade da madeira utilizada como matéria-prima, maior será o volume de partículas necessário para fabricar uma mesma quantidade de painéis. Por exemplo, para produzir painéis com densidade final de

0,76 g/cm<sup>3</sup>, seriam exigidos, em teoria, 2 m<sup>3</sup> de madeira com densidade de 0,38 g/cm<sup>3</sup>, enquanto se usaria apenas 1,65 m<sup>3</sup> se a madeira tivesse densidade de 0,46 g/cm<sup>3</sup> (FAO, 2020).

## 2.3 PARTÍCULAS

Na fabricação de painéis de partículas, os cavacos de madeira são o segundo componente mais oneroso, ficando atrás apenas da resina; juntos, esses insumos representam mais de 50% do custo total de produção (LEE, 2022).

### 2.3.1 Pinus

O panorama do setor florestal brasileiro tem mudado nas últimas décadas, com o aumento das áreas de florestas plantadas e diminuição do desmatamento. A madeira como material de reflorestamento, de origem vegetal e renovável, supre toda a demanda de matéria-prima para produção comercial de painéis de partículas, com destaque para o *Pinus sp* que abrange as espécies de *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*, *Pinus caribaea*, *Pinus oocarpa* e *Pinus tecunumanii*.

O Serviço Floresta Brasileiro – SFB, órgão federal criado pela Lei de Gestão de Florestas Públicas no ano de 2006 considera como florestas as fitofisnomias da vegetação no território nacional com área superior a 0,5 hectares com pelo menos 10% da área coberta pelas copas das árvores que messam pelo menos 5 metros de altura, não sendo consideradas áreas florestais, àquelas com uso predominantemente agrícola ou urbano (SNIF, 2024).

As florestas podem ser subdivididas em dois grupos, nativas ou naturais e plantadas, diferenciando-se principalmente quanto à sua origem, finalidade, estrutura, biodiversidade (SNIF, 2024; IBÁ, 2024). A Figura 7 apresenta a vista aérea de uma área de transição de florestas nativas de Mata Atlântica e plantada de *Pinus sp*.

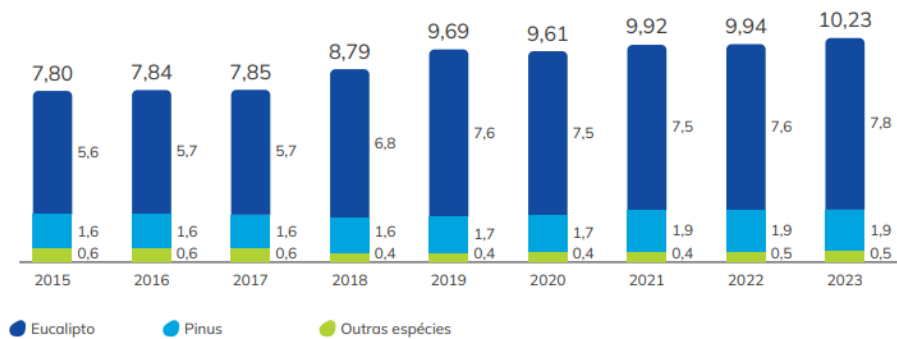
No ano de 2023, pela primeira vez, o Brasil superou a marca de 10 milhões de hectares de florestas plantadas, superando em 3% a área registrada no ano anterior (Figura 8). A maior parte das áreas pertencem à produtores rurais independentes seguidas de empresas de beneficiamento da madeira (IBÁ, 2024).

Figura 7 – Diferenciação de área de floresta nativa e de floresta plantada



Fonte: IBÁ, 2024

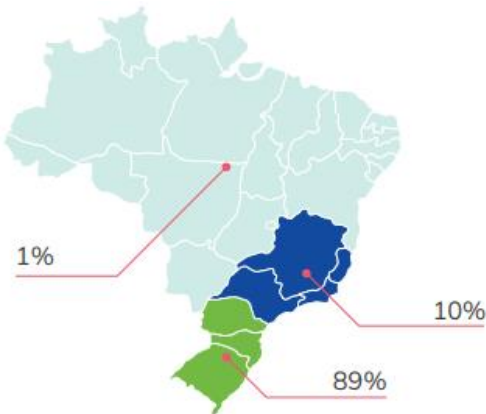
Figura 8 – Distribuição de áreas de florestas plantadas no Brasil por espécies



Fonte: IBÁ, 2024

Os plantios de pinus cobrem cerca de dois milhões de hectares correspondendo a aproximadamente 20% do total do setor. A produtividade de madeira de pinus por hectare no Brasil foi em média de 30,8 m<sup>3</sup> por ano, com idade média de colheita de 14,7 anos. A região sul do Brasil se destaca por apresentar condições climáticas favoráveis para esta cultura, correspondendo a 89% da área total de pinus no país (Figura 9).

Figura 9 – Distribuição das florestas plantadas de pinus no Brasil no ano de 2023



Fonte: IBÁ, 2024

## 2.4 ADESIVO

Com função de aglutinar as partículas de madeira, o adesivo é componente imprescindível para produção de painéis de partículas. A ABNT (2013) define adesivo ou resina como a substância empregada com o intuito de aderir partículas de madeira entre si no processo de fabricação de chapas de madeira aglomerada, podendo ser de origem inorgânica ou orgânica.

A ASTM (2016) apresenta uma definição de ligante – *binder* – como agente inorgânico ou orgânico usado para unir partículas com a finalidade de produzir um painel de partículas.

A classificação de adesivos como inorgânicos ou orgânicos está relacionada à sua composição química. O grupo de adesivos inorgânicos têm geralmente como base silicatos enquanto os orgânicos se subdividem entre sintéticos e naturais, sendo estes os mais empregados pela indústria (SKEIST, 1962; SELBO, 1975).

Dentre os adesivos orgânicos naturais estão os derivados proteicos de origem vegetal, derivados de borracha e do éter celulósico (IWAKIRI, 2020). Os adesivos orgânicos sintéticos se subdividem em termoplásticos (polietileno, polistírol, borracha sintética) e termofixos, sendo estes ativados através de um catalizador ou de temperatura, destacando-se a fenol-formaldeído e ureia-formaldeído.

A maior preocupação no processo produtivo de painéis de madeira é com a emissão de formaldeído – desprendimento do formol não reagido em uma chapa de madeira aglomerada, na forma de gás. O formaldeído é um composto orgânico reativo ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), empregado na fabricação de resinas destinadas à produção dos painéis (ABNT, 2013).

### 2.4.1 Adesivos convencionais

De acordo com a Companhia Ambiental do estado de São Paulo – CETESB, 2022 o formaldeído, também denominado formol, metanal, formalina, oximetileno e aldeído fórmico se apresenta, em temperatura ambiente, como um gás incolor altamente inflamável e com odor característico. Tem sua aplicação na síntese de outros compostos químicos e na produção de resinas como formol e ureia – largamente empregadas como adesivos na produção de produtos derivados de madeira.

Embora atenda aos requisitos mínimos de desempenho na produção de painéis de madeira os adesivos de base formaldeído são nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Os vapores são irritantes ao nariz, à garganta e aos olhos, mesmo em baixas concentrações. Em altas concentrações – acima de 60 mg/m<sup>3</sup> – pode causar dispnéia, espasmos musculares, coma e até levar à morte. Quando inalado em concentrações entre 0,1 e 0,5 partes por milhão foram observados efeitos neurológicos e aumento do risco de asma, enquanto em concentrações entre 0,6 e 1,9 ppm foram observados eczema e alterações pulmonares (CETESB, 2022).

Segundo seu emprego é problemático em países da união europeia cuja regulamentação ambiental é rigorosa.

Chen, 2025 revisaram cerca de 300 artigos científicos publicados entre o ano 2000 e 2025 sobre materiais a base de madeira, revestimentos e isolantes com intuito de avaliar a eficácia das tecnologias empregadas na redução de emissões de formaldeído. Com base na análise dos resultados, os pesquisadores afirmaram que os adesivos naturais de origem vegetal e biológica foram os mais eficazes na redução de formaldeído alcançando uma redução de até 94%.

#### 2.4.1.1 Fenol Formaldeído (FF)

As resinas de fenol-formaldeído – *Phenol Formaldehyde* (PF) são amplamente utilizadas como adesivos nos mais diversos setores, incluindo construção civil, indústria moveleira, automotiva, aeroespacial e militar. Elas são muito comuns na produção de compósitos de madeira, como compensados, MDFs, MDPs, painéis orientados – *oriented strand boards* (OSB) e laminados de alta pressão – *high pressure laminate* (HPL). Esses painéis desempenham papel fundamental na construção civil, revestimentos para pisos e produção de móveis (LUKAWSKI, 2024; RAVINDRAN, 2022).

O Fenol-formaldeído é um adesivo termoendurecível resistente à água, segundo a ABNT, (2013) com vasta aplicação em compensados de coníferas, painéis de partículas orientadas e painéis de partículas para uso interno e externo, com diversas aplicações comerciais.

Segundo Skeist (1962), na década de 1930 adesivos à base de fenol-formaldeído passaram a ser explorados para colar madeira em escala industrial,

intensificando os estudos e aplicações após a Segunda Guerra Mundial, sendo a mais empregada atualmente (IWAKIRI, 2020).

Por apresentarem propriedades distintas e vantagens em relação a compósitos feitos com outros tipos de polímeros, especialmente os termofixos, os materiais reforçados com resina fenol-formaldeído são amplamente empregados em aplicações estruturais que exigem alta capacidade de suportar cargas (RAVINDRAN, 2022).

#### 2.4.1.2 Ureia Formaldeído (UF)

Segundo Pizzi (1983) a ureia-formaldeído (UF) apresenta coloração branca leitosa com pH alcalino entre 7 e 8. O processo de cura do adesivo se dá com a utilização de catalizador com intuito de diminuir o pH para ácido. A cura é o processo de alteração físico-química caracterizada pelo endurecimento das resinas ou adesivos (ABNT, 2013).

Pode ser empregado catalizador na cura a quente, como o cloreto de amônia ( $\text{NH}_4 \text{Cl}$ ) ou sulfato de amônia ( $\text{NH}_4 \text{2SO}_4$ ) (PIZZI, 1983). Na década de 1930 o adesivo de ureia-formaldeído foi utilizado pela primeira vez para produção de mobiliários e compensados de madeira para uso interno.

A resina de ureia-formaldeído continua sendo um dos principais tipos de adesivos empregados na indústria de materiais à base de madeira, destaca-se por sua ampla utilização na fabricação de produtos como MDF, aglomerados e compensados, principalmente devido ao seu baixo custo, facilidade de aplicação e boas propriedades de adesão. Mesmo com o avanço de alternativas mais sustentáveis, a UF ainda mantém sua posição de destaque no setor madeireiro em diversos países (BEKHTA, 2021).

#### 2.4.2 Adesivos alternativos

Diversos estudos vem sendo desenvolvidos nos últimos anos com intuito de reduzir ou eliminar a utilização de adesivos de base formaldeído, seja para aplicações diversas como também para aplicações em painéis de madeira (ZHANG, 2024; XU, 2024; CAZELLA, 2024; ZHANG, 2025; MUHAJMIN, 2025; WU, 2025).

#### 2.4.2.1 PETr

A poluição causada por resíduos plásticos emergiu como uma problemática ambiental de escala global, atribuída ao uso intensivo de polímeros sintéticos não biodegradáveis, como o polietileno tereftalato (PET), o polietileno (PE) e o polipropileno (PP). Esses materiais encontram ampla aplicação em setores como embalagens, indústria têxtil e construção civil (LIGUORI, 2023; UMDAGAS, 2025).

O acúmulo de resíduos plásticos no ambiente configura-se como uma questão de escala global. A maior parte desses materiais corresponde a polímeros sintéticos derivados do petróleo, caracterizados por sua elevada resistência à degradação e potencial para liberar substâncias tóxicas, o que os torna poluentes para solos, ambientes marinhos, organismos aquáticos (Figura 10) e até mesmo para a atmosfera, por meio da contaminação da chuva (LIGUORI, 2023).

Figura 10 – Efeitos negativos do plástico no ecossistema marinho: (a) ingestão de plástico por tubarão, (b) Fixação em detritos plásticos por lepas, (c) cobertura parcial de poluentes plásticos em colônia de ostras, e (d) enredamento de filhote em fio plástico sintético



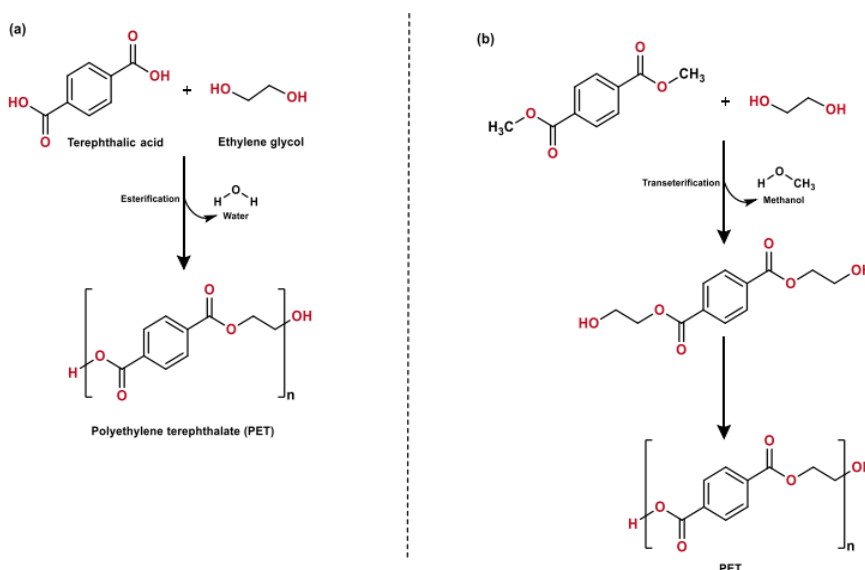
Fonte: Adaptado de Thushari, 2020

O crescimento exponencial da produção aliado à gestão inadequada do ciclo de vida desses produtos tem resultado na acumulação persistente de resíduos plásticos, configurando riscos significativos para os ecossistemas, para a saúde humana e para a sustentabilidade dos recursos naturais. Os impactos ambientais incluem o aprisionamento de animais silvestres, a contaminação por microplásticos e os potenciais efeitos adversos decorrentes da liberação de substâncias químicas. Além dos prejuízos ecológicos, a destinação final inadequada de resíduos plásticos também acarreta elevados custos econômicos, relacionados principalmente às operações de coleta, limpeza e descarte (THUSHARI, 2020).

Em 2019, a produção mundial de polietileno tereftalato alcançou 36,2 milhões de toneladas, sendo estimado um crescimento para 38,4 milhões de toneladas até 2025. Atualmente, aproximadamente 70% desse material é descartado como resíduo a cada ano, contribuindo significativamente para impactos ambientais adversos. Nesse contexto, a reciclagem dos resíduos de PET configura-se como uma estratégia essencial para mitigar tais problemas (SHIXIAN, 2025).

O PET é um polímero termoplástico semicristalino desenvolvido em 1941 pelos químicos John Rex Whinfield e James Tennant Dickson. A síntese do PET ocorre por meio da esterificação direta entre ácido tereftálico (TPA) e etilenoglicol (EG) ou, alternativamente, pela transesterificação de tereftalato de dimetila (DMT) com etilenoglicol (EG), resultando em longas cadeias poliméricas lineares, conforme apresnetado na Figura 11. (KWON, 2024; NEELALOCHANA, 2025).

Figura 11 – Síntese da produção de PET: (a) processo de TPA, e (b) DMT



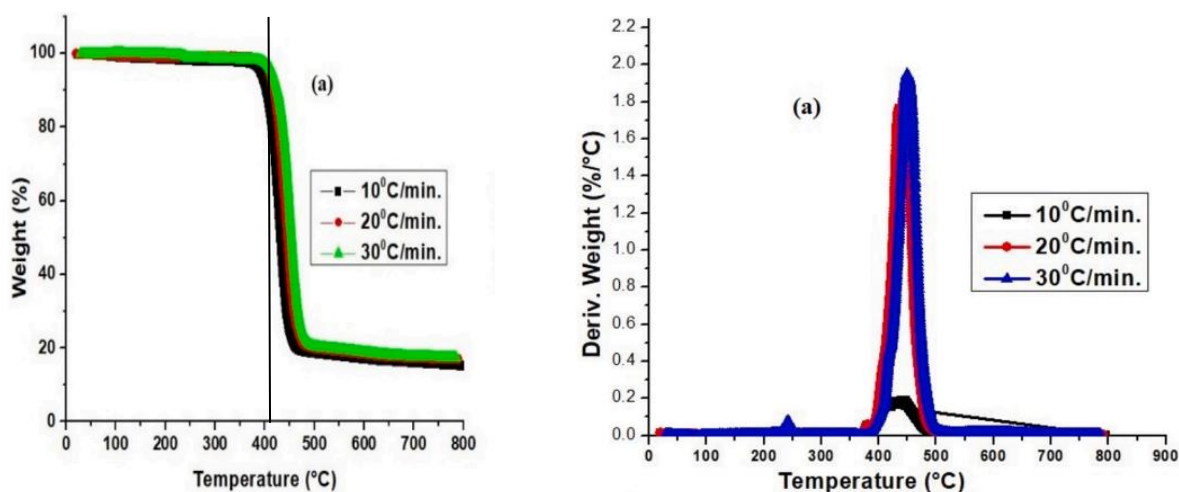
Fonte: Neelalochana, 2025

Essas cadeias são compostas por unidades repetitivas de tereftalato de etileno unidas por ligações éster, as quais conferem um equilíbrio entre rigidez e flexibilidade moderada. Os anéis aromáticos presentes na estrutura polimérica reforçam a resistência mecânica, enquanto as ligações éster garantem flexibilidade e uma reatividade controlada (KWON, 2024; NEELALOCHANA, 2025).

A decomposição térmica do PET, subdividida em diversas zonas, permite observar o processo de decaimento de massa do material quando exposto a um gradiente de temperaturas crescente, até a decomposição total ou parcial.

A Figura 12, apresenta os gráficos de termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG) obtidos por Dwivedi (2025). A primeira zona (Figura 12a) que se estende da temperatura ambiente até aproximadamente 150 °C, corresponde à perda de umidade ou de outros componentes voláteis, geralmente associada à evaporação de água ou solventes de baixo ponto de ebulição.

Figura 12 – Decomposição térmica das partículas de PET por Dwivedi (2025): (a) TG, e (b) DTG



Fonte: Adaptado de Dwivedi, 2025

A segunda zona, denominada zona de pirólise ativa, abrange o intervalo de 150 °C a 450 °C, no qual ocorre a maior parte da perda de massa das amostras de PET. Segundo os autores, para muitos polímeros, essa etapa corresponde predominantemente à ruptura das cadeias poliméricas principais.

Observa-se que a decomposição inicial tem início em 402,1 °C (vide Figura 12a) para a amostra de PET, considerando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Para taxas de aquecimento superiores (20°C/min e 30°C/min), os picos de decomposição se deslocam para temperaturas mais elevadas em relação ao gráfico obtido a 10 °C/min (Figura 12a). Esse comportamento evidencia o impacto das variações na taxa de fluxo de calor sobre a perda de massa das amostras.

A terceira zona, denominada zona de pirólise passiva, situa-se na faixa de 450 °C a 700 °C, na qual ocorre uma decomposição adicional do material, geralmente associada à liberação de voláteis de maior peso molecular ou à degradação de componentes mais estáveis. Essa zona tem início em 480 °C considerando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

A última zona de pirólise, denominada zona de resíduos, tem início em temperaturas superiores a 700 °C. Esta etapa corresponde à fração residual estável, geralmente composta por materiais inorgânicos, carvão ou cinzas que não sofrem mais decomposição mesmo sob temperaturas mais elevadas. Conforme ilustrado na Figura 12, observa-se a formação de carvão em uma proporção de 16,26%.

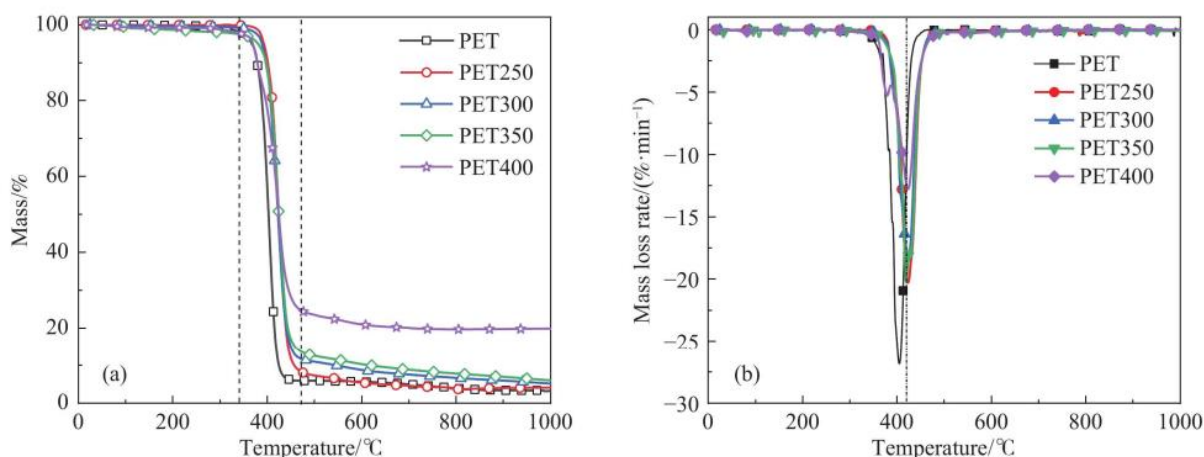
O gráfico de DTG apresentados na Figura 12b evidencia as temperaturas máximas das amostras, as quais correspondem às temperaturas em que a taxa de perda de massa atinge seu valor mais elevado durante o processo de decomposição. A temperatura máxima observada foi de 447,52 °C para uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

Shixian (2025) também estudaram as curvas de decaimento de massa do PET, os resultados são análogos aos apresentados por Dwivedi (2025). A Figura 13 apresenta seus resultados em conformidade com os dados anteriormente expostos.

Conforme observado, o teor de substâncias voláteis liberadas durante a pirólise (fase inicial) do PET foi muito baixo em temperaturas inferiores a 340 °C (Figura 13a). Nessa faixa, as reações foram predominantemente governadas por processos de despolimerização, nos quais ocorre a redução do grau de polimerização do PET.

A liberação significativa de voláteis ocorreu na faixa de 340 a 470 °C. De modo geral, a pirólise do PET se deu em uma única etapa, sem emissão expressiva de água na fase inicial.

Figura 13 – Decomposição térmica das partículas de PET por Shixian (2025): (a) TG, e (b) DTG



Fonte: Shixian, 2025

#### 2.4.2.2 Breu Colofônia

Produtos Florestais Não Madeireiros – PFNM são todos os produtos de origem vegetal, exceto madeira do fuste principal, extraídos de florestas plantadas, florestas naturais ou de sistemas agroflorestais (SNIF, 2024).

Os PFNM consistem em uma vasta cadeia de produtos, tais como óleos, resinas, sementes, raízes, frutos, folhas, flores, cascas. O látex (seiva natural), amplamente difundido no mundo para produção de borracha natural desde a década de 1870, é extraído da árvore seringueira – *Hevea brasiliensis* e se destaca pelo pioneirismo na exploração comercial em grande escala.

Entretanto, diversas outras seivas naturais são exploradas há séculos por povos originários como o Breu branco extraído da almecegueira – *Protium heptaphyllum* e o Breu de sorva extraído da sorveira – *Couma utilis* (Figura 14) empregados como impermeabilizantes para calafetar canoas (GIROTO, 2015).

O Breu colofônia é o resultado da destilação da resina natural da árvore de pinus – *Pinus sp*, resultando em um produto 100% natural e com propriedades ligantes apreciadas pelo mercado. Algumas de suas aplicações são na fabricação de resinas sintéticas, colas e adesivos, ceras depilatórias, sabões e sabonetes, tintas e vernizes.

Curiosa utilização do breu colofônia nos dias atuais se dá como material aderente para absorver o suor das mãos e aumentar a interação entre os

equipamentos e os atletas, análogo ao pó de magnésio, utilizado por ginastas, fisiculturistas, tenistas e jogadores de beisebol e como antiderrapante quando aplicado em sapatilhas de bailarinos (Figura 15).

Figura 14 – Breu: (a) branco, e (b) de sorva



Fonte: AmazonOil, 2025

Figura 15 – Exemplo de aplicação de breu colofônia no esporte: (a) levantamento de peso, e (b) balé



Fonte: domínio público, 2025

O processo de obtenção do breu colofônia se dá inicialmente com a extração da goma de pinus de florestas plantadas que posteriormente servirão como fonte de madeira para outras finalidades. A extração de breu contribui, portanto, para dupla aptidão destas florestas como fornecedoras de PFNM e Produtos Florestais Madeireiros – PFM.

A Figura 16 abaixo apresenta em detalhes o processo de sangria do tronco das árvores de pinus e o acúmulo e armazenamento da goma resultante do processo.

Figura 16 – Processo de obtenção da goma de pinus de floresta plantadas: (a) execução de estrias no lenho da árvore, e (b) acúmulo da goma de pinus



Fonte: Florpinus, 2021

Em seguida, toda goma acumulada nos recipientes coletores é extraída pelos trabalhadores rurais e levada para a limpeza de eventuais impurezas e beneficiamento (Figura 17).

Figura 17 – Extração da goma de pinus



Fonte: Florpinus, 2021

O breu é obtido através da destilação da goma de *pinus* (Figura 18) e apresenta composição sólida, de cor amarela esbranquiçada com consistência quebradiça e facilmente inflamável (Figura 19).

Figura 18 – Breu colofônia após processo de destilação da goma de pinus



Fonte: Florpinus, 2021

Figura 19 – Breu colofônia comercial



Fonte: Florpinus, 2021

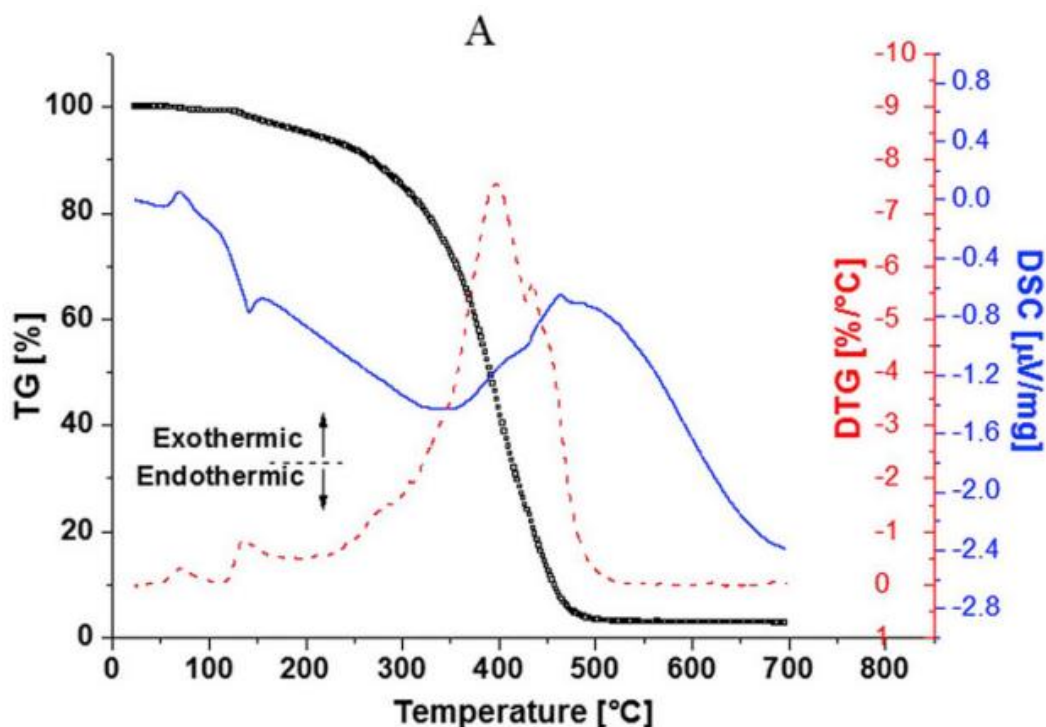
Nakanishi (2019) usou resinas de breu colofônia – *rosin* – como filme polimérico alternativo para revestimento impermeabilizante de painéis de partículas de 3 camadas a base de cana-de-açúcar e bambú. Os autores observaram que o emprego da resina como revestimento superficial formou uma fina película sobre os painéis estudados, não sendo capaz de cobrir as irregularidades superficiais.

Entretanto, o filme superficial de breu contribuiu na diminuição significativa da permeabilidade de água, reduzindo os valores de inchamento em espessura após 24 horas em 81,16% quando comparados com painéis que não continham o revestimento superficial.

Em relação ao desempenho térmico, o uso de breu colofônia como revestimento não influenciou nas propriedades térmicas, sendo os valores de condutividade térmica média de 0,161 W/mK para os painéis sem revestimento superficial e de 0,160 W/mK para aqueles que continham revestimento superficial de breu colofônia.

Quando avaliada a decomposição térmica TG / DTG do breu colofônia em atmosfera inerte de N<sub>2</sub>, pôde-se observar uma primeira decomposição entre 50 e 200°C, com uma perda de massa de aproximadamente 5% atribuída aos processos de decomposição endotérmicas e exotérmicas da água e de outros produtos voláteis (Figura 20).

Figura 20 – TG e DTG das partículas de breu colofônia

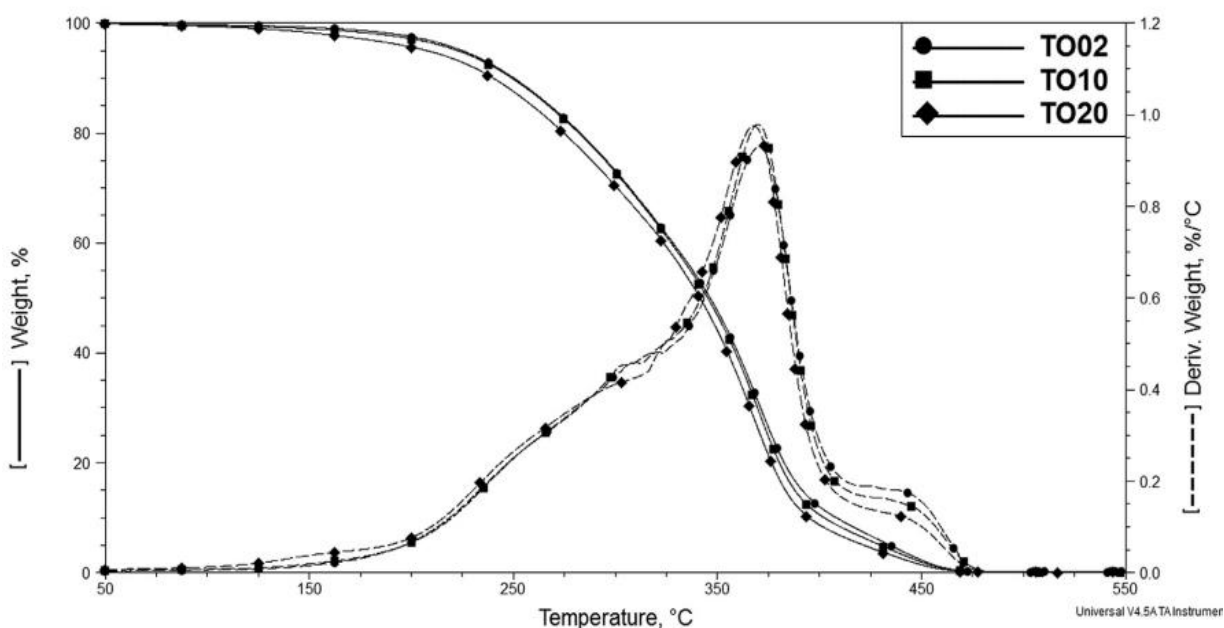


Fonte: Nakanishi, 2019

No intervalo entre 200 e 500°C ocorre a decomposição do breu colofônia, com perda de massa da ordem de 88% atribuída aos ácidos primários e abiéticos. Os autores observaram que quanto maior a quantidade de ácidos primários (que possui elevada estabilidade estrutural) maior será a temperatura que delimita o limite superior do segundo intervalo de decomposição, que neste estudo foi de cerca de 500°C.

A Figura 21 abaixo, apresenta a curva de decomposição térmica apresentada por Pietrzak (2014) em sua pesquisa que se aprofundaram nas investigações de propriedades térmicas e mecânicas de elastômeros fabricados com adição de polóis à base de óleo de pinho – *tall oil* (TO) com teores de ácido colofônico variando entre 2% e 20%.

Figura 21 – TG e DTG do óleo de pinho – *tall oil based rosin acid* (TO) com teores de ácido colofônico variando em 2% (TO02), 10% (TO10) e 20% (TO20)



Fonte: Pietrzak, 2014

Segundo os autores, na etapa inicial de aquecimento e consequente degradação do material (com início em temperatura de aproximadamente 100°C e término em aproximadamente 150°C) ocorre a evaporação dos gases voláteis. No caso dos polióis de óleo de pinho, este processo se resume à evaporação de água e de outros elementos facilmente volatilizáveis presentes em sua composição.

As diversas etapas de degradação presentes em uma curva de TG e DTG representam processos sucessivos de perda de massa e a precisa delimitação do início e fim de cada um desses processos pode ser de difícil aferição, entretanto, para a amostra TO02 a taxa máxima de decomposição foi à 371°C enquanto para as amostras TO10 e T020 foram de 370°C e 368°C. Com o aumento do teor de ácido colofônico a resistência térmica dos polóis diminuiu, o que é atribuído a um maior teor de produtos voláteis nas amostras testadas.

### 2.4.3 Teores e proporções de adesivo

A quantidade de adesivo usada varia em torno de 6 a 12% do peso seco de madeira (Iwakiri, 2020). Portanto usar 10% de adesivo alternativo é uma primeira possibilidade, entretanto, pode-se observar que usar uma quantidade maior de adesivo poderia ser viável com base em estudos que investigaram o uso de PET.

O PET já foi empregado na produção de painéis de partículas anteriormente com sucesso em substituição parcial à madeira na forma de flocos em painéis de partículas (IŽDINHÝ, 2013) ou em pó em compostos de madeira plástica – *Wood Plastic Composites (WPCs)* (RAHMAN, 2013). Entretanto, o emprego de polietileno tereftalato em pó (>250µm) como adição à madeira desempenhando papel de adesivo tem sido o grande diferencial deste trabalho.

## 2.5 PAINÉIS DE PARTÍCULAS ALTERNATIVOS

Pesquisas de alto fator de impacto vem sendo desenvolvidas nos últimos anos com a preocupação de apresentar alternativas aos adesivos empregados na produção dos painéis de partícula. Na literatura internacional, se destacam terminologias como: *non-formaldehyde adhesives*; *formaldehyde free adhesives*; *bio-based adhesives* e *green adhesives*.

Diante da problemática envolvida na utilização de adesivos de base formaldeído e na demanda mundial por novos materiais de consumo, são apresentados a seguir trabalhos que refletem o estado da arte do assunto.

Zhang (2024) destacam que o desenvolvimento novos de adesivos ecológicos a partir de fontes renováveis se apresenta como uma alternativa promissora para substituir os adesivos convencionais derivados do petróleo, contribuindo, inclusive, para atingir as metas globais de neutralidade de carbono.

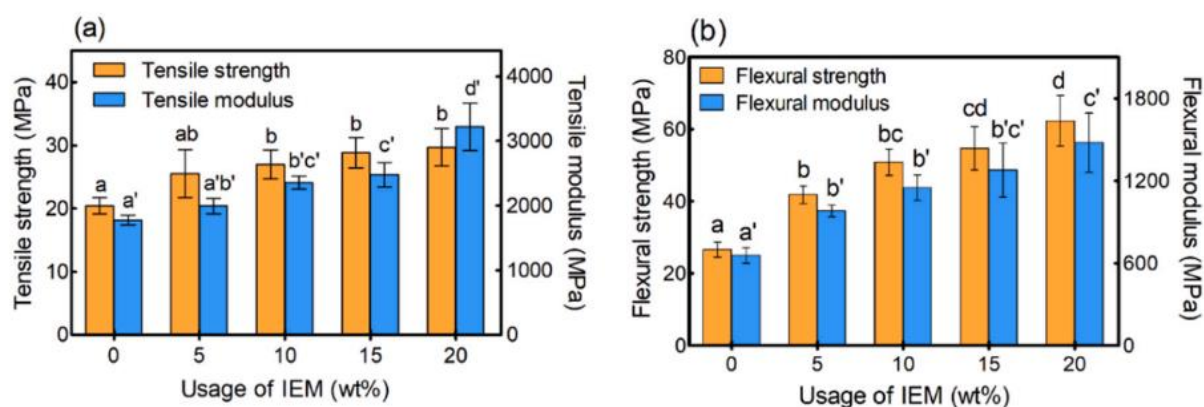
Os autores desenvolveram adesivos termofixos de base vegetal utilizando óleo de soja epoxidado acrilado – *acrylated epoxidized soybean oil (AESO)* e um dimetacrilato derivado de óleo de palma – *palm oil-based dimethacrylate (MPOEA)*, aplicados como adesivos na produção de painéis de partículas de bambu.

Devido às forças de coesão e adesão ainda limitadas dos adesivos, adicionou-se o 2-isocianetil metacrilato – *2-isocyanethyl methacrylate (IEM)* para

e elevar a densidade dos termofixos e reforçar a ligação entre as partículas de bambu e os materiais poliméricos.

Os painéis produzidos mostraram excelente desempenho mecânico, além de elevada resistência à água e a temperaturas elevadas. Algumas formulações alcançaram a incrível marca da ordem de 30 MPa de resistência à tração. A Figura 22, apresenta os resultados dos ensaios de tração e flexão a que os corpos de prova foram submetidos.

Figura 22 – Propriedades mecânicas dos painéis de partícula de bambu aglutinados com adesivos alternativos a base de óleo de soja e de palma: (a) resistência à tração, e (b) resistência a flexão simples



Fonte: Zhang, 2024

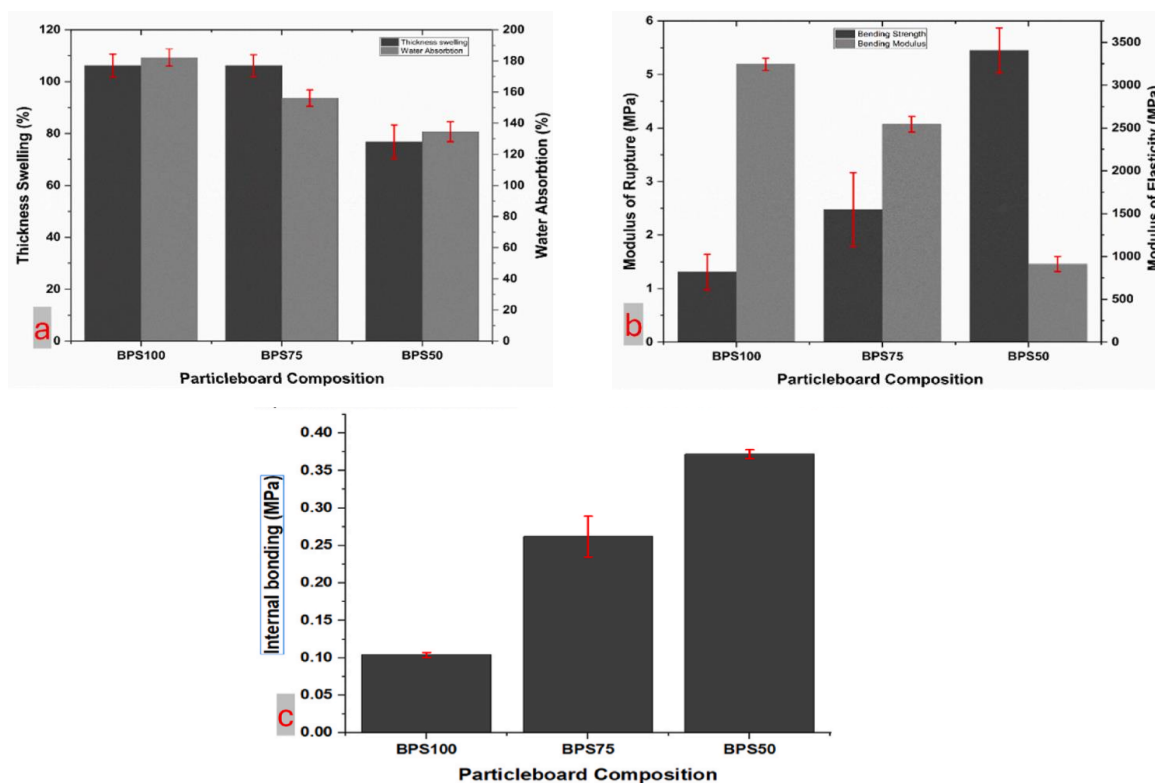
Muhaimin (2025) também trabalharam com painéis de partícula de bambu, com o mesmo apelo por encontrar alternativas aos adesivos de base formaldeído. A solução proposta pelos autores foi avaliar o uso de adesivos à base de amido de *Nelumbo nucifera* combinado com ácido cítrico de origem biológica.

Foi adotada a espécie de bambu Semantan – *Gigantochloa scortechinii* utilizando três composições adesivas distintas: BPS100 (100% amido), BPS75 (75% amido e 25% ácido cítrico) e BPS50 (50% amido e 50% ácido cítrico) todas contendo 20% de teor de adesivo em relação à massa seca de partículas e densidade do painel de 0,80 g/cm<sup>3</sup>. Foi adotado temperatura de prensagem de 150°C por período de 10 minutos e teor de umidade da faixa de 4,8% à 7,6%.

Entre as formulações, a BPS50 apresentou os melhores resultados, com menor dilatação em espessura (76,85%) e absorção de água (134,5%), além do

maior MOR (5,448 MPa) e resistência à abrasão (0,372 MPa). A Figura 23 apresenta na íntegra, os resultados obtidos pelos autores.

Figura 23 – Propriedades físico-mecânicas dos painéis produzidos: (a) Inchamento em espessura e absorção de água; (b) MOR e MOE; e (c) resistência à tração



Fonte: Adaptado de Muhaimin, 2025

Os resultados obtidos para o módulo de resistência à flexão estática foram inferiores aos padrões mínimos adotados pelo autores como referência para painéis de partículas de uso geral, entretanto os resultados demonstram o potencial do uso de adesivos de amido e ácido cítrico como bioadesivos renováveis e livres de formaldeído para produção de compósitos.

Xu (2024) Produziram compósitos alternativos aos painéis de partícula empregando adesivos livres de formaldeído e um subproduto da cultura de cogumelos – substrato – como material de enchimento em substituição aos recursos lignocelulósicos convencionais. Os autores avaliaram as propriedades físicas e a atividade antimicrobiana dos compósitos produzidos sob pressão de 10MPa e temperatura de 150°C por período de 20 minutos.

Foi adotado micélio como adesivo alternativo aos de base formaldeído. Os módulos de elasticidade dos biocompósitos com 20% e 10% de substrato contendo quitina obtidos foram de  $1383,60 \pm 129,31$  e  $1284,01 \pm 66,59$  MPa, respectivamente. A análise antimicrobiana, após 14 dias de cultivo contínuo a 25 °C em ambiente úmido, permitiu observar que os biocompósitos fabricados a partir de substratos com quitina apresentaram menores abundâncias relativas de *Bacteroides vulgatus* e *Prevotella copri* na superfície, em comparação com os biocompósitos sem quitina, cujas abundâncias foram de 9,24% e 9,44%, respectivamente.

Os autores concluíram que a produção de biocompósitos a partir de substratos de cogumelos usados mostra-se uma alternativa promissora para diminuir tanto as emissões de gases de efeito estufa quanto o uso de substâncias químicas nocivas ao meio.

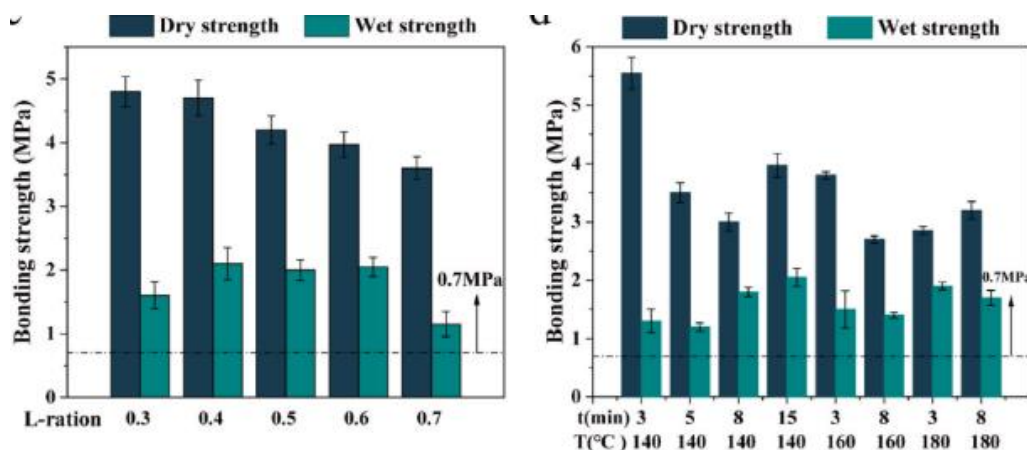
Além disso, o uso de adesivos não formaldeídos à base de micélio, aliado à aplicação superficial de quitosana com ação antimicrobiana, amplia as possibilidades de aplicação desses biocompósitos, tornando-os viáveis para móveis, materiais de construção para interiores e brinquedos.

Zhang (2025) desenvolveram um adesivo alternativo aos de base formaldeído à base de lignina – *lignin-based adhesive* (LAs) com desempenho aprimorado, obtido a partir da combinação de lignina não modificada, agente de reticulação 1,4-butanodiol diglicidil éter e uma poliamida como agente de cura. Os resultados desta associação indicaram para uma elevação significativa da resistência mecânica e a estabilidade química do adesivo.

Os valores máximos de resistência de colagem a seco e a úmido do ligante alternativo proposto foram de 5,55 MPa e 2,05 MPa (Figura 24a), respectivamente, valores dentro dos requisitos da norma nacional chinesa GB/T 9846-2015 ( $\geq 0,7$  MPa). Além disso, o ensaio de emissão de compostos orgânicos voláteis (VOC) revelou um teor total de 30,5 g/L, em conformidade com a norma GB 18583-2008 ( $\leq 350$  g/L).

Foram avaliadas ainda, as resistências de colagem a seco e a úmido do ligante frente às modificações no processo produtivo. Foram avaliadas diferentes temperaturas de prensagem a quente (140°C, 160°C e 180°C) bem como diferentes tempos de prensagem a quente (3 min., 5 min., 8 min. e 15 min.).

Figura 24 – Resistência de ligação úmida e seca dos adesivos: (a) para diferentes formulações de LAS; e (b) para diferentes temperaturas e tempos de prensagem a quente



Fonte: Zhang, 2025

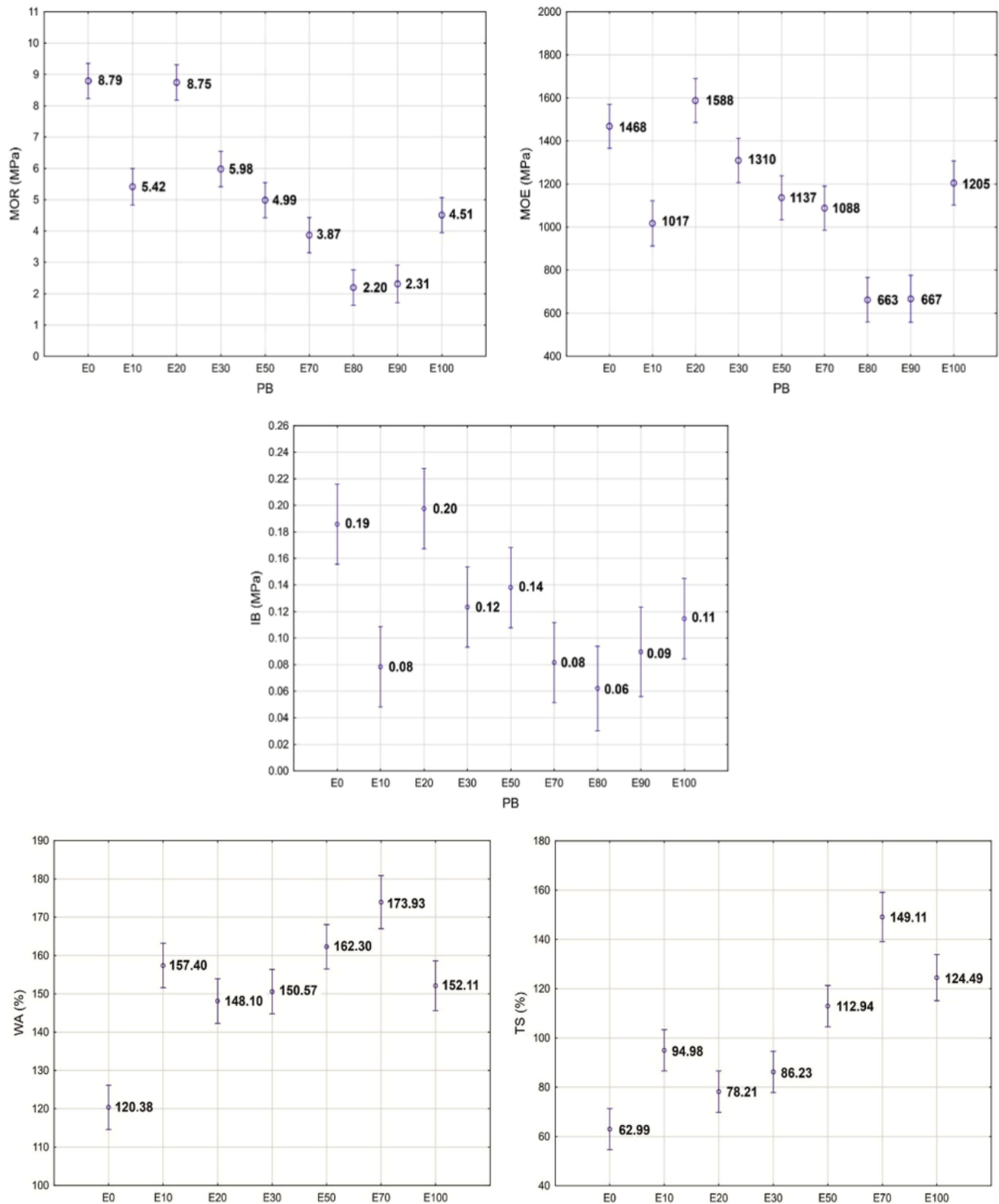
Segundo os autores esta pesquisa abre um vasto campo de produção de painéis alternativos visto que dispensa o adesivo convencional de base formaldeído e dispensa ainda eventuais modificações na lignina ou síntese de outras resinas, representando uma alternativa para o desenvolvimento de novos adesivos, contribuindo para um melhor aproveitamento dos recursos renováveis.

N'emec (2025) se dedicaram ao desenvolvimento de painéis de partículas aglutinados com um adesivo em pó híbrido composto por resina epóxi-poliéster e lignina kraft, com o mesmo objetivo de eliminar a presença de formaldeído e compostos orgânicos voláteis (COVs) do processo produtivo.

Segundo os autores, este adesivo em pó a base de epóxi-poliéster ainda é pouco explorado na produção de compostos de madeira, embora sejam amplamente utilizados nos setores metalúrgico e automotivo.

Foram fabricados painéis com diferentes proporções de lignina kraft, variando de 0 a 100%, com substituição gradual de 10% por grupo proposto da resina epóxi-poliéster (E0, E10, E20, E30, E40, E50, E60, E70, E80, E90 e E100). O teor de adesivo adotado foi de 10% de adesivo em pó em relação à massa seca de madeira. O melhor desempenho foi obtido com a substituição de 20% de lignina, alcançando propriedades mecânicas como MOR = 8,3 MPa, MOE = 1455 MPa e TP = 0,21 MPa, comparáveis ou superiores às do painel de referência sem lignina (Figura 25).

Figura 25 – Propriedades físicas e mecânicas dos painéis alternativos produzidos com adesivo em pó de lignina kraft e resina epóxi-poliéster



Fonte: Nêmec, 2025

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou que a lignina favoreceu uma boa cobertura das partículas e uma colagem homogênea. A adição

de lignina kraft ao adesivo epóxi-poliéster em pó mostrou que a substituição de 20% manteve ou até superou as propriedades mecânicas (MOR, MOE e TP) em relação ao adesivo sem lignina. Destaque especial é dado à formulação E20 que apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e sustentabilidade. A partir de uma proporção de lignina de 30%, verificou-se uma redução progressiva em todas as propriedades avaliadas.

Esses resultados confirmam a viabilidade do uso de lignina kraft em pó como ligante ou co-ligante em compósitos de madeira. Os painéis produzidos oferecem uma alternativa promissora para aplicações em construções internas não estruturais e para a fabricação de móveis mais sustentáveis.

Faria (2024) desenvolveram painéis de partículas alternativos com densidade nominal de  $0,75 \text{ g/cm}^3$ , fabricados com palha de feijão e partículas de seringueira, unidos por adesivo de poliuretano vegetal (não formaldeído), com função isolante. Os painéis foram consolidados em formas de 250 mm x 250 mm com pressão de 4,0 MPa por período de 15 minutos a temperatura ambiente. Foram determinadas as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos painéis, além de sua resistência ao ataque de cupins, comportamento frente à combustão e capacidade de isolamento térmico.

Os autores observaram que, com o aumento da proporção de partículas de palha de feijão, a absorção de água reduziu-se significativamente, de 11,44% para 7,68%, tendência também verificada para o inchamento em espessura, de 4,61% para 1,73% após 24 horas de imersão. Houve ainda, uma redução no módulo de elasticidade (66,4%) e no módulo de ruptura (52,5%) com o aumento da fração de palha de feijão.

Os testes de resistência ao ataque de cupins indicaram menor perda de massa nos painéis com maior teor de palha de feijão. Quanto à condutividade térmica, verificou-se que maiores quantidades de resíduos proporcionaram melhor desempenho de isolamento. Assim, em termos de produção de materiais mais sustentáveis e atendimento aos requisitos de desempenho, concluiu-se que é viável fabricar painéis aglomerados utilizando resíduos agrícolas e adesivos livres de formaldeído.

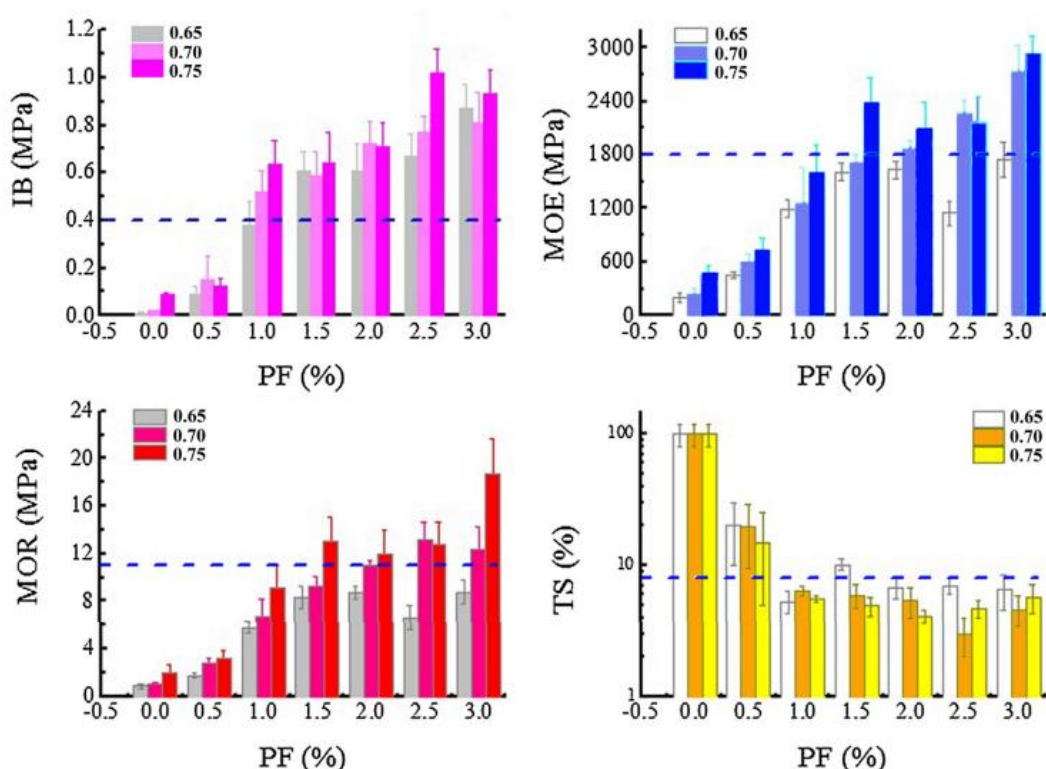
Com os mesmos esforços de encontrar um adesivo alternativo aos de base formaldeído, Li (2017) propuseram um novo tipo de painel de partículas utilizando resina de poliéster saturado para aglutinação das partículas. Entretanto, os autores

empregaram uma solução aquosa de formaldeído fenólico – phenolic formaldehyde (PF) em diferentes teores no tratamento superficial das partículas de madeira empregadas na produção dos painéis com intuito de melhorar o desempenho de suas propriedades frente àquelas composições que não passaram pelo tratamento.

Ainda assim, os autores defendem, baseados em testes de emissão de formaldeídos, que não foram encontrados resquícios de formaldeído livre nos painéis produzidos.

Os painéis foram consolidados a temperatura de 200°C com pressão de 5MPa por período de 4 minutos. Foram propostos três grupos de densidade de painéis, sendo eles de 0,65 g/cm<sup>3</sup>, 0,70 g/cm<sup>3</sup> e 0,75 g/cm<sup>3</sup>. A Figura 26 apresenta alguns dos resultados obtidos pelos pesquisadores para propriedades mecânicas de resistência à tração (MPa), módulo de elasticidade (MPa), módulo de resistência à flexão estática (MPa) e da propriedade física de Inchamento em espessura após 24 horas (%).

Figura 26 – Resultado das propriedades de TP, MOE, MOR e I 24h



Fonte: Li, 2017

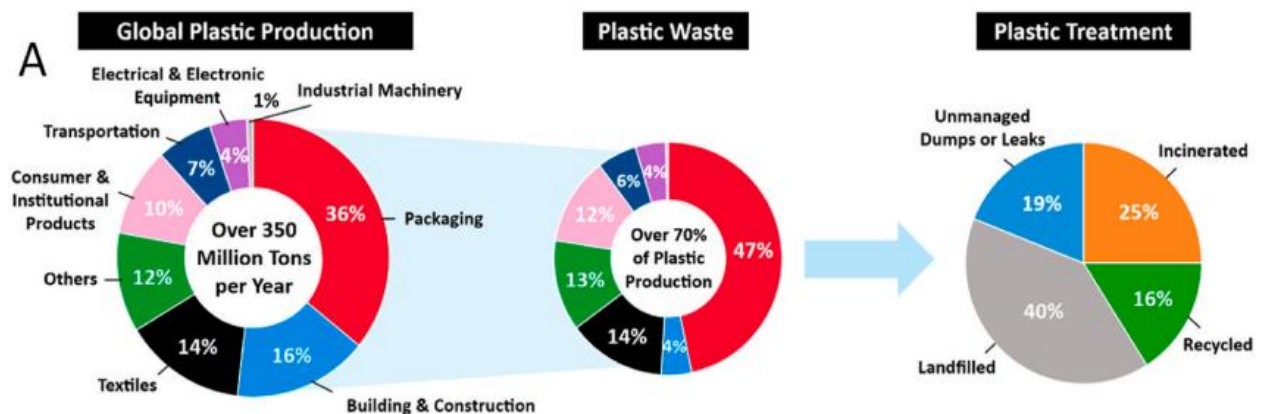
As linhas tracejadas paralelas ao eixo X (em azul), indicam os valores contidos no documento normativo chinês (GB/T 4897-2015) e americano à época

(ANSI A208.1-1999). Com o aumento dos teores de PF no tratamento das partículas de madeira, foi observado que os resultados das propriedades mecânicas aumentaram, enquanto o inchamento em espessura diminuiu, o que indica que houve melhora de desempenho em todas as propriedades avaliadas, indicando a possibilidade de substituir a resina de formaldeído pela resina alternativa de poliéster insaturado.

Haja visto o esforço atual por encontrar soluções alternativas às resinas de base formaldeído, se faz necessário pesquisar materiais que tenham competências para melhorar as propriedades dos compósitos propostos e que possam contribuir ainda com uma segunda aptidão, como por exemplo a atenuação do descarte irregular de resíduos no meio ambiente através da reciclagem, reuso ou reaproveitamento. Neste contexto, são apresentados adiante trabalhos científicos e revisões de literatura que apresentam o polietileno tereftalato como alternativa viável.

O PET é um polímero extensivamente empregado em várias indústrias, graças às suas ótimas propriedades físicas e químicas. No entanto, o consumo crescente de produtos feitos de PET contribuiu para uma crise global na gestão de resíduos, já que o descarte inadequado desses materiais tem causado impactos ambientais consideráveis. O PET representa uma parte significativa dos resíduos acumulados em aterros sanitários e, para enfrentar esse problema, diferentes métodos de reciclagem foram desenvolvidos e aprimorados ao longo dos anos (JOSEPH, 2024). A Figura 27 apresenta um panorama mundial da produção de plástico pelos diferentes setores, bem como sua destinação.

Figura 27 – Parcelas da produção, geração de resíduo e destino global do plástico

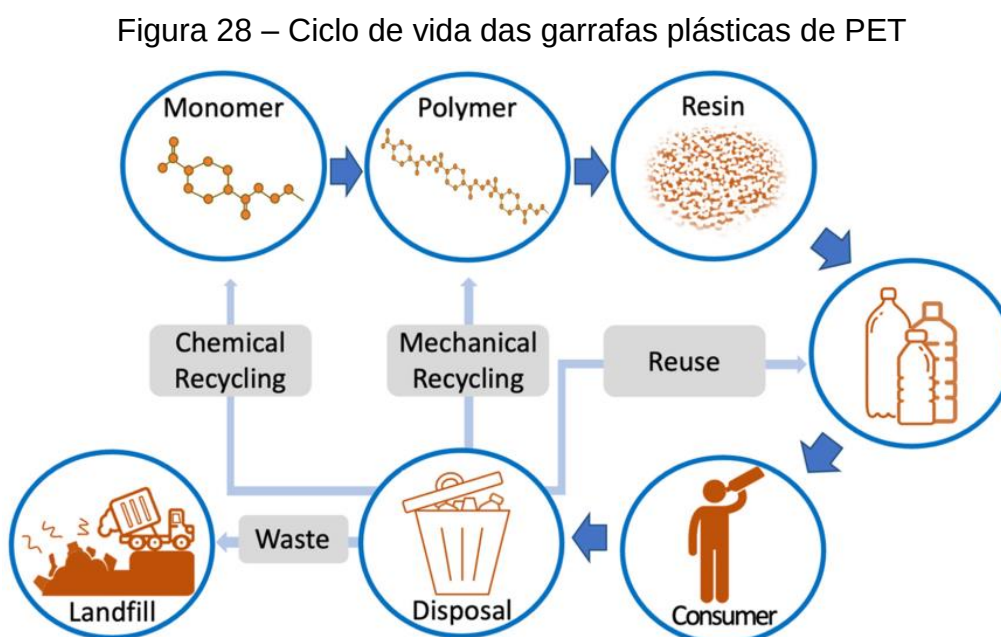


Fonte: Joseph, 2024

O PET é um material translúcido, robusto e durável, capaz de suportar temperaturas elevadas, apresentando também boa resistência a agentes químicos e ótima estabilidade dimensional. Conhecido por sua alta resistência à tração, excelente estabilidade dimensional e notável resistência química. Ele apresenta resistência a uma grande variedade de substâncias, incluindo ácidos, bases e solventes, o que o torna uma opção bastante utilizada na fabricação de embalagens para alimentos, bebidas e produtos farmacêuticos. O PET consegue suportar temperaturas de até 80 °C sem comprometer suas propriedades mecânicas, sendo, portanto, indicado para aplicações que demandam boa performance térmica (BENYATHIAR, 2022; JOSEPH, 2024).

A Figura 28 apresenta o ciclo de vida de uma garrafa plástica de polietileno tereftalato, evidenciando que após o consumo podem ser descartadas irregularmente, contribuindo para a poluição, ou em aterros contribuindo para o aumento de volume de rejeitos e consequente diminuição da sua capacidade e redução de tempo de uso.

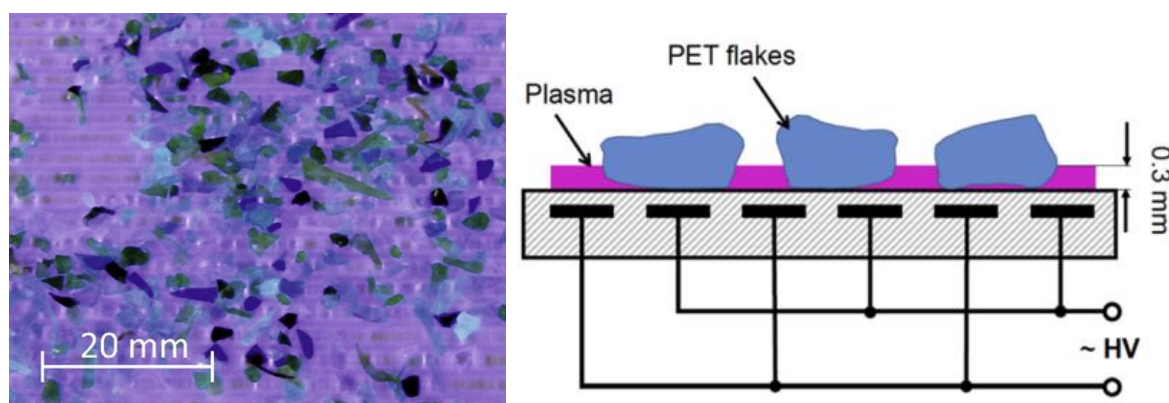
Além disso, o organograma apresenta três possibilidades de reaproveitamento desse material, sendo eles a reciclagem química, reciclagem mecânica e o reuso/reutilização.



Fonte: Benyathiar, 2022

Klímek (2016), utilizaram flocos de PET como material de enchimento na produção de painéis de partículas com densidade de  $0,6 \text{ g/cm}^3$ . Os flocos, de diâmetro médio de 1,6 milímetros, foram empregados em substituição parcial – em proporções de 15% e 30% – em relação à madeira de abeto. Parte dos flocos passou por um pré-tratamento com plasma de ar para que pudesse ser comparada com aquelas composições que continham PET não tratadas (Figura 29).

Figura 29 – Flocos de PET em contato com o tratamento de plasma



Fonte: Adaptado de Joseph, 2024

Os autores empregaram adesivo de ureia formaldeído (Prefere 4170) com endurecedor (Kronoadd HL 100) e adotaram pressão de compressão para produção das placas de  $3,2 \text{ MPa}$  com temperatura de  $190^\circ\text{C}$  por período de 50 segundos.

Os painéis foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos para avaliar suas propriedades. Os autores observaram que os painéis produzidos com substituição de madeira por PET, sem nenhum tratamento, tiveram resultados de propriedades mecânicas prejudicadas, entretanto, as composições com 30% de PET tratado apresentaram a mesma resistência à tração perpendicular que os painéis que continham apenas madeira de abeto. Além disso, as amostras com 15% de PET tratado apresentaram o mesmo MOR dos painéis de referência.

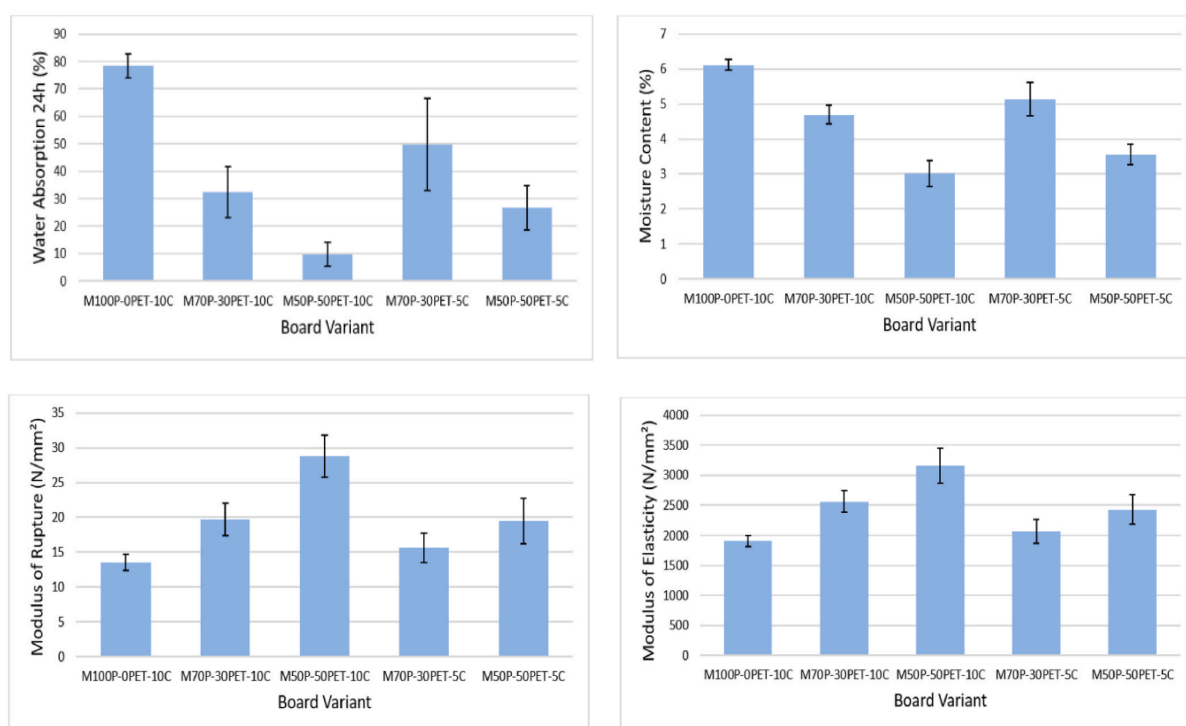
Neste trabalho, os autores optaram por substituir o material de enchimento (madeira) pelo PET. Como solução ao decréscimo nas propriedades físico-mecânicas foi proposto o tratamento com plasma nas partículas com intuito de gerar grupos funcionais quimicamente ativos na superfície dos flocos de PET.

De maneira análoga, Cazella (2024) propuseram painéis alternativos com densidade de  $0,7 \text{ g/cm}^3$  contendo substituições parciais de madeira de pinus por

partículas de PET em proporções de 30% e 50%, aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona. Foi adotada pressão de prensagem de 5 N/mm<sup>2</sup> a temperatura de 110°C por 10 minutos, em dois ciclos de prensagem de 5 minutos cada separados por um intervalo de 30 segundos.

Os painéis também passaram pelas avaliações normativas físicas e mecânicas para avaliar seu desempenho. Os autores destacam a viabilidade econômica de se empregar na produção de painéis de partícula, resíduos plásticos em substituição à madeira. Ademais, a substituição parcial de partículas de madeira pelas de PET resultou em consideráveis melhorias nas propriedades físicas e mecânicas em comparação aos painéis que não continham plástico reciclado (Figura 30), além do atendimento aos critérios normativos comparados.

Figura 30 – Ganho nas propriedades físicas de absorção de água (%) e teor de umidade (%) e nas propriedades mecânicas de MOR (N/mm<sup>2</sup>) e MOE (N/mm<sup>2</sup>) dos painéis de partícula com substituição parcial de partículas de madeira por PET



Fonte: Adaptado de Cazella, 2024

A Figura acima apresenta resultados favoráveis das propriedades físicas e mecânicas avaliadas para os grupos propostos com substituição parcial de madeira por PET. A primeira coluna dos gráficos apresenta os resultados dos painéis que

continham apenas madeira de pinus como material de enchimento e teor de 10% de adesivo, a segunda e terceira coluna apresentam respectivamente substituições de 30% e 50% de madeira de pinus por partículas de PET, conservando o teor de adesivo em 10%. As colunas quatro e cinco apresentam respectivamente substituições de madeira por 30% e 50% de PET, entretanto, diminuindo para 5% o teor de adesivo.

Diante do ganho nas propriedades avaliadas, os autores consideraram ser possível uma diminuir o teor de adesivo utilizado para produção dos painéis de partícula, resultando em uma economia financeira, visto que o dispêndio com adesivo é a principal demanda financeira do processo produtivo.

No mesmo sentido, Arianti (2021) estudaram, através do comportamento físico-mecânico, o desempenho de painéis de partículas de densidade igual a  $0,8 \text{ g/cm}^3$ , produzidos com resíduos de garrafas plásticas de bebidas feitas de PET (Figura 31). Foram propostas substituições de madeira por PET nos teores de 30%, 40% e 50%.

No processo produtivo foi empregada temperatura de prensagem de  $200^\circ\text{C}$  por período de 20 minutos com pressão de  $25 \text{ kg/cm}^2$  para consolidação dos painéis aglutinados com adesivo a base de ureia formaldeído a um teor de 11% em relação à massa de partículas, além de um catalizador.

Figura 31 – PET triturado proveniente de resíduos de garrafa plásticas



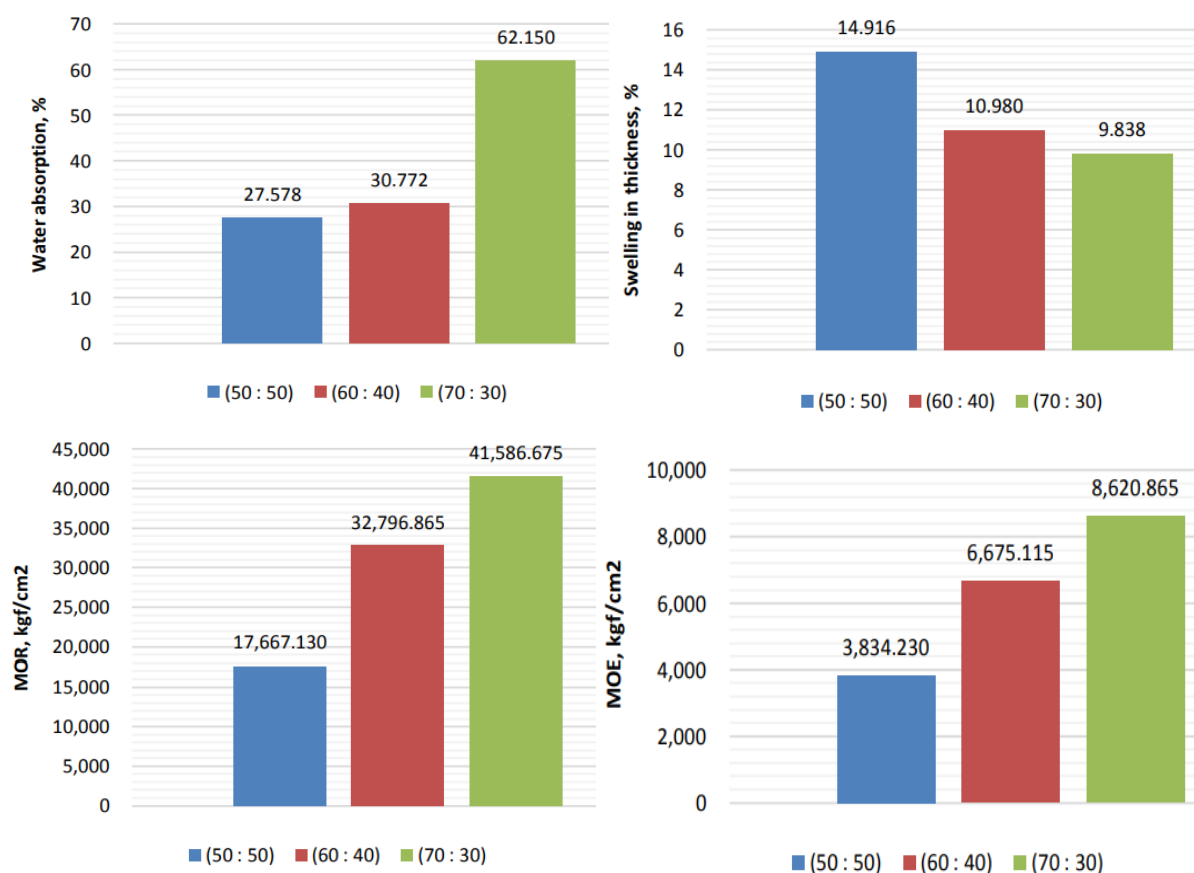
Fonte: Arianti, 2021

Os autores também observaram redução na absorção de água de 62,15% para a composição que continha apenas 30% de PET para 27,59% para a composição que continha 50% de PET.

Por outro lado, o inchamento em espessura após 24 horas foi prejudicado com o aumento dos teores de PET reciclado, excedendo, inclusive, os valores admitidos pelos documentos normativos adotados como referência (norma indonésia SNI 03– 2105– 2 006 e norma japonesa JIS A 5908:2003).

O desempenho mecânico baseado nos resultados de módulo de elasticidade e módulo de resistência à flexão estática também se mostrou desfavorável com o aumento dos teores de PET reciclado nas misturas. A figura 32 apresenta de forma gráfica os resultados encontrados pelos pesquisadores.

Figura 32 – Resultados das propriedades físicas de absorção de água (%) e inchamento em espessura (%) e das propriedades mecânicas de MOR (kgf/cm<sup>2</sup>) e MOE (kgf/cm<sup>2</sup>) dos painéis de partícula com substituição parcial de madeira por resíduos de garrafas PET



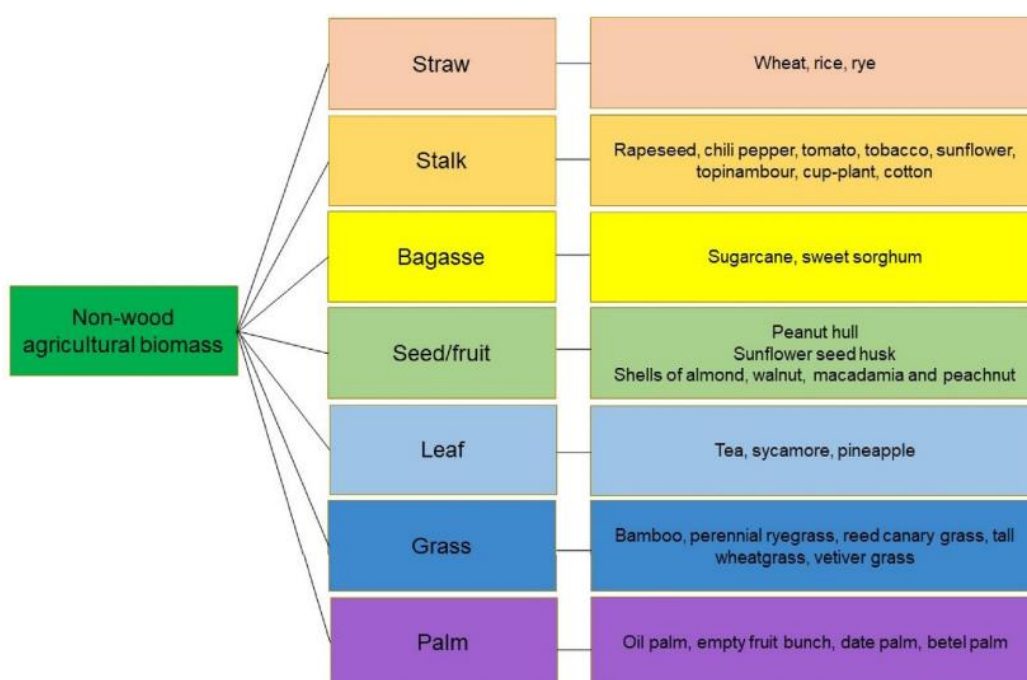
Fonte: Arianti, 2021

Lee (2022) defendem a utilização de matérias-primas alternativas, como biomassa agrícola, resíduos de madeira reciclada e subprodutos de origem lignocelulósica como estratégia para atender à demanda mundial por materiais derivados da madeira e enfrentar os elevados valores de produção.

Os autores realizaram um vasto levantamento bibliográfico de trabalhos científicos que propunham a substituição dos cavacos de madeira por resíduos agrícolas lignocelulósicos já que essa biomassa agrícola, proveniente de processos pós-colheita e pós-produção, é disponível em grande quantidade e se mostra uma alternativa promissora para a produção de painéis de partículas.

Nesta revisão, a biomassa agrícola empregada na fabricação de painéis de partículas foi organizada em sete categorias distintas, de acordo com a parte da planta de onde é obtida, sendo elas: 1 - palha, 2 - caule, 3 - bagaço, 4 - semente/fruto, 5 - folha, 6 - gramíneas e 7 – palmeiras (Figura 33). Além disso, foram comparadas as propriedades dos painéis produzidos a partir dessas diferentes matérias-primas, considerando seus parâmetros mecânicos. Em diversos casos, os painéis de partículas produzidos a partir de matérias-primas alternativas apresentam desempenho mecânico comparável ou até superior ao dos painéis convencionais feitos exclusivamente com madeira.

Figura 33 – Classificação em sete grupos da biomassa não lenhosa utilizada na produção de painéis de partícula alternativos



Fonte: Lee, 2022

Os autores concluíram que a utilização de biomassa agrícola e resíduos de madeira reciclada contribui para o desenvolvimento sustentável, equilibrando três pilares fundamentais: crescimento econômico, inclusão social e proteção ambiental. Defendem ainda que a introdução de materiais alternativos na cadeia de produção de painéis de partículas pode impactar o setor de forma positiva.

Lakshmanan (2023) empregaram resíduos vegetais lignocelulósicos de talos de juta para o desenvolvimento de painéis de partículas de média densidade. Segundo os autores esta é uma finalidade mais nobre para este subproduto agroindustrial, frente à utilização como carvão vegetal.

Para a aglutinação dos painéis foi empregada renina natural de breu combinada com resina fenol formaldeído em diferentes teores (15%, 20% e 25% em relação à massa de partículas de juta seca). As proporções de breu em relação à resina fenólica foram, respectivamente, de 70% e 30% para o primeiro grupo, 80% e 20% para o segundo grupo e por fim, 90% e 10% para o último grupo proposto.

Os autores observaram que a densidade dos painéis de partícula a base de resina de breu colofônia foi maior em relação àqueles que continham maiores quantidade de adesivo fenol formaldeído. Isso se deve à presença de alto teor de sólidos e à ausência de umidade na resina.

Entretanto, quanto à eficiência mecânica ocorreu o inverso, painéis com maiores quantidades de breu colofônia apresentaram pior desempenho frente aos que continham maiores teores de fenol formaldeído. Este fato pode estar relacionado à menor eficiência de ligação da goma de breu em relação às partículas de juta, quando comparado com o adesivo convencional.

O maior valor de MOR observado pelos autores (51,72 MPa) foi alcançado no painel de partículas fabricado com partículas de 25 mm de diâmetro médio, massa de 1000 g, teor de adesivo de 25% em relação à massa seca de juta e proporção de 70% de breu colofônia e 25% de resina fenol formaldeído. Nessa condição, observou-se uma forte ligação química entre as partículas de juta e o adesivo fenólico, favorecida pela formação de uma rede polimérica intermediária de breu.

O painel de partículas produzido sob condições otimizadas apresentou densidade variando entre 0,485 e 0,510 g/cm<sup>3</sup> e módulo de ruptura entre 35,5 e 51,5 MPa, atendendo aos requisitos desejáveis para painéis de uso geral, com estabilidade térmica adequada para aplicações em ambientes internos.

A Figura 34 apresenta o processo de envelhecimento em estufa da resina alternativa de breu que promove o envelhecimento acelerado da resina à temperatura de 170°C por período de 24 horas. A degradação da resina é observada pelo seu escurecimento progressivo. Diz-se que a resina é mais estável quanto menor for a variação da cor em relação à cor inicial.

Figura 34 – Amostras de resina de breu colofônia após submissão a ensaio de envelhecimento em estufa por períodos de 4, 8 e 24 horas



Fonte: Florpinus, 2021

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 COMPOSIÇÕES PROPOSTAS

Foram desenvolvidos painéis de partícula de pinus (*pinus sp*) com teores de 10%, 20% e 30% (em massa seca de madeira) de material ligante (IŽDINSKÝ, 2013 KLÍMEK, 2016; CAZELLA, 2024; CARVALHO, 2025). Foram empregados PETr (polietileno tereftalato reciclado) e breu colofônia como aglutinantes alternativos ao fenol-formaldeído, ligante comumente empregado pela indústria (IWAKIRI, 2020) em cinco diferentes teores para cada um dos três grupos citados anteriormente, totalizando 15 composições, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composições propostas para a produção de painéis aglomerados alternativos

| Composições * |                  | Madeira   | Adesivos alternativos |      | Teor de adesivo em relação à massa seca de Pinus sp. |
|---------------|------------------|-----------|-----------------------|------|------------------------------------------------------|
|               |                  | Pinus sp. | PETr                  | BREU |                                                      |
|               |                  | (%)       | (%)                   | (%)  | (%)                                                  |
| 1             | C1 <sup>10</sup> | 100       | 100                   | 0    | 10                                                   |
| 2             | C2 <sup>10</sup> | 100       | 75                    | 25   | 10                                                   |
| 3             | C3 <sup>10</sup> | 100       | 50                    | 50   | 10                                                   |
| 4             | C4 <sup>10</sup> | 100       | 25                    | 75   | 10                                                   |
| 5             | C5 <sup>10</sup> | 100       | 0                     | 100  | 10                                                   |
| 6             | C1 <sup>20</sup> | 100       | 100                   | 0    | 20                                                   |
| 7             | C2 <sup>20</sup> | 100       | 75                    | 25   | 20                                                   |
| 8             | C3 <sup>20</sup> | 100       | 50                    | 50   | 20                                                   |
| 9             | C4 <sup>20</sup> | 100       | 25                    | 75   | 20                                                   |
| 10            | C5 <sup>20</sup> | 100       | 0                     | 100  | 20                                                   |
| 11            | C1 <sup>30</sup> | 100       | 100                   | 0    | 30                                                   |
| 12            | C2 <sup>30</sup> | 100       | 75                    | 25   | 30                                                   |
| 13            | C3 <sup>30</sup> | 100       | 50                    | 50   | 30                                                   |
| 14            | C4 <sup>30</sup> | 100       | 25                    | 75   | 30                                                   |
| 15            | C5 <sup>30</sup> | 100       | 0                     | 100  | 30                                                   |

\* C: composições propostas.

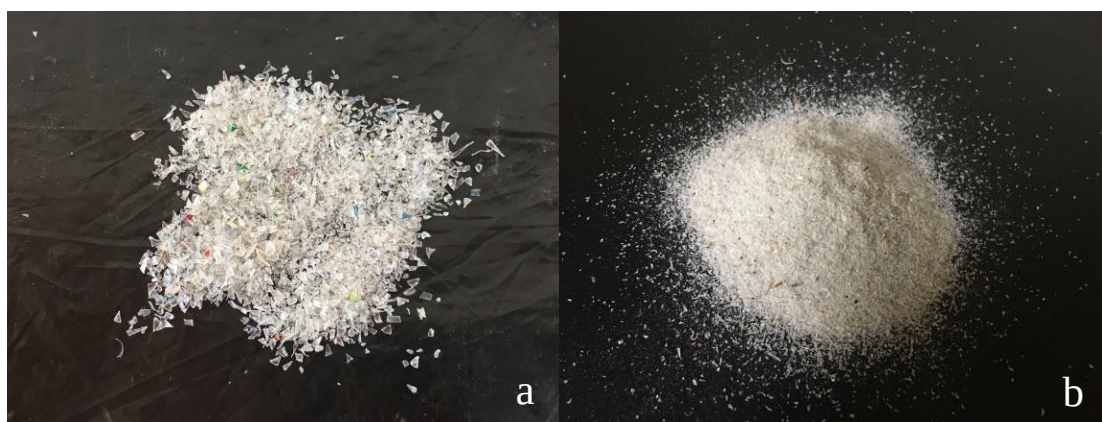
Fonte: Elaboração pelo próprio autor.

Foram produzidos três painéis de partículas para cada uma das composições propostas na Tabela 2. Foi considerada a densidade nominal dos painéis produzidos de  $0.7\text{g/cm}^3$  considerando os intervalos de densidade média propostos pelos documentos normativos (CS, 1966; EN, 2010; ANSI, 2022; ABNT, 2024). As dimensões dos painéis foram definidas em  $35 \times 35 \times 1.6 \text{ cm}$ , totalizando assim volume de  $1960 \text{ cm}^3$  e massa total de  $1372 \text{ g}$ .

### 3.2 MATERIAIS

O PET reciclado, utilizado nesta pesquisa, foi doado pela empresa Global PET®, uma empresa de reciclagem localizada na cidade de São Carlos – SP. A Figura 35a apresenta o material doado antes do processo de beneficiamento proposto nesta metodologia.

Figura 35 – Partículas de PETr: (a) antes do beneficiamento, e (b) depois do beneficiamento



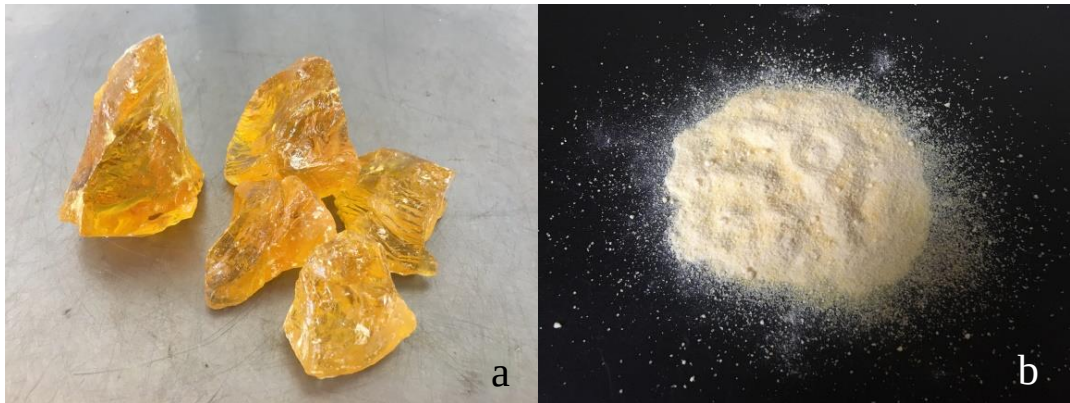
Fonte: Acervo do autor

O polietileno passou por beneficiamento que consistia em duas etapas, sendo a primeira um processo de trituração em moinho de facas e a segunda etapa um peneiramento de todo o material em peneira de malha de  $250 \mu\text{m}$  (RAHMAN, 2013) (Figura 35b) com intuito de alcançar um menor diâmetro médio de partículas, contribuindo para o aumento da superfície específica e da interação entre o aglutinante alternativo e as partículas de madeira de pinus.

O Breu Colofônia foi adquirido da empresa Velas Sorocaba Ltda, localizada na cidade de Sorocaba – SP. Em temperatura ambiente, apresenta o estado sólido

como evidencia a Figura 36a. Em seguida, passou por processo de maceração com auxílio de pilão em almofariz de porcelana (Figura 37) Assim como o polietileno, foi peneirado em peneira de malha de 250  $\mu$ m (RAHMAN, 2013) (Figura 36b).

Figura 36 – Breu Calofônia: (a) antes do beneficiamento, e (b) depois do beneficiamento



Fonte: Acervo do autor

Figura 37 – Processo de maceração do Breu Colofônia em almofariz de porcelana



Fonte: Acervo do autor

A madeira de pinus utilizada na produção dos painéis de partículas foi adquirida da Madeireira Pinus, localizada na cidade de Ilha Solteira – SP em forma de tábuas. As tábuas passaram por uma plaina desengrossadeira localizada na marcenaria da Unesp, Campus de Ilha Solteira para produção de cavacos (Figura 38a).

Os cavacos foram triturados em moinho de facas como feito com as partículas de polietileno, entretanto, foi empregada peneira de malha de 10 mm no

equipamento, garantindo que este seria o máximo diâmetro possível. Todo material triturado passou por processo de peneiramento com objetivo de delimitar um intervalo entre 1 e 6 mm de diâmetro de partículas (Figura 38b), faixa adequada para o consumo moderado de adesivo (IWAKIRI, 2020).

Figura 38 – Madeira de pinus: (a) cavacos, e (b) partículas



Fonte: Acervo do autor

As partículas com diâmetro médio superior a 6 mm (retidas na peneira com abertura efetiva de malha de 6.3 mm) foram novamente processadas, já as partículas com diâmetro inferior a 1 mm (passantes pela peneira com abertura de malha de 1.0 mm) não foram empregadas para produção dos painéis alternativos.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.3.1 Composição Granulométrica

A granulometria dos adesivos alternativos propostos e da madeira de pinus foi realizada com base em uma adaptação da norma ABNT NBR 17054 (2022). As peneiras empregadas no ensaio granulométrico são apresentadas na Tabela 3.

Um agitador de peneiras elétrico foi empregado nesta etapa para vibração do conjunto (Figura 39). Adotou-se um tempo de 15 min de vibração. Para as partículas de PETr e breu foi estipulada uma massa de 100g, enquanto as partículas de pinus foram ensaiadas considerando 35g de partículas (SOUZA, 2023; CAZELLA, 2024).

Tabela 3 - Conjunto de peneiras empregadas no ensaio para determinação da composição granulométrica do particulado

| PETr e Breu |                     |       | Pinus    |                     |      |
|-------------|---------------------|-------|----------|---------------------|------|
| Peneiras    | Abertura das malhas |       | Peneiras | Abertura das malhas |      |
|             | ASTM/ABNT           | (mm)  |          | ASTM/ABNT           | (mm) |
| 1.          | 35                  | 0.5   | I.       | 1/4"                | 6.3  |
| 2.          | 40                  | 0.42  | II.      | 4                   | 4.75 |
| 3.          | 50                  | 0.297 | III.     | 6                   | 3.35 |
| 4.          | 60                  | 0.25  | IV.      | 8                   | 2.36 |
| 5.          | 100                 | 0.15  | V.       | 10                  | 2.0  |
| 6.          | 140                 | 0.105 | VI.      | 12                  | 1.7  |
| 7.          | 200                 | 0.075 | VII.     | 16                  | 1.18 |
| 8.          | 270                 | 0.053 | VIII.    | 18                  | 1.0  |
| fundo       | -                   | -     | fundo    | -                   | -    |

Fonte: Elaboração pelo próprio autor

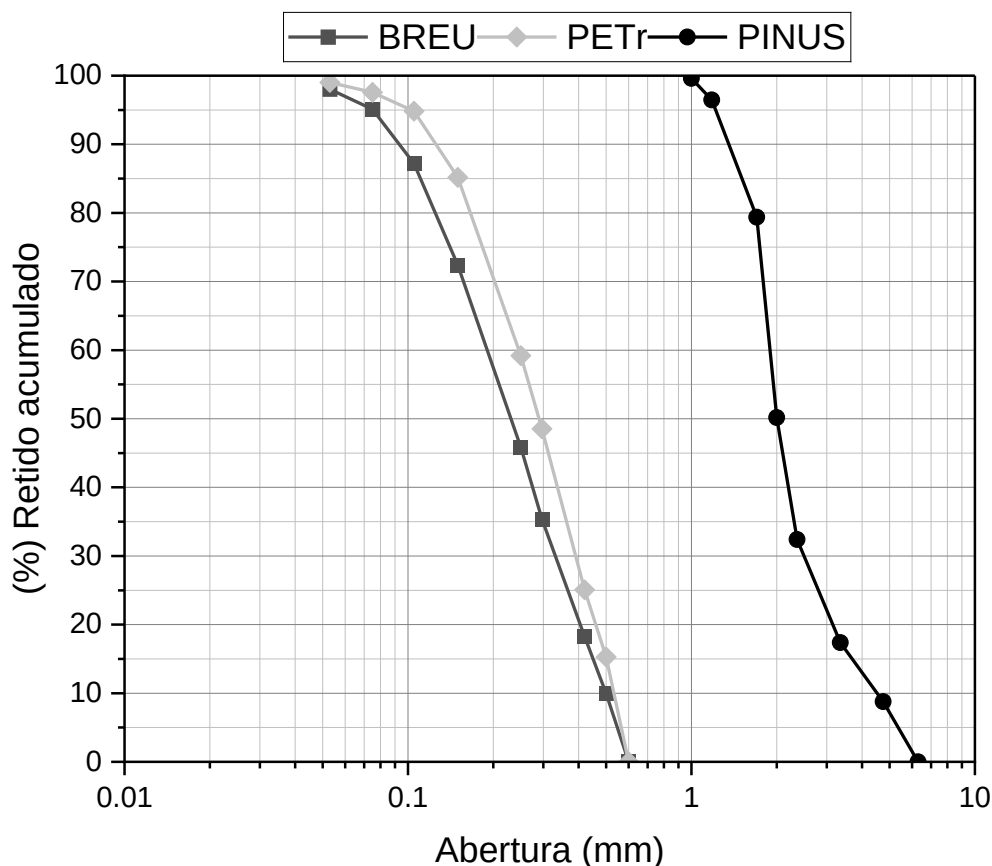
Foram ensaiadas três amostras de cada material, obtidas através do processo de quarteamento (ABNT, 2021). A média aritmética simples dos resultados das três repetições resultou na granulometria de cada particulado ensaiado. Deve-se destacar que a faixa granulométrica encontrada nesta etapa foi utilizada na integra para produção dos painéis. As curvas granulométricas do PETr, breu colofônia (BREU) e pinus são apresentadas na Figura 40.

Figura 39 – Conjunto de peneiras e agitador



Fonte: Acervo do autor

Figura 40 – Curvas granulométricas das partículas de breu colofônia, PETr e pinus



Fonte: Elaboração pelo próprio autor

### 3.3.2 Massa específica das partículas

A massa específica das partículas de madeira de pinus foi determinada através do método do balão volumétrico (ABNT 6457 (2024); ABNT 6458 (2025)). Este ensaio utilizou o picnômetro nº 02 com capacidade de 500 ml, um termômetro de mercúrio com graduação de 0,1 °C, uma balança de precisão e intervalo de análise entre 20°C e 40°C (BISPO, 2021).

Como a madeira de pinus possui massa específica relativamente baixa em comparação com a massa específica da água, foi utilizado álcool absoluto (concentração de 99,3% e massa específica de 0,789 g/cm³) com objetivo de facilitar a submersão das partículas e a aferição das medidas.

A massa específica do PETr e do breu colofônia foram consideradas respectivamente iguais a 1,365 g/cm³ e 1,07g/cm³ (CAZELLA, 2024; QUIMISUL, 2025). A Tabela 4 apresenta os valores da massa específica de cada componente, enquanto a Tabela 5 descremina a massa específica de cada composição proposta

neste trabalho, obtidas através de ponderação entre as proporções dos componentes e seus valores de massa específica.

Tabela 4 - Massa específica do pinus, PETr e breu colofônia

| Partículas | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------------|-----------------------------|
| Pinus      | 0,630                       |
| PETr       | 1,365                       |
| Breu       | 1,070                       |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 5 - Massa específica das composições propostas

| Teores      |                             |             |                             |             |                             |
|-------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
| 10%         |                             | 20%         |                             | 30%         |                             |
| Composições | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Composições | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Composições | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
| C1          | 0,7665                      | C1          | 0,9030                      | C1          | 1,0395                      |
| C2          | 0,7591                      | C2          | 0,8883                      | C2          | 1,0174                      |
| C3          | 0,7518                      | C3          | 0,8735                      | C3          | 0,9952                      |
| C4          | 0,7444                      | C4          | 0,8588                      | C4          | 0,9731                      |
| C5          | 0,7370                      | C5          | 0,8440                      | C5          | 0,9510                      |

Fonte: Elaboração do próprio autor

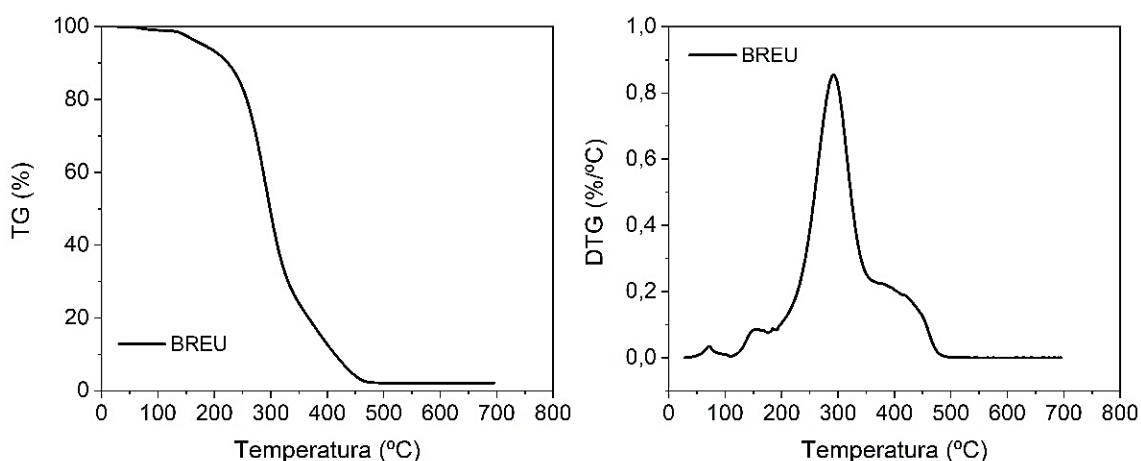
Com o aumento dos teores de resina alternativa houve um aumento gradual nos valores de massa específica das composições. Por outro lado, a interpretação das tabelas permite observar que com o aumento de breu em relação ao PETr, houve diminuição dos valores de massa específica. Este comportamento ocorre uma vez que a densidade da madeira de pinus é inferior à densidade do breu e por sua vez inferior a do PETr. Os valores de densidade das composições são importantes para o cálculo da razão de compactação dos painéis. De acordo com Iwakiri (2020) a razão entre a densidade média do painel produzido e a densidade da composição deve ser de pelo menos 1,3, contribuindo para a melhor densificação do produto.

### 3.3.3 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

A análise termogravimétrica permite entender como o material se comporta em diferentes temperaturas, identificando sua estabilidade térmica e composição. Estas informações garantem o desempenho do material em diferentes aplicações.

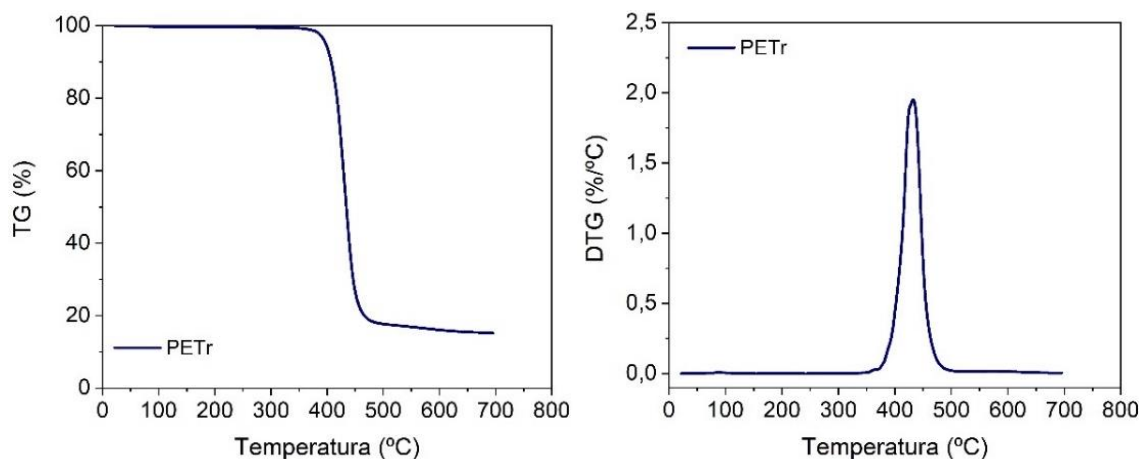
Um termoanalisador Netzch TG-209 foi utilizado para realizar testes termogravimétricos (TG/DTG) sob atmosfera de nitrogênio ( $N_2$ ) a uma vazão de 20 mL/min, variando a temperatura de 20 à 700°C com taxa de 10°C/min. Foram ensaiadas amostras de 10 mg de polietileno tereftalato reciclado (PETr) e de breu colofônia (BREU) em cadinho de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ). As Figuras 40 e 41 apresentam a decomposição térmica das amostras ensaiadas, respectivamente as curvas termogravimétricas e as derivadas.

Figura 41 – TG e DTG das partículas de breu colofônia (BREU)



Fonte: Elaboração pelo próprio autor

Figura 42 – TG e DTG das partículas de PETr



Fonte: Elaboração pelo próprio autor

### 3.4 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE PARTÍCULA

### 3.4.1 Preparo das composições estudadas

As partículas de pinus foram expostas à luz solar no laboratório de Engenharia Civil do Campus da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira por período de 7 horas, entre as 9:00h e as 16:00h até que atingisse teor de umidade em torno de 6% com intuito de diminuir os gastos energéticos. Em seguida, foram dispostas em estufa a uma temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  (Figura 43a) com objetivo de reduzir o teor de umidade das partículas para um intervalo entre 0 e 2% (BISPO, 2022; BISPO, 2024).

Uma balança determinadora de umidade Bel i-thermo G163L foi usada para aferir os teores de umidade de forma precisa e eficiente nesta etapa (Figura 43b). Este intervalo de teor de umidade foi adotado pois favorece a compatibilidade entre a madeira de pinus e as partículas de PET = 0,32% (CAZELLA, 2024) e breu < 0,50% (ASTM, 1993), uma vez que elas apresentam baixo teor de umidade quando expostas em condições naturais de temperatura e pressão.

Figura 43 – Processo de redução do teor de umidade das partículas de madeira:

(a) estufa, e (b) balança determinadora de umidade



Fonte: Acervo do autor

As partículas de pinus e os adesivos alternativos foram pesados, respeitando os teores das composições propostas da Tabela 2 e então armazenados em sacos plásticos individuais onde permaneceram até a etapa seguinte de homogeneização em tambor giratório (Figura 44).

Figura 44 – Preparação das composições propostas: (a) representação da pesagem dos materiais, e (b) homogeneização prévia da composição C1<sup>10</sup>



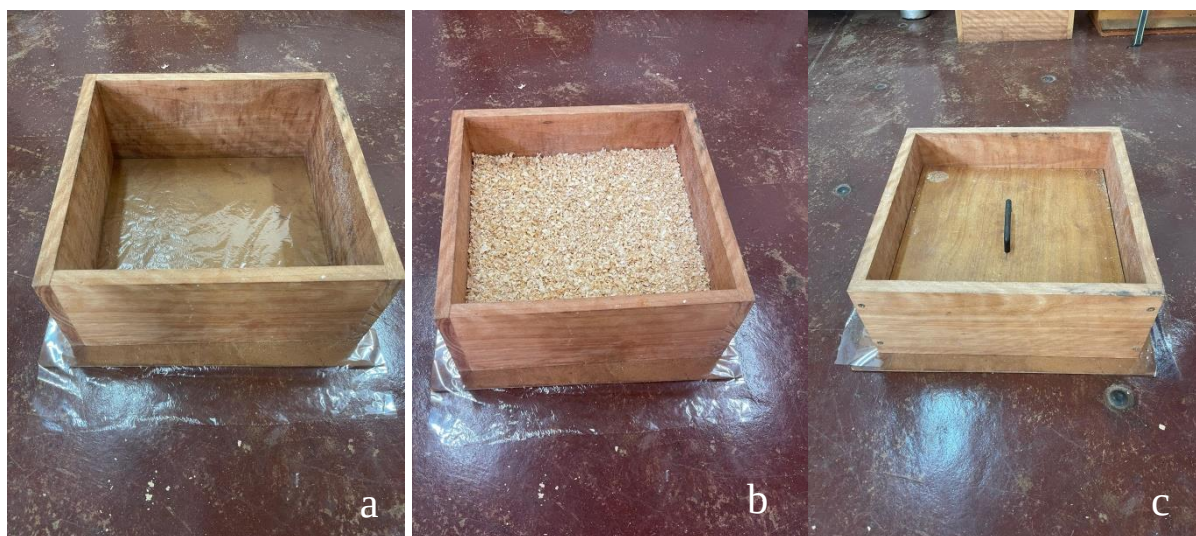
Fonte: Acervo do autor

O conteúdo de cada saco plástico foi disposto em tambor giratório por período de 5 minutos. A característica sólida dos particulados facilita o processo de homogeneização (NˆEMEC, 2025) e diminui o gasto energético em relação a processos convencionais (RODRIGUES, 2023; CAMPOS, 2023).

### 3.4.2 Preparo do colchão de partículas

Após a homogeneização, o material foi disposto em formadora de colchão de partículas – também denominado massa de partículas ou colchão de partículas (ABNT, 2013) – com fundo falso coberto por filme plástico de poliéster (Figura 45a). Sua superfície foi retificada (Figura 45b) e foi adicionado a tampa do conjunto da formadora de colchão (Figura 45c) para que posteriormente se desse início ao processo de pré-prensagem a frio com carga de 1000N.

Figura 45 – Preparação do colchão de partículas: (a) formadora de colchão, (b) deposição do particulado e retificação superficial, e (c) adição da tampa do conjunto



Fonte: Acervo do autor

### 3.4.3 Prensagem do colchão de partículas

O conjunto, com dimensões de 35 cm x 35 cm, foi então levado à prensa hidráulica para prensagem com controle de temperatura (160°C) e pressão (5,7 MPa) – que equivale a uma carga de aproximadamente 70tf previamente calculada em função da área do painel (Figura 46).

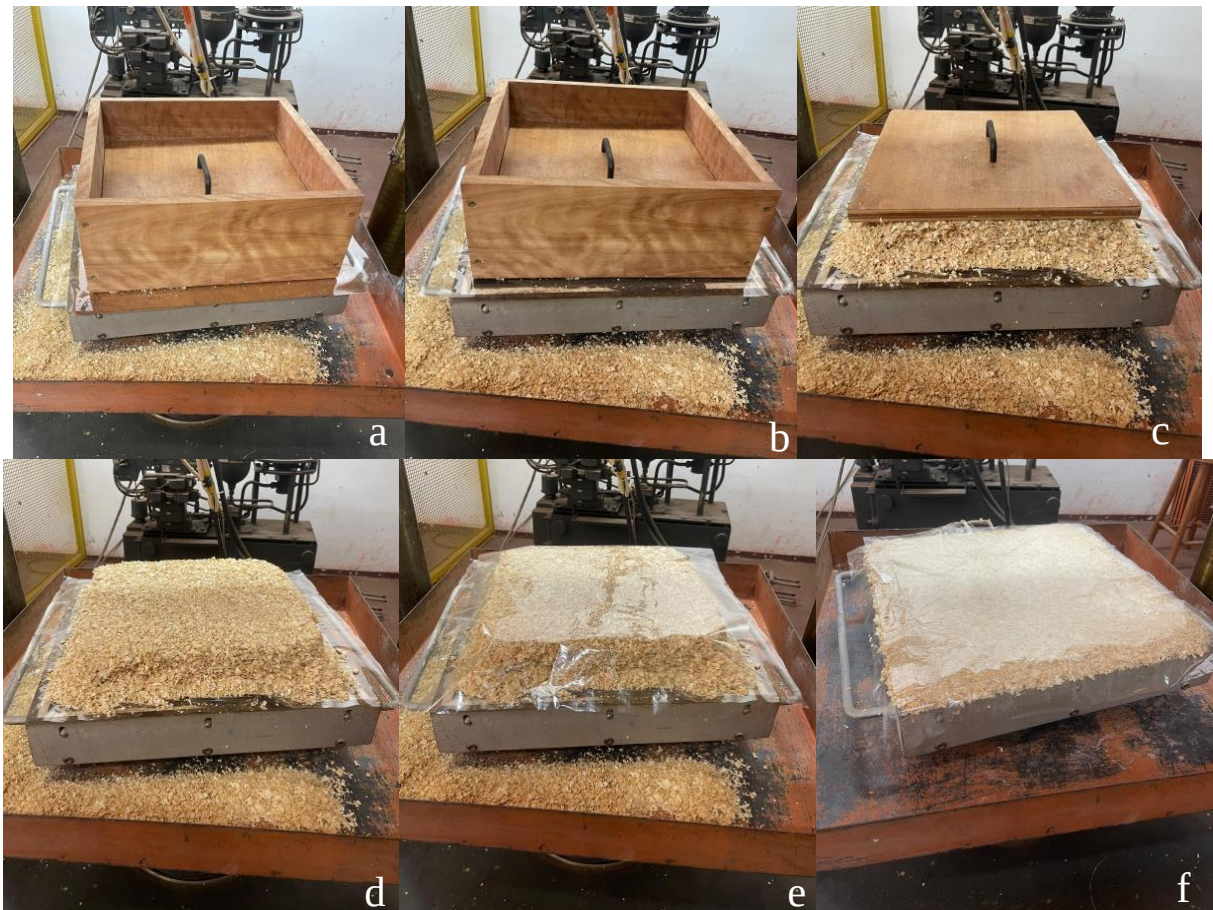
Figura 46 – Aferição da temperatura das faces da prensa hidráulica com equipamento externo



Fonte: Acervo do autor

A Figura 47 a seguir, ilustra todos os processos envolvidos nessa etapa.

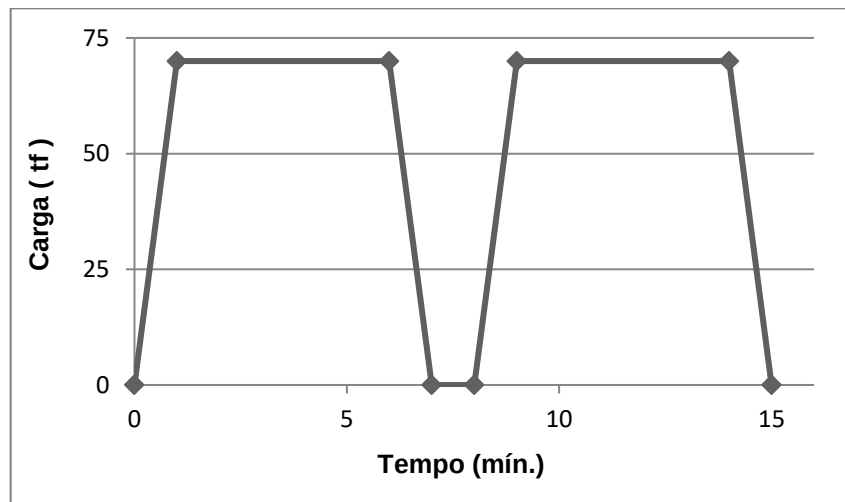
Figura 47 – Produção do painel de partículas: (a) conjunto disposto em prensa hidráulica, (b) remoção do fundo falso, (c) remoção da forma lateral, (d) remoção da tampa, (e) adição do filme plástico de poliéster superior, e (f) painel após ciclo de prensagem



Fonte: Acervo do autor

O ciclo de prensagem para produção do painel está demonstrado na Figura 48, com tempo total de aplicação de carga de 10 minutos, divididos em dois intervalos de 5 minutos com alívio de carga de 30 segundos entre eles. O intervalo de 30 segundos foi empregado com intuito de evitar concentração de gases formados no processo de prensagem devido à elevada temperatura, contribuindo com a diminuição da possibilidade de formação de bolhas no painel (CAMPOS e LAHR, 2004). Segundo Lee (2022) os custos estimados com energia no processo produtivo de painéis de partículas giram em torno de 15% a 20%, sendo decisivo, nesta etapa, um melhor aproveitamento do tempo para diminuição dos custos.

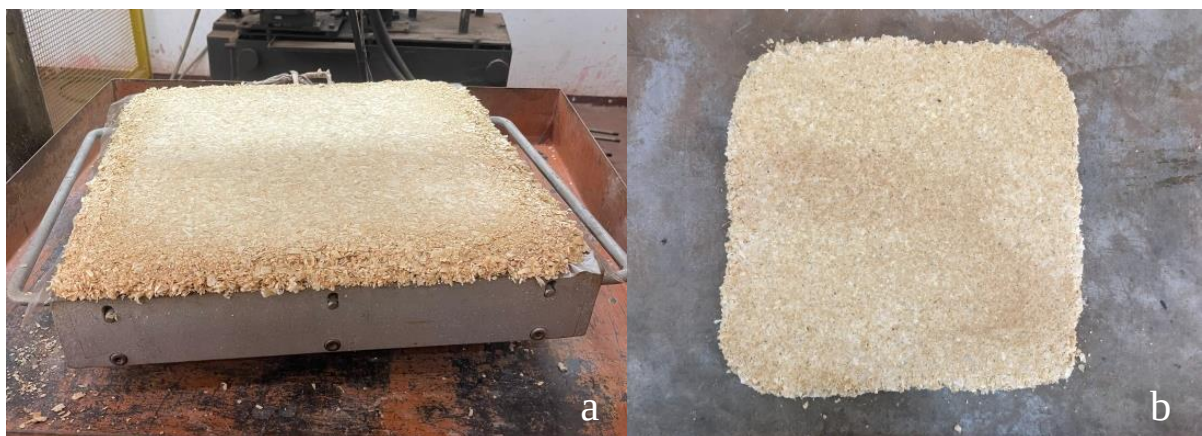
Figura 48 – Esquema do ciclo de prensagem empregado na produção dos painéis alternativos



Fonte: Elaboração pelo próprio autor

Após a prensagem o filme plástico de poliéster foi retirado das faces superior e inferior do painel como ilustra a Figura 49. Os painéis produzidos foram mantidos em superfície plana por um período de 72 horas para garantir a estabilização da temperatura e cura do adesivo alternativo.

Figura 49 – Remoção do filme plástico e cura dos painéis de partículas



Fonte: Acervo do autor

Os painéis produzidos apresentaram retilinidade superficial, propriedade dimensional dos painéis de partícula, caracterizada pela retidão com que se apresentam (ABNT, 2013).

#### 3.4.4 Preparo dos corpos de prova (CP).

Os corpos de prova foram extraídos dos painéis seguindo as prescrições de plano de corte da ABNT (2024). Foram produzidos três painéis para cada composição proposta neste trabalho (Tabela 2), sendo extraídos 4 CP's de cada painel totalizando 12 CP's para realização de cada ensaio de caracterização de propriedades físicas e mecânicas. O documento normativo define o mínimo de 10 CP's por ensaio, sendo satisfeita esta exigência.

Excessão é dada ao ensaio físico de absorção superficial, em que foram empregados 3 CP's para cada composição estudada, sendo cada um dos corpos de prova proveniente de um dos três painéis produzidos. O documento normativo define o mínimo de 3 CP's por ensaio.

Antes do início de todos os ensaios, os corpos de prova passaram por período de estabilização de temperatura e umidade em ambiente controlado, para que estas eventuais condições divergentes não interferissem nos resultados como variáveis alheias ao estudo.

Este processo se deu para todos os CP's de todos os ensaios de caracterização de propriedades físico-mecânicas com excessão dos CP's sujeitos ao ensaio físico de teor de umidade que não passaram pelo processo prévio de estabilização da umidade. O controle da temperatura e umidade foi feito com auxílio de termohigrometro digital da marca HIGHMED, modelo HM-01. A Figura 50 apresenta esta etapa.

Figura 50 – Ambiente com controle de temperatura e umidade



Fonte: Acervo do autor

### 3.5 ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos seguiram as prescrições e exigências normativas da ABNT (2024). A seguir são descritos com detalhes os procedimentos de cada propriedade física avaliada.

#### 3.5.1 Densidade (D)

Doze corpos de prova de cada composição foram extraídos dos painéis seguindo o plano de corte apresentado pela ABNT (2024), sendo quatro CP's de cada painel produzido. As dimensões foram de 50 mm x 50 mm (Figura 51). Estes CP's foram utilizados para aferição da densidade dos painéis a partir de uma amostra. Os CP's foram estabilizados em câmara climática em ambiente controlado até alcançar a umidade de equilíbrio nas condições de  $60\% \pm 5\%$  de umidade relativa e  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  de temperatura.

Figura 51 – Exemplo de corpo de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm da pertencente à composição C1<sup>30</sup>



Fonte: acervo do autor

Inicialmente foram feitas aferições da massa de cada exemplar em balança (precisão de 0.001g), em seguida, foram aferidas as dimensões de espessura com auxílio de micrômetro, na intersecção das diagonais do CP (precisão de 0.001 mm) e largura com auxílio de paquímetro, na direção longitudinal e transversal (precisão de 0.01 mm) conforme orientação contida no Anexo - G da ABNT (2024).

A partir da massa dos CP's e do volume – calculado através de suas dimensões com auxílio da equação 2, calculou-se a densidade de cada corpo de prova de acordo com a equação (1):

$$D_{cp} = \frac{M_{cp}}{V_{cp}} \times 1.000 \quad (1)$$

Sendo:

$$V_{cp} = b1 \times b2 \times e \quad (2)$$

Onde:

$D_{cp}$ : densidade do corpo de prova (g/cm<sup>3</sup>);

$M_{cp}$ : massa do corpo de prova (g);

$V_{cp}$ : volume do corpo de prova (mm<sup>3</sup>);

$b1$  e  $b2$ : são as dimensões das arestas dos corpos de prova (mm) e

$e$ : espessura do corpo de prova (mm).

Com os valores de densidade de cada corpo de prova procedeu-se o cálculo da média aritmética para determinação da densidade média dos painéis de cada composição. Por fim, com auxílio da equação (3) foi calculada a variação percentual da densidade ( $D\%$ ) de cada corpo de prova ( $D$ ) em relação à densidade média.

$$D\% = \frac{D - D_{média}}{D_{média}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$D\%$ : variação percentual da densidade;

$D_{média}$ : densidade média da composição (g/cm<sup>3</sup>) e

$D$ : densidade de cada corpo de prova (g/cm<sup>3</sup>).

Para a produção dos painéis de partícula propostos neste trabalho foi adotada densidade nominal de  $0,7 \text{ g/cm}^3$  com base nos intervalos admissíveis pelos quatro documentos normativos que serviram de referência para esta pesquisa (Tabela 6).

Após a produção dos painéis, os corpos de prova ensaiados e foram verificados quanto à densidade efetiva e ao atendimento aos mesmos intervalos normativos.

Tabela 6 – Intervalos preconizados pelos documentos normativos de densidade média de painéis de partícula

| Norma       | Intervalo de densidade média preconizado ( $\text{g/cm}^3$ ) |
|-------------|--------------------------------------------------------------|
| ABNT (2024) | $0,55 < D < 0,75$                                            |
| ANSI (2022) | $0,64 < D < 0,80$                                            |
| EN (2010)   | $0,55 < D < 0,80$                                            |
| CS (1966)   | $0,60 < D < 0,80$                                            |

Fonte: Adaptado de ABNT, 2024; ANSI, 2022; EN, 2010 e CS, 1966

### 3.5.2 Teor de umidade (U)

Para determinação do teor de umidade dos painéis das diferentes composições propostas foram igualmente adotados doze CP's com dimensões de 50 mm x 50 mm seguindo as recomendações contidas no Anexo - F da ABNT (2024), entretanto, os CP's não foram dispostos em câmara com controle de temperatura e umidade, com intuito de aferir a real umidade do CP exposto ao meio.

Com auxílio de balança (precisão de 0.001g) determinou-se a massa de cada CP. Este valor foi nomeado de massa úmida. Em seguida os CP's foram secos em estufa com termostato regulador à temperatura de  $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  até a obtenção de massa constante (Equação 4). Após a secagem e esfriamento em dessecador foi aferida a massa seca de cada CP. A Tabela 7 apresenta os intervalos normativos de teor de umidade para os documentos normativos adotados.

A equação (4) foi empregada para cálculo do teor de umidade dos corpos de prova ensaiados e a média aritmética simples entre eles representa o teor de umidade da composição estudada com base nesta amostra investigada.

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

$U$ : Teor de umidade do corpo de prova (%);

$Mu$ : Massa úmida do corpo de prova (g) e

$Ms$ : Massa seca do corpo de prova (g).

Tabela 7 – Intervalos preconizados pelos documentos normativos de teores de umidade de painéis de partícula

| Norma       | Teor de umidade preconizado (%) |
|-------------|---------------------------------|
| ABNT (2024) | $5 < U < 13$                    |
| ANSI (2022) | $U < 10$                        |
| EN (2010)   | $5 < U < 13$                    |
| CS (1966)   | $U < 10$                        |

Fonte: Adaptado de ABNT, 2024; ANSI, 2022; EN, 2010 e CS, 1966

### 3.5.3 Inchamento em espessura após 24h (I)

Assim como no ensaio de densidade, doze CP's foram empregados para aferição do inchamento em espessura e mantidos em câmara climática em ambiente controlado com  $60\% \pm 5\%$  de umidade relativa e  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  de temperatura até alcançar a umidade de equilíbrio de acordo com o Anexo - L da ABNT (2024).

A espessura de cada CP foi aferida com auxílio de micrômetro (precisão de 0.001 mm) no cruzamento das suas diagonais. Em seguida os CP's foram submersos em água deionizada à temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  com cuidado para que a face

superior do corpo de prova ficasse a pelo menos 25 mm abaixo da lâmina de superfície de água do recipiente (Figura 52).

Figura 52 – Malha metálica para garantir a submersão dos CP's ensaiados em água deionizada



Fonte: Acervo do autor

Após 24 horas  $\pm$  36 min os CP's foram retirados do sistema, secos superficialmente com papel absorvente e sua espessura novamente aferida no ponto de intersecção das diagonais. A equação (5) foi empregada no cálculo do inchamento em espessura dos corpos de prova. A média aritmética simples dos valores encontrados confere à composição o teor de umidade médio.

$$I = \frac{E1 - E0}{E0} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

*I*: Inchamento em espessura do corpo de prova (%);

*E1*: Espessura do corpo de prova após o período de 24 horas de imersão (mm) e

*E0*: Espessura do corpo de prova antes da imersão (mm).

A Tabela 8 apresenta as exigências mínimas quanto ao inchamento em espessura após 24 horas das classificações normativas de painéis de partículas com espessura entre 6 e 13 milímetros em vigência.

Tabela 8 – Inchamento em espessura após 24 horas máximo por finalidade de uso

| Classificação<br>ABNT (2024) | I máximo<br>espessuras<br>(> 6 a 13) mm<br>(%) | Classificação<br>EN (2010) | I máximo<br>espessuras<br>(> 6 a 13) mm<br>(%) |
|------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|
| P2                           | 22                                             | P3                         | 17                                             |
| P3                           | 17                                             | P4                         | 16                                             |
| P4                           | 16                                             | P5                         | 11                                             |
| P5                           | 11                                             | P6                         | 16                                             |
| P6                           | 16                                             | P7                         | 10                                             |
| P7                           | 10                                             | -                          | -                                              |

Fonte: Adaptado de ABNT, 2024 e EN, 2010

### 3.5.4 Absorção de água após 24h (AA)

Os procedimentos para aferição da absorção de água dos CP's é o mesmo apresentado anteriormente para aferição do inchamento em espessura, entretanto, a aferição de espessura é substituída pela aferição da massa dos CP's. A massa seca dos corpos de prova é aferida antes da submersão com auxílio de balança (precisão de 0.001g) e após o período de 24 horas  $\pm$  36 min submerso é aferida a massa úmida após secagem superficial das faces dos CP's.

A equação (6) apresenta o método de cálculo da absorção de cada CP. A média aritmética simples entre os valores encontrados representa a absorção média da composição estudada.

$$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

AA: Absorção do corpo de prova (%);

Mu: Massa úmida do corpo de prova (g) e

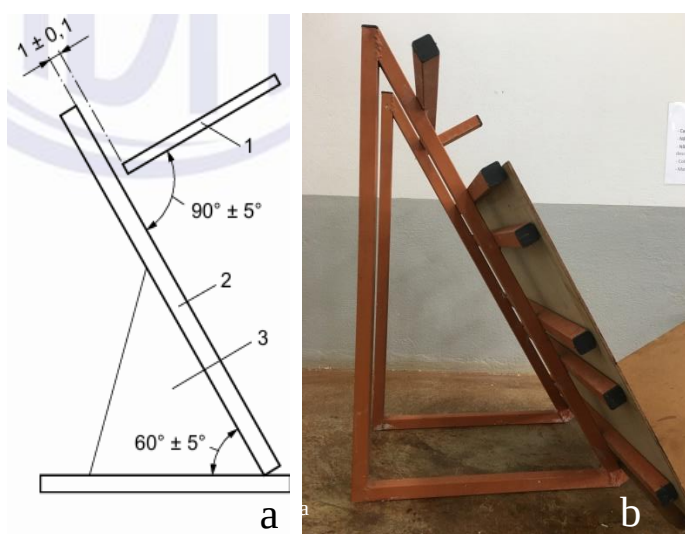
Ms: Massa seca do corpo de prova (g).

### 3.5.5 Absorção superficial (AS)

Três corpos de prova com dimensões de 300 mm x 100 mm foram empregados para avaliação da absorção superficial de cada composição estudada. A estabilização da umidade dos CP's se deu em câmara climática com controle de temperatura ( $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa de ( $65\% \pm 5\%$ ).

Os CP's foram posicionados com inclinação em relação à horizontal de  $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$  com auxílio da aparelhagem apresentada na Figura 53. Através de uma pipeta graduada classe A, tipo 2 com capacidade nominal de 2 ml – posicionada sob ângulo de  $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$  em relação ao CP a uma distância de 1 mm de sua superfície – foi descarregado 1 ml de tolueno de grau analítico, com pureza de 99,5%, na face do CP por 4 segundos  $\pm$  1 segundo de forma que o tolueno escorresse livremente sobre a face do corpo de prova.

Figura 53 – Esquadro empregado para manutenção da inclinação de  $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$ : (a) esquema normativo ABNT (2024), e (b) aparelhagem empregada no ensaio



Fonte: (a) ABNT, 2024 e (b) acervo do autor

Em seguida, foi realizada a medição do comprimento máximo da mancha causada pelo escorrimento do tolueno sobre a face do CP em milímetros (precisão de  $\pm 1\text{mm}$ ). A absorção superficial do CP é expressa pelo comprimento da mancha de tolueno. A absorção superficial da composição é dada pela média aritmética simples dos resultados dos CP's ensaiados.

### 3.6 ENSAIOS MECÂNICOS

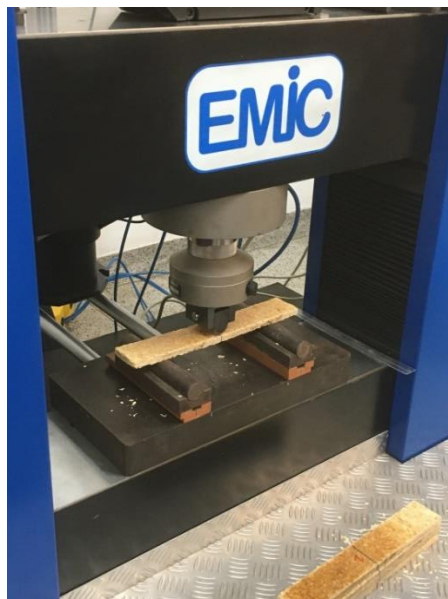
Os ensaios mecânicos foram realizados no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Alvenaria Estrutural – NEPAE, anexo ao Laboratório de Engenharia Civil do Campus central da FEIS/UNESP. Foi utilizada a máquina universal de ensaios EMIC GR048 com capacidade de carga de 300 kN.

Os CP's utilizados nos ensaios mecânicos propostos neste trabalho foram todos estabilizados em câmara climática até atingir o teor de umidade equilíbrio nas mesmas condições apresentadas para o ensaio de densidade (D), inchamento (I), absorção (AA) e absorção superficial (AS).

#### 3.6.1 Módulo de resistência à flexão estática (MOR)

Para a determinação do Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR) foram utilizados 10 CP's de cada composição com dimensões de  $(20 \times E + 50)$  mm x 50 mm, sendo E a espessura do CP em milímetros, de acordo com o Anexo – K da ABNT (2024). A velocidade do ensaio foi constante, sendo que a ruptura do corpo de prova aconteceu no intervalo de 60 segundos  $\pm$  30 segundos. A Figura 54 apresenta o esquema empregado para realização do ensaio de flexão estática.

Figura 54 – Ensaio de flexão estática com dois apoios e aplicação de carga no centro de um corpo de prova da composição C3<sup>20</sup>



Fonte: Acervo do autor

A resistência à flexão estática de cada CP foi calculada de acordo com a equação (7). A média aritmética simples dos valores calculados representa o módulo de resistência à flexão estática médio da composição estudada com precisão de 1 N/mm².

$$MOR = \frac{1,5 \ (P \ x \ Da)}{B \ x \ (E)^2}$$

(7)

Onde:

*MOR* : Módulo de resistência à flexão estática (N/mm²);

*P*: Carga de ruptura lida no indicador de cargas (N);

*Da*: Distância entre os apoios (mm);

*B*: Largura do corpo de prova (mm) e

*E*: Espessura do corpo de prova (mm).

A Tabela 9 apresenta as exigências mínimas quanto ao MOR das classificações normativas de painéis de partículas com espessura entre 6 e 13 milímetros em vigência.

Tabela 9 - Módulo de resistência à flexão estática mínimo por finalidade de uso

| Classificação<br>ABNT (2024) | MOR mínimo<br>espessuras<br>> 6 a 13) mm<br>(N/mm²) | Classificação<br>ANSI (2022) | MOR mínimo<br>espessuras<br>> 6 a 13) mm<br>(N/mm²) | Classificação<br>EN (2010) | MOR mínimo<br>espessuras<br>> 6 a 13) mm<br>(N/mm²) |
|------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| P2                           | 11,0                                                | LD-1                         | 3,0                                                 | P1                         | 10,5                                                |
| P3                           | 15,0                                                | LD-2                         | 5,0                                                 | P2                         | 11,0                                                |
| P4                           | 16,0                                                | M-1                          | 11,0                                                | P3                         | 15,0                                                |
| P5                           | 18,0                                                | M-S                          | 12,5                                                | P4                         | 16,0                                                |
| P6                           | 20,0                                                | M-2                          | 14,5                                                | P5                         | 18,0                                                |
| P7                           | 22,0                                                | M-3                          | 16,5                                                | P6                         | 20,0                                                |

Fonte: Adaptado de ABNT, 2024; ANSI, 2022 e EN, 2010

### 3.6.2 Módulo de elasticidade (MOE)

Para a determinação do Módulo de Elasticidade (MOE) foram utilizados os mesmos 10 CP's de cada composição empregados no ensaio de MOR, seguindo as prescrições do Anexo – K da ABNT (2024). A Figura 55 destaca com detalhes a execução do ensaio de um corpo de prova da composição C1<sup>30</sup>.

Figura 55 – Ensaio de flexão estática de um CP da composição C1<sup>20</sup>



Fonte: Acervo do autor

O módulo de elasticidade de cada CP foi calculado de acordo com a equação (8). A média aritmética simples dos valores calculados representa o módulo de elasticidade médio da composição estudada com precisão de 10 N/mm<sup>2</sup>.

$$MOE = \frac{P1 \times (Da)^3}{d \times 4 \times B \times (E)^3} \quad (8)$$

Onde:

*MOE*: Módulo de elasticidade (N/mm<sup>2</sup>);

*P1*: Carga no limite proporcional, lida no indicador de cargas (N);

*Da*: Distância entre os apoios do aparelho (mm);

*d*: Deflexão correspondente à carga *P1* (mm);

*B*: Largura do corpo de prova (mm) e

*E*: Espessura do corpo de prova (mm).

A Tabela 10 apresenta as exigências mínimas quanto ao MOE das classificações normativas de painéis de partículas com espessura entre 6 e 13 milímetros em vigência.

Tabela 10 - Módulo de elasticidade mínimo por finalidade de uso

| Classificação<br>ABNT (2024) | MOE mínimo<br>espessuras<br>(> 6 a 13) mm<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Classificação<br>ANSI (2022) | MOE mínimo<br>espessuras<br>(> 6 a 13) mm<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Classificação<br>EN (2010) | MOE mínimo<br>espessuras<br>(> 6 a 13) mm<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| P2                           | 1800                                                              | LD-1                         | 550                                                               | P1                         | -                                                                 |
| P3                           | 2050                                                              | LD-2                         | 1025                                                              | P2                         | 1800                                                              |
| P4                           | 2300                                                              | M-1                          | 1725                                                              | P3                         | 2050                                                              |
| P5                           | 2550                                                              | M-S                          | 1900                                                              | P4                         | 2300                                                              |
| P6                           | 3150                                                              | M-2                          | 2250                                                              | P5                         | 2550                                                              |
| P7                           | 3350                                                              | M-3                          | 2750                                                              | P6                         | 3150                                                              |

Fonte: Adaptado de ABNT, 2024; ANSI, 2022 e EN, 2010

### 3.6.3 Resistência à tração perpendicular (TP)

Para o cálculo da resistência à tração perpendicular, Anexo J da ABNT (2024), utilizou-se dez CP's para cada composição proposta, com dimensões de 50 mm x 50 mm.

Inicialmente as faces dos CP's foram homogeneizadas com auxílio de lixa de grana 80 com objetivo de regularização da superfície e melhorar a adesão aos suportes metálicos. Em seguida foram aferidas as dimensões longitudinal e transversal dos CP's com auxílio de paquímetro (precisão de 0.01mm).

Cada corpo de prova foi colado a um par de suportes metálicos pelas suas superfícies superior e inferior com adesivo epóxi Araldite Hobby da marca Tek Bond, respeitando o tempo de secagem inicial de 10 minutos proposto pelo fabricante.

A ruptura dos CP's ocorreu dentro do intervalo de 60 segundos  $\pm$  30 segundos do início do ensaio, como prevê o documento normativo ABNT (2024)

(Figura 56). O cálculo da resistência à tração perpendicular dos CP's foi realizado de acordo com as equações (9) e (10) a seguir:

Figura 56 – Corpo de prova posicionado na máquina universal de ensaios: (a) antes da ruptura, e (b) após a ruptura



Fonte: Acervo do autor

$$TP = \frac{P}{S} \quad (9)$$

Sendo:

$$S = b1 \times b2 \quad (10)$$

Onde:

$TP$ : Resistência à tração perpendicular (N/mm<sup>2</sup>);

$P$ : Carga de ruptura (N);

$S$ : Área da superfície do corpo de prova (mm<sup>2</sup>) e

$b1$  e  $b2$ : Dimensões do corpo de prova (mm).

A Tabela 11 apresenta as exigências mínimas quanto à TP das classificações normativas de painéis de partículas com espessura entre 6 e 13 milímetros em vigência.

Tabela 11 – Resistência à tração perpendicular mínima por finalidade de uso

| Classificação ABNT (2024) | TP mínima espessuras (> 6 a 13) mm (N/mm <sup>2</sup> ) | Classificação ANSI (2022) | TP mínima espessuras (> 6 a 13) mm (N/mm <sup>2</sup> ) | Classificação EN (2010) | TP mínima espessuras (> 6 a 13) mm (N/mm <sup>2</sup> ) |
|---------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------|
| P2                        | 0,40                                                    | LD-1                      | 0,10                                                    | P1                      | 0,28                                                    |
| P3                        | 0,45                                                    | LD-2                      | 0,15                                                    | P2                      | 0,40                                                    |
| P4                        | 0,40                                                    | M-1                       | 0,40                                                    | P3                      | 0,45                                                    |
| P5                        | 0,45                                                    | M-S                       | 0,40                                                    | P4                      | 0,40                                                    |
| P6                        | 0,60                                                    | M-2                       | 0,45                                                    | P5                      | 0,45                                                    |
| P7                        | 0,75                                                    | M-3                       | 0,55                                                    | P6                      | 0,60                                                    |

Fonte: Adaptado de ABNT, 2024; ANSI, 2022 e EN, 2010

### 3.7.1 Microscopia Óptica (MO)

A microscopia óptica foi realizada através de microscópio binocular LED B10+ da marca BIOPTICA AC85 240v em amostras extraídas de corpos de prova com dimensões de 1.0 x 1.0 x 0.5 cm (Figura 57) com intuito de investigar a compactação das partículas de madeira e densificação dos painéis produzidos com aumentos de 40 vezes contribuindo para melhor interpretação da estrutura microscópica, garantindo detalhes que não seriam apreciados a olho nu (SOUZA, 2025).

Figura 57 – Amostras empregadas nas análises de microscopia



Fonte: Acervo do autor

### **3.7.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) investigou a interação entre o adesivo alternativo e a madeira de pinus, além de analisar o encapsulamento das partículas frente ao aumento do teor de adesivo. As amostras com dimensões de  $1.0 \times 1.0 \times 0.5$  cm (Figura 57) foram montadas em suportes de fixação com fita de carbono, revestidas com ouro (Quarum Q150TE), e analisadas por MEV (ZEISS EVO LS15 com EDS da OXFORD Instruments, modelo INCAX-act, Oberkochen, Alemanha). A interação entre os componentes do painel foi analisada por meio de exames visuais, com aumentos de 100, 250 e 500 vezes, onde os vazios e a rugosidade da superfície foram avaliados com base nos teores de adesivo.

## **3.8 AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS**

O teste de contraste de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância, foi utilizado para verificar a influência dos diferentes teores de adesivo alternativo e proporções entre PETr e breu nos painéis produzidos.

Do teste de Tukey, (A) denota o grupo associado ao maior valor médio da propriedade investigada, (B) o grupo com o segundo maior valor médio e assim sucessivamente, e letras iguais implicam em composições distintas com médias estatisticamente equivalentes.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 ENSAIOS FÍSICOS**

#### **4.1.1 Densidade (D)**

A partir dos procedimentos de ensaio apresentados no Capítulo Materiais e Métodos, foram avaliadas as densidades dos CP's extraídos dos três painéis de cada composição proposta. A Tabela 12 apresenta os valores de densidade.

Tabela 12 – Valores médios de densidade, respectivos coeficientes de variação e máxima variação percentual da densidade das composições estudadas

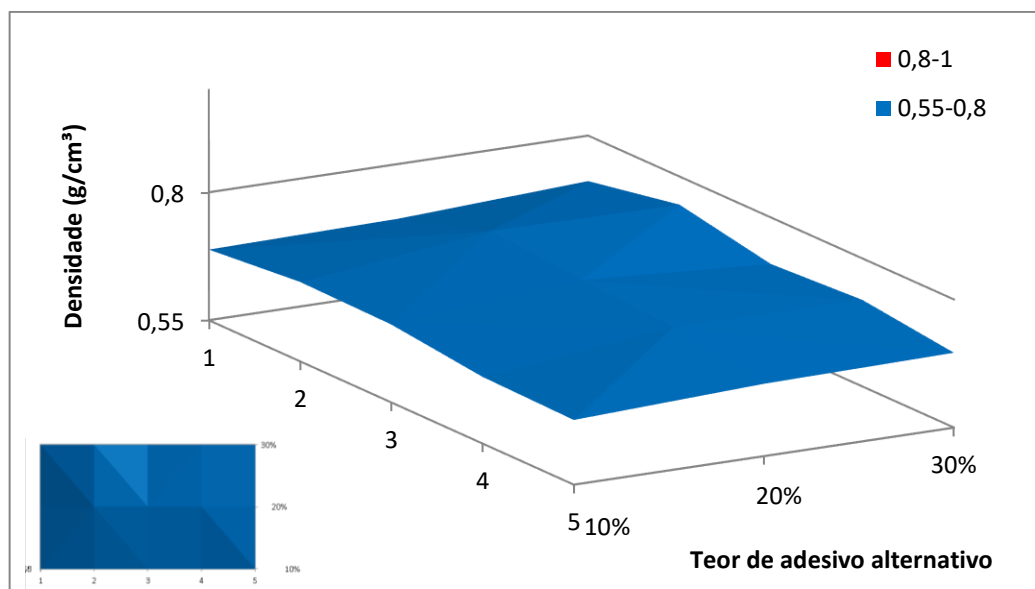
| Composições      | D média<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | CV<br>(%) | D<br>(%) | Classificação  |                |              |              |
|------------------|---------------------------------|-----------|----------|----------------|----------------|--------------|--------------|
|                  |                                 |           |          | ABNT<br>(2024) | ANSI<br>(2022) | EN<br>(2010) | CS<br>(1966) |
| C1 <sup>10</sup> | 0,688                           | 2,309     | 4        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C2 <sup>10</sup> | 0,705                           | 1,980     | 4        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C3 <sup>10</sup> | 0,702                           | 1,176     | 3        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C4 <sup>10</sup> | 0,680                           | 1,580     | 3        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C5 <sup>10</sup> | 0,676                           | 1,355     | 3        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C1 <sup>20</sup> | 0,693                           | 2,007     | 4        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C2 <sup>20</sup> | 0,749                           | 1,747     | 4        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C3 <sup>20</sup> | 0,733                           | 2,135     | 5        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C4 <sup>20</sup> | 0,721                           | 1,354     | 3        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C5 <sup>20</sup> | 0,691                           | 2,311     | 5        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C1 <sup>30</sup> | 0,711                           | 1,910     | 4        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C2 <sup>30</sup> | 0,745                           | 1,957     | 3        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C3 <sup>30</sup> | 0,709                           | 1,672     | 4        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C4 <sup>30</sup> | 0,719                           | 0,817     | 2        | ok             | ok             | ok           | ok           |
| C5 <sup>30</sup> | 0,696                           | 2,172     | 5        | ok             | ok             | ok           | ok           |

Fonte: Elaboração do próprio autor

São apresentados os coeficiente de variação das densidades médias, seguido da maior variação percentual da densidade (D%), com precisão de 1%, como base na prescrição do documento normativo brasileiro (ABNT, 2024). A Tabela 12 apresenta ainda o atendimento de cada composição aos intervalos propostos por cada norma, que foram anteriormente apresentados na Tabela 6 do item 3.5.1.

A Figura 58 apresenta um gráfico de superfície que apresenta os valores médios de densidade de todas as composições e evidencia o atendimento aos intervalos normativos destacando em diferentes cores o atendimento às normas.

Figura 58 – Malha delineada pelas densidades médias das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

Como a densidade nominal foi fixada em  $0,7 \text{ g/cm}^3$ , a densidade média efetiva dos painéis se aproximou deste valor uma vez que os materiais constituintes foram pesados antes da homogeneização e compactação dos painéis de partícula.

Através dos resultados da razão de compactação apresentados na tabela 13, pode-se observar que as partículas de PETr (densidade:  $1,365 \text{ g/cm}^3$ ) e de breu (densidade:  $1,070 \text{ g/cm}^3$ ) contribuíram para o aumento da densidade das composições propostas, uma vez que a densidade da madeira de pinus envolvida na produção dos painéis alternativos era igual a  $0,630 \text{ g/cm}^3$ .

Tabela 13 - Valores da razão de compactação das composições estudadas

| Teores      |        |             |        |             |        |
|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| 10%         |        | 20%         |        | 30%         |        |
| Composições | Razão  | Composições | Razão  | Composições | Razão  |
| C1          | 0,8976 | C1          | 0,7674 | C1          | 0,6840 |
| C2          | 0,9287 | C2          | 0,8432 | C2          | 0,7323 |
| C3          | 0,9338 | C3          | 0,8392 | C3          | 0,7124 |
| C4          | 0,9135 | C4          | 0,8395 | C4          | 0,7389 |
| C5          | 0,9172 | C5          | 0,8187 | C5          | 0,7319 |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Como a razão de compactação relaciona a densidade média efetiva dos painéis produzidos para cada composição com a densidade das partículas empregadas, um aumento na densidade das partículas (devido ao acréscimo nos teores de PETr e breu) significa aumentar os valores dos denominadores da razão, resultando em uma menor razão de compactação.

Os menores valores de razão de compactação influenciam diretamente nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos, uma vez que aumenta a quantidade de vazios dos painéis (IWAKIRI, 2020).

Por outro lado, o aumento percentual de PETr e breu nas composições contribui para o encolamento das partículas de madeira, uma vez que, neste estudo, atuam como ligante alternativo.

Sendo assim, se as densidades do PETr e do breu não forem consideradas no cálculo da razão de compactação (por não se enquadrarem como material de enchimento), os valores aumentam consideravelmente e não observaremos uma diminuição na razão de compactação com o aumento do teor de ligante alternativo.

A Tabela 14 apresenta os valores da razão de compactação atendendo a este entendimento.

Tabela 14 - Valores da razão de compactação das composições estudadas considerando apenas a densidade da madeira de pinus

| Teores      |        |             |        |             |        |
|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| 10%         |        | 20%         |        | 30%         |        |
| Composições | Razão  | Composições | Razão  | Composições | Razão  |
| C1          | 1,0921 | C1          | 1,1000 | C1          | 1,1286 |
| C2          | 1,1190 | C2          | 1,1889 | C2          | 1,1825 |
| C3          | 1,1143 | C3          | 1,1635 | C3          | 1,1254 |
| C4          | 1,0794 | C4          | 1,1444 | C4          | 1,1413 |
| C5          | 1,0730 | C5          | 1,0968 | C5          | 1,1048 |

Fonte: Elaboração do próprio autor

### 4.1.2 Teor de umidade (U)

Os documentos normativos brasileiro ABNT (2024) e europeu EN (2010) preconizam um intervalo entre 5% e 13% de teor de umidade para painéis de partícula, enquanto os americanos ANSI (2022) e CS (1966) estipulam o limite superior de 10%. A Tabela 15 apresenta os valores médios de teor de umidade das composições propostas e o atendimento aos critérios normativos.

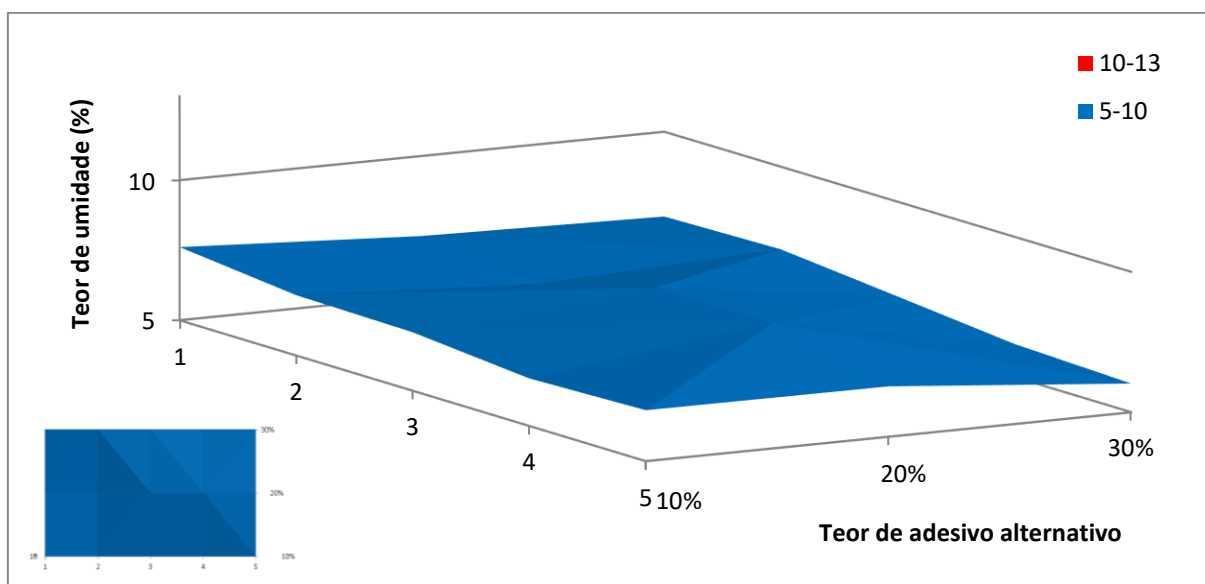
Tabela 15 - Valores médios de teor de umidade e respectivos coeficientes de variação das composições estudadas

| Composições      | U (%) | CV (%) | Classificação |             |           |           |
|------------------|-------|--------|---------------|-------------|-----------|-----------|
|                  |       |        | ABNT (2024)   | ANSI (2022) | EN (2010) | CS (1966) |
| C1 <sup>10</sup> | 7,61  | 3,41   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C2 <sup>10</sup> | 7,15  | 3,62   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C3 <sup>10</sup> | 7,08  | 2,31   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C4 <sup>10</sup> | 6,69  | 3,34   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C5 <sup>10</sup> | 6,81  | 4,19   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C1 <sup>20</sup> | 7,14  | 2,98   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C2 <sup>20</sup> | 6,69  | 3,16   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C3 <sup>20</sup> | 7,80  | 4,32   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C4 <sup>20</sup> | 7,78  | 4,11   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C5 <sup>20</sup> | 6,79  | 4,21   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C1 <sup>30</sup> | 6,97  | 4,05   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C2 <sup>30</sup> | 7,05  | 3,43   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C3 <sup>30</sup> | 6,62  | 4,37   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C4 <sup>30</sup> | 6,18  | 3,83   | ok            | ok          | ok        | ok        |
| C5 <sup>30</sup> | 6,02  | 3,19   | ok            | ok          | ok        | ok        |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Todos os painéis das composições propostas atenderam aos intervalos normativos impostos. A Figura 59 apresenta um gráfico de superfície que apresenta os valores médios de teor de umidade de todas as composições e evidencia o atendimento aos limites normativos.

Figura 59 – Malha delineada pelos teores de umidade médios das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

#### 4.1.3 Inchamento em espessura após 24h (I)

Na Tabela 16 são apresentados os valores médios de Inchamento em espessura após 24 horas obtidos dos corpos de prova ensaiados dos painéis de partícula produzidos para cada composição, acompanhados de seu coeficiente de variação. Associado a eles, é apresentada a classificação quanto à finalidade de uso, conforme os padrões descritos no item 3.5.3 referentes aos valores de inchamento em espessura.

É possível observar que o coeficiente de variação das composições estudadas foi alto, indicando grandes variações entre os valores médios de cada CP ensaiado.

Pode-se observar ainda, que não há diferença significativa entre as composições que continham 10% de adesivo alternativo em relação à massa de madeira. Isso pode indicar que o inchamento, para este grupo, se deu não pelas

proporções de adesivo ou sua origem alternativa, mas sim por sua escassez, dificultando a adesão das partículas de madeira e deixando o painel suscetível às ações da umidade e a taxas de inchamento mais elevadas.

Tabela 16 - Valores médios de inchamento em espessura após 24 horas e respectivos coeficientes de variação das composições estudadas

| Composições      | I<br>(%) | CV<br>(%) | Classificação  |              |
|------------------|----------|-----------|----------------|--------------|
|                  |          |           | ABNT<br>(2024) | EN<br>(2010) |
| C1 <sup>10</sup> | 40,67    | 9,03      | -              | -            |
| C2 <sup>10</sup> | 38,89    | 9,76      | -              | -            |
| C3 <sup>10</sup> | 39,11    | 8,02      | -              | -            |
| C4 <sup>10</sup> | 40,41    | 11,00     | -              | -            |
| C5 <sup>10</sup> | 42,96    | 11,57     | -              | -            |
| C1 <sup>20</sup> | 34,51    | 8,99      | -              | -            |
| C2 <sup>20</sup> | 30,61    | 9,82      | -              | -            |
| C3 <sup>20</sup> | 31,56    | 7,02      | -              | -            |
| C4 <sup>20</sup> | 33,19    | 8,55      | -              | -            |
| C5 <sup>20</sup> | 39,58    | 6,47      | -              | -            |
| C1 <sup>30</sup> | 25,34    | 9,94      | -              | -            |
| C2 <sup>30</sup> | 19,28    | 8,90      | P2             | -            |
| C3 <sup>30</sup> | 19,66    | 8,13      | P2             | -            |
| C4 <sup>30</sup> | 25,63    | 7,37      | -              | -            |
| C5 <sup>30</sup> | 33,13    | 7,23      | -              | -            |

Fonte: Elaboração do próprio autor

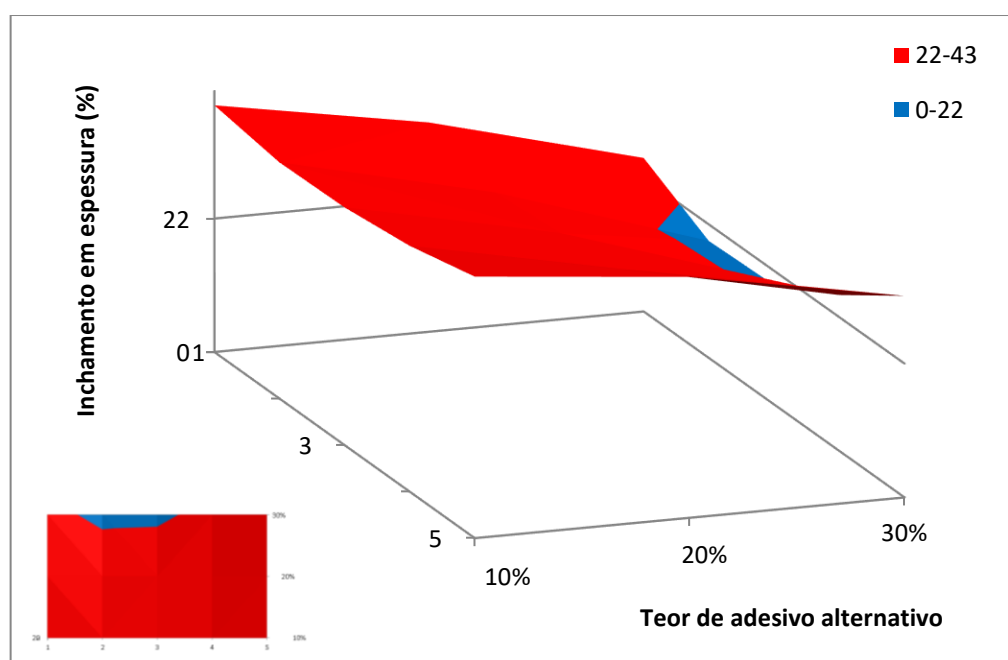
Através dos resultados obtidos, foi possível observar que os adesivos alternativos estudados apresentam certas limitações quando exposto à submersão em água, especialmente quando as composições com 100% de breu colofônia foram analisadas.

CARVALHO (2025) produziu painéis de partícula homogêneos empregando apenas breu colofônia como ligante alternativo em um teor de 20% em sua composição denominada M1. Os valores de inchamento em espessura após 24 horas médios relatados foram de 98, 58% (14,44), o que implica em uma espessura final igual ao dobro da espessura inicial do corpo de prova.

A diferença significativa entre os valores relatados no estudo citado acima e os apresentados nesta pesquisa para o grupo C5<sup>20</sup> (20% de resina com 0% de PETr e 100% de breu colofônia) de 39,58% (6,47) podem estar relacionados à densidade nominal adotada na produção dos painéis que foi de 0,4 g/cm<sup>3</sup> (CARVALHO, 2025), frente à 0,7 g/cm<sup>3</sup> desta pesquisa. Segundo Iwakiri (2020) a densidade nominal dos painéis influencia diretamente em suas propriedades físicas e mecânicas.

A Figura 60 apresenta o gráfico de superfície com os valores médios de inchamento em espessura após 24 horas de todas as composições. Em vermelho são destacadas as composições que tiveram inchamento em espessura superior a 22% - máximo valor normativo aceitável para esta propriedade física. Em azul, aquelas que tiveram inchamento inferior a 22% (C2<sup>30</sup> e C3<sup>30</sup>).

Figura 60 – Malha delineada pelos resultados de inchamento em espessura após 24 horas das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

O inchamento em espessura dos corpos de prova submetidos a este ensaio físico se apresentou elevado, com tendência de diminuição gradual com o aumento do teor de adesivo alternativo. A Figura 61 apresenta um corpos de prova da composição C5<sup>10</sup> (composto por teor de 10% de resina alternativa em relação à massa seca de madeira com proporção de 0% PETr e 100% breu) logo após a aferição da espessura, posterior à imersão em água deionizada por 24 horas.

Figura 61 – Corpo de prova n°9 da composição C5<sup>10</sup> após 24 horas de imersão em água deionizada



Fonte: Acervo do autor

#### 4.1.4 Absorção (AA)

O ensaio para avaliação da propriedade física de absorção de água após 24 horas foi realizado em continuidade com a avaliação do inchamento em espessura. A Tabela 17 apresenta os valores médios de absorção de água obtidos através dos CP's ensaiados para cada composição, acompanhados de seu coeficiente de variação.

Pode-se observar, através dos dados acima, que não houve diferença significativa entre os valores de absorção de água com o aumento do teor de adesivo alternativo. Especialmente quando comparamos as composições C5<sup>10</sup>, C5<sup>20</sup> e C5<sup>30</sup> aglutinadas com adesivo alternativo de breu colofônia em teores de 10%, 20% e 30% respectivamente.

Carvalho (2025) relataram valores de 84,55% (12,13) para painéis homogêneos de madeira de pinus e 20% de breu colofônia como adesivo alternativo em relação à massa seca de madeira.

Tabela 17 - Valores médios de absorção de água após 24 horas e respectivos coeficientes de variação das composições estudadas

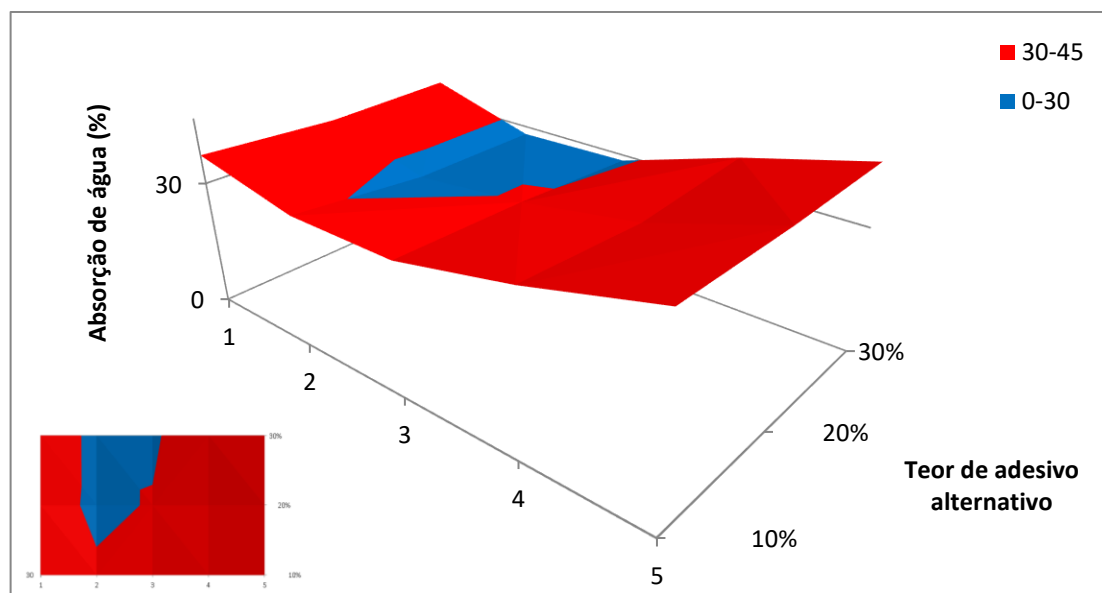
| Composições      | AA (%) | CV (%) |
|------------------|--------|--------|
| C1 <sup>10</sup> | 36,69  | 4,60   |
| C2 <sup>10</sup> | 31,34  | 8,65   |
| C3 <sup>10</sup> | 31,45  | 5,95   |
| C4 <sup>10</sup> | 37,37  | 4,22   |
| C5 <sup>10</sup> | 45,37  | 7,29   |
| C1 <sup>20</sup> | 34,75  | 4,80   |
| C2 <sup>20</sup> | 28,02  | 5,87   |
| C3 <sup>20</sup> | 30,58  | 3,84   |
| C4 <sup>20</sup> | 35,21  | 7,16   |
| C5 <sup>20</sup> | 44,18  | 5,06   |
| C1 <sup>30</sup> | 35,43  | 5,08   |
| C2 <sup>30</sup> | 27,98  | 4,43   |
| C3 <sup>30</sup> | 28,61  | 5,74   |
| C4 <sup>30</sup> | 37,25  | 5,57   |
| C5 <sup>30</sup> | 44,30  | 4,13   |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os documentos normativos nacional e internacionais não apresentam o valor máximo aceitável para absorção de água, sendo assim, com base nos resultados encontrados, foi fixado no gráfico o plano que corta o eixo vertical à altura de 30 unidades percentuais. Com isso, é possível observar em azul as composições que

obtiveram absorção de água após 24 horas inferiores a 30% enquanto em vermelho são discriminadas as que superaram esta marca (Figura 62).

Figura 62 – Malha delineada pelos resultados de absorção de água após 24 horas das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

Cazella (2024) observaram que a substituição parcial de madeira de pinus por PETr em composições de painéis de partículas aglutinados com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona – a um teor de 10% em relação à massa seca de madeira, contribuíram para a diminuição expressiva dos resultados de absorção de água após 24 horas, reduzindo a absorção da ordem de 80% (painéis sem substituição de madeira por PETr) para ordem de 30% (painéis com substituição parcial de 30%) e de 10% (painéis com substituição parcial de 50%).

#### 4.1.5 Absorção Superficial (AS)

A Figura 63 apresenta imagens de alguns corpos de prova durante o ensaio de absorção superficial. Visualmente é possível observar a diferença entre o escoamento do tolueno – denotado pelo comprimento máximo da mancha medida paralelamente às bordas laterais – para as diferentes composições.

A Tabela 18 apresenta os resultados de absorção superficial média das composições estudadas com base nos corpos de prova ensaiados e seus respectivos coeficientes de variação.

Figura 63 – Escorrimento do tolueno de grau analítico em ensaio de absorção superficial para diferentes composições: (a) C1<sup>10</sup>, (b) C2<sup>10</sup>, (c) C3<sup>20</sup>, e (d) C5<sup>30</sup>



Fonte: Acervo do autor

Tabela 18 - Valores médios de absorção superficial das composições estudadas

| Composições      | Comprimento máximo da mancha (cm) | CV (%) |
|------------------|-----------------------------------|--------|
| C1 <sup>10</sup> | 4,97                              | 1,95   |
| C2 <sup>10</sup> | 5,06                              | 7,06   |
| C3 <sup>10</sup> | 6,76                              | 4,04   |
| C4 <sup>10</sup> | 7,17                              | 4,35   |
| C5 <sup>10</sup> | 10,38                             | 5,45   |
| C1 <sup>20</sup> | 5,23                              | 1,96   |
| C2 <sup>20</sup> | 6,37                              | 5,90   |
| C3 <sup>20</sup> | 7,82                              | 3,63   |
| C4 <sup>20</sup> | 8,51                              | 6,05   |
| C5 <sup>20</sup> | 13,04                             | 6,04   |
| C1 <sup>30</sup> | 5,64                              | 1,38   |
| C2 <sup>30</sup> | 7,22                              | 4,02   |
| C3 <sup>30</sup> | 10,18                             | 3,53   |
| C4 <sup>30</sup> | 12,75                             | 3,49   |
| C5 <sup>30</sup> | 16,11                             | 5,82   |

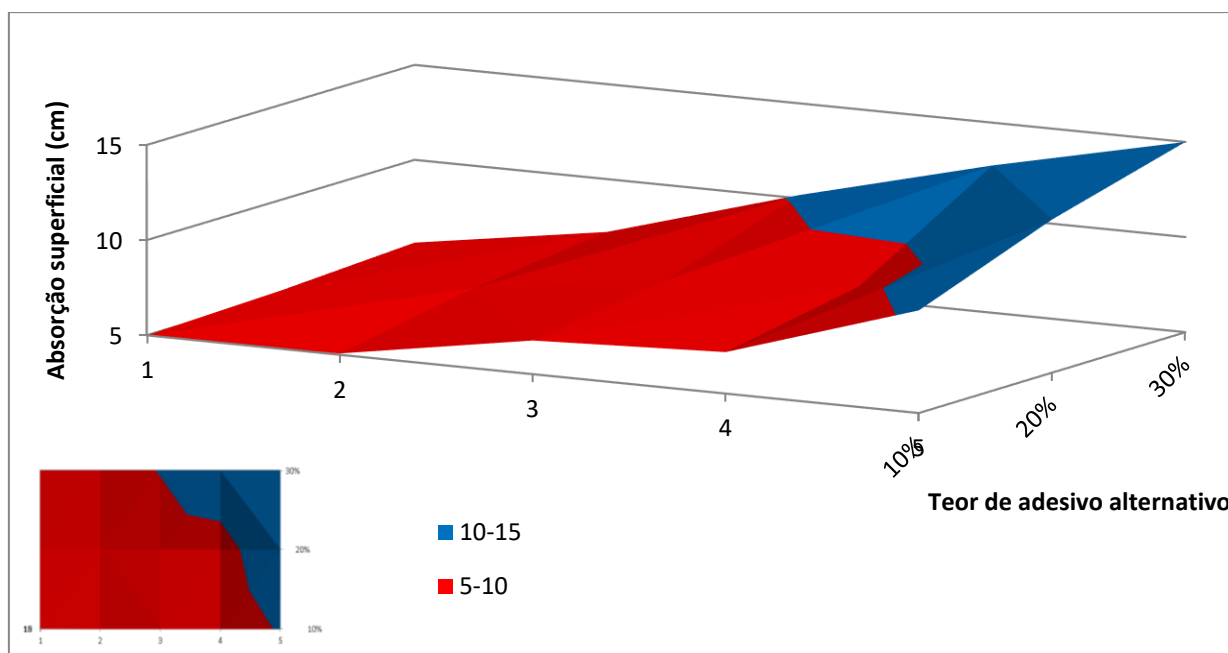
Fonte: Elaboração do próprio autor

A Figura 64 apresenta os valores aferidos no ensaio e apresentados anteriormente. Destaca-se que, assim como no ensaio de absorção de água após 24 horas (AA), os documentos normativos nacional e internacionais não prescrevem valores máximos e mínimos de absorção superficial.

Por outro lado, entende-se, por este ensaio, que quanto maior o comprimento da mancha ao longo do comprimento longitudinal do CP, menor é a taxa de absorção superficial, como evidenciado anteriormente na Figura 63.

Sendo assim, e levando em consideração os resultados obtidos neste ensaio, foram destacadas em vermelho as composições que tiveram comprimento máximo de mancha entre 5 e 10 centímetros (mais permeáveis) e em azul aquelas que tiveram comprimento máximo da mancha entre 10 e 15 centímetros (menos permeáveis).

Figura 64 – Malha delineada pelos resultados de absorção superficial das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

É possível observar que as composições com maiores teores de adesivo alternativo apresentaram maior impermeabilidade frente às aquelas com menores teores de adesivo. Além disso, os resultados apontam que maiores proporções de breu colofônia em relação ao PET reciclado conferiram maior impermeabilidade superficial às composições estudadas.

Nakanishi (2019) estudaram a utilização de breu colofônia como revestimento impermeabilizante em painéis de partícula de origem alternativa em forma de filme superficial. Foram analisadas a rugosidade superficial e a superfície de revestimento dos painéis recobertos por breu colofônia. Os resultados indicaram que o revestimento de breu diminuiu significativamente a permeabilidade à água dos painéis. Os painéis sem filme plástico tiveram valores médios de inchamento em espessura e absorção de água de 12,90% (1,36) e 50,38% (2,64) respectivamente, enquanto os painéis cobertos pelo filme de breu colofônia tiveram valores de 2,43% (1,73) e 31,12% (7,35).

Os autores observaram ainda que os painéis cobertos por revestimento superficial de breu colofônia apresentaram característica hidrofóbica, com ângulo de contato igual a 106°. Ângulos de contato superiores a 90° ( $\theta > 90^\circ$ ) sugerem materiais hidrofóbicos.

## 4.2 ENSAIOS MECÂNICOS

A seguir, serão apresentados os resultados das avaliações de propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados, extraídos dos painéis de partículas produzidos para cada uma das composições.

### 4.2.1 Módulo de resistência à flexão estática (MOR)

A Tabela 19 apresenta os resultados médios de resistência à flexão estática, e seus respectivos coeficientes de variação, dos painéis avaliados no ensaio de flexão descrito no item 3.6.1 do capítulo 3. Materiais e Métodos. São destacados ainda a classificação de cada composição quanto ao atendimento aos critérios normativos nacional e internacionais.

Através dos resultados coletados é possível observar que as composições que apresentavam maiores teores de adesivo alternativo apresentaram sutil melhora quanto ao atendimento de classificações normativas quando comparadas àquelas que continham menores teores de adesivo. Além disso, é possível observar que quando a variável – teor de adesivo – era mantida, as composições que continham misturas de PETr e breu apresentavam melhor desempenho do que aquelas que continham apenas um dos adesivos como único aglutinante de partículas.

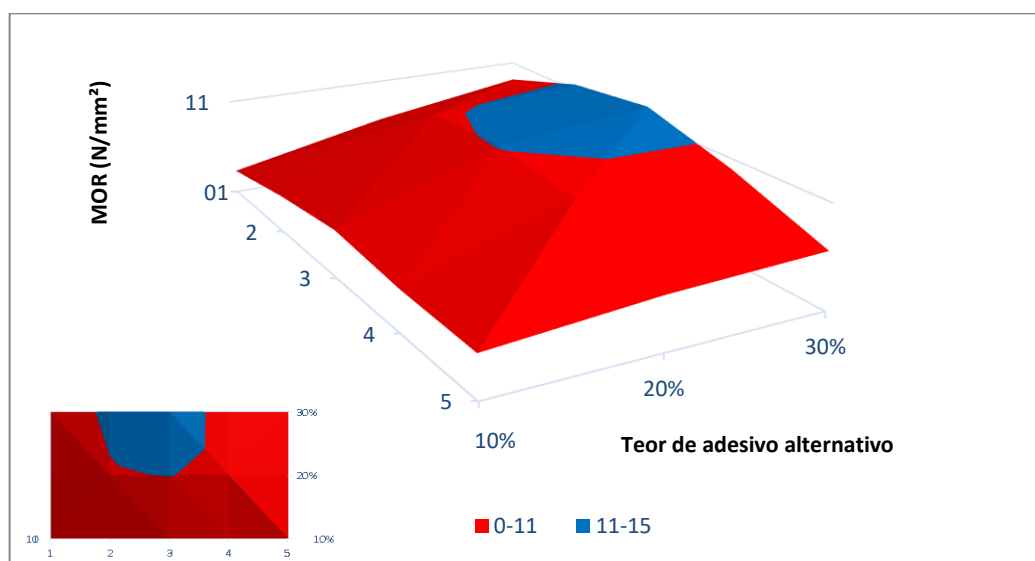
Tabela 19 - Valores médios de resistência à flexão estática e sua classificação normativa

| Composições      | MOR<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | CV (%) | Classificação<br>ABNT (2024) | Classificação<br>ANSI (2022) | Classificação<br>EN (2010) |
|------------------|-----------------------------|--------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| C1 <sup>10</sup> | 2,58                        | 5,91   | -                            | -                            | -                          |
| C2 <sup>10</sup> | 4,11                        | 6,27   | -                            | LD-1                         | -                          |
| C3 <sup>10</sup> | 5,21                        | 6,49   | -                            | LD-1 e LD-2                  | -                          |
| C4 <sup>10</sup> | 4,52                        | 7,49   | -                            | LD-1                         | -                          |
| C5 <sup>10</sup> | 4,43                        | 6,89   | -                            | LD-1                         | -                          |
| C1 <sup>20</sup> | 6,20                        | 5,83   | -                            | LD-1 e LD-2                  | -                          |
| C2 <sup>20</sup> | 10,70                       | 9,10   | -                            | LD-1 e LD-2                  | P1                         |
| C3 <sup>20</sup> | 11,14                       | 5,03   | P2                           | LD-1, LD-2 e<br>M-1          | P1 e P2                    |
| C4 <sup>20</sup> | 9,82                        | 9,13   | -                            | LD-1 e LD-2                  | -                          |
| C5 <sup>20</sup> | 5,66                        | 8,37   | -                            | LD-1 e LD-2                  | -                          |
| C1 <sup>30</sup> | 8,83                        | 7,74   | -                            | LD-1 e LD-2                  | -                          |
| C2 <sup>30</sup> | 11,70                       | 7,71   | P2                           | LD-1, LD-2 e<br>M-1          | P1 e P2                    |
| C3 <sup>30</sup> | 12,73                       | 7,67   | P2                           | LD-1, LD-2, M-1 e<br>M-S     | P1 e P2                    |
| C4 <sup>30</sup> | 9,90                        | 10,07  | -                            | LD-1 e LD-2                  | -                          |
| C5 <sup>30</sup> | 6,19                        | 8,94   | -                            | LD-1 e LD-2                  | -                          |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Considerando que a ABNT (2024) e a EN (2010) classificam como P2 painéis que alcançam valores mínimos de módulo de resistência à flexão estática de 11 N/mm<sup>2</sup> e que a ANSI (2022) aplica o mesmo valor para classificar painéis no grupo M-1, foi delimitado no gráfico apresentado na Figura 65 o limite ótimo de 11 N/mm<sup>2</sup>, considerando que, acima deste valor os painéis produzidos atendem às especificações normativas de painéis não estruturais para uso interno em condições secas.

Figura 65 – Malha delineada pelos módulos de resistência à flexão estática médios das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

#### 4.2.2 Módulo de elasticidade (MOE)

Assim como no item anterior, a Tabela 20 apresenta os resultados médios obtidos em ensaio de flexão estática. Agora, são destacados os valores médios do módulo de elasticidade das composições propostas e seus respectivos coeficientes de variação. Por fim, são apresentadas as classificações normativas nacional e internacionais quando atendidas.

A propriedade de MOE seguiu o mesmo padrão de comportamento da propriedade de MOR apresentada anteriormente, em que o aumento gradual do teor de adesivo contribuiu para o melhor desempenho das composições, assim como a associação entre PETr e breu colofônia dentro de um mesmo teor. Entretanto, é possível observar que esta propriedade mecânica foi atendida com notória eficiência por diversas composições propostas, com destaque para as composições C3<sup>20</sup>, C4<sup>20</sup>, C3<sup>30</sup>, e C4<sup>30</sup>.

O módulo de elasticidade mede a rigidez de um material, refletindo a capacidade de resistir à deformação diante de um carregamento. É oriundo da razão entre tensão e deformação, ou seja, elevados módulos de elasticidade sugerem mínimos deslocamentos frente à carga. De acordo com Muhaimin (2025) adesivos alternativos podem levar a um excesso de reticulação da matriz tornando-a mais quebradiça e conferindo comportamento frágil, reduzindo sua deformação.

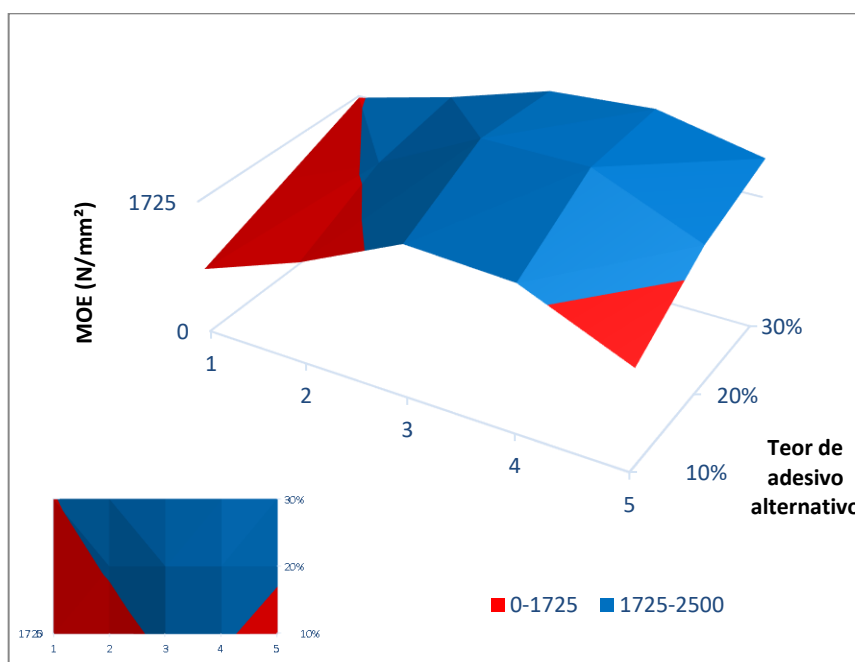
Tabela 20 - Valores médios de módulo de elasticidade e sua classificação normativa

| Composições      | MOE<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | CV (%) | Classificação<br>ABNT (2024) | Classificação<br>ANSI (2022)       | Classificação<br>EN (2010) |
|------------------|-----------------------------|--------|------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| C1 <sup>10</sup> | 843,69                      | 5,14   | -                            | LD-1                               | -                          |
| C2 <sup>10</sup> | 1328,67                     | 4,20   | -                            | LD-1 e LD-2                        | -                          |
| C3 <sup>10</sup> | 1947,06                     | 2,78   | P2                           | LD-1, LD-2 e M-1                   | P2                         |
| C4 <sup>10</sup> | 1878,25                     | 4,70   | P2                           | LD-1 e LD-2                        | P2                         |
| C5 <sup>10</sup> | 1294,81                     | 5,54   | -                            | LD-1 e LD-2                        | -                          |
| C1 <sup>20</sup> | 1270,11                     | 6,88   | -                            | LD-1 e LD-2                        | -                          |
| C2 <sup>20</sup> | 1836,81                     | 5,68   | P2                           | LD-1, LD-2 e M-1                   | P2                         |
| C3 <sup>20</sup> | 2485,81                     | 5,40   | P2, P3 e P4                  | LD-1, LD-2, M-1,<br>M-S e M-2      | P2, P3 e P4                |
| C4 <sup>20</sup> | 2476,76                     | 6,11   | P2                           | LD-1, LD-2 e M-1                   | P2                         |
| C5 <sup>20</sup> | 1907,34                     | 5,77   | P2                           | LD-1, LD-2, M-1 e<br>M-S           | P2                         |
| C1 <sup>30</sup> | 1701,19                     | 4,42   | -                            | LD-1 e LD-2                        | -                          |
| C2 <sup>30</sup> | 2021,19                     | 5,64   | P2                           | LD-1, LD-2, M-1 e<br>M-S           | P2                         |
| C3 <sup>30</sup> | 2412,38                     | 5,55   | P2, P3 e P4                  | LD-1, LD-2, M-1,<br>M-S e M-2      | P2, P3 e P4                |
| C4 <sup>30</sup> | 2816,67                     | 5,48   | P2, P3, P4 e<br>P5           | LD-1, LD-2, M-1,<br>M-S, M-2 e M-3 | P2, P3, P4 e<br>P5         |
| C5 <sup>30</sup> | 2211,41                     | 5,33   | P2 e P3                      | LD-1, LD-2, M-1 e<br>M-S           | P2 e P3                    |

Fonte: Elaboração do próprio autor

A Figura 66 apresenta os valores médios de módulo de elasticidade das composições. Foi delimitado um plano horizontal com altura vertical de 1725 unidade para discriminar, em azul, as composições que atendem a este valor mínimo normativo (classificação M-1 da ANSI (2022)) e, em vermelho, às que não atendem.

Figura 66 – Malha delineada pelos módulos de elasticidade médios das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

#### 4.2.3 Resistência à tração perpendicular (TP)

Como em todos os itens anteriores que tratam sobre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis propostos neste trabalho, a Tabela 21 apresenta os resultados médios obtidos em ensaio de tração perpendicular e seus respectivos coeficientes de variação.

As três últimas colunas da respectiva tabela apresentam os grupos de classificação normativa nacional e internacionais que foram atendidas considerando apenas esta propriedade.

Se faz válido dizer que este ensaio avalia a força de ligação interna dos corpos de prova extraídos dos painéis produzidos para cada composição estudada. A terminologia internacional se refere a este ensaio por *internal bond* (IB).

Pode-se observar que os painéis das composições que continham apenas 10% de adesivo alternativo não atenderam à nenhuma classificação da norma brasileira, enquanto seus pares que continham 20% e 30% de adesivo alternativo alcançaram melhores resultados. Neste momento, é possível inferir que o teor de adesivo contribui diretamente com o atendimento às classificações normativas.

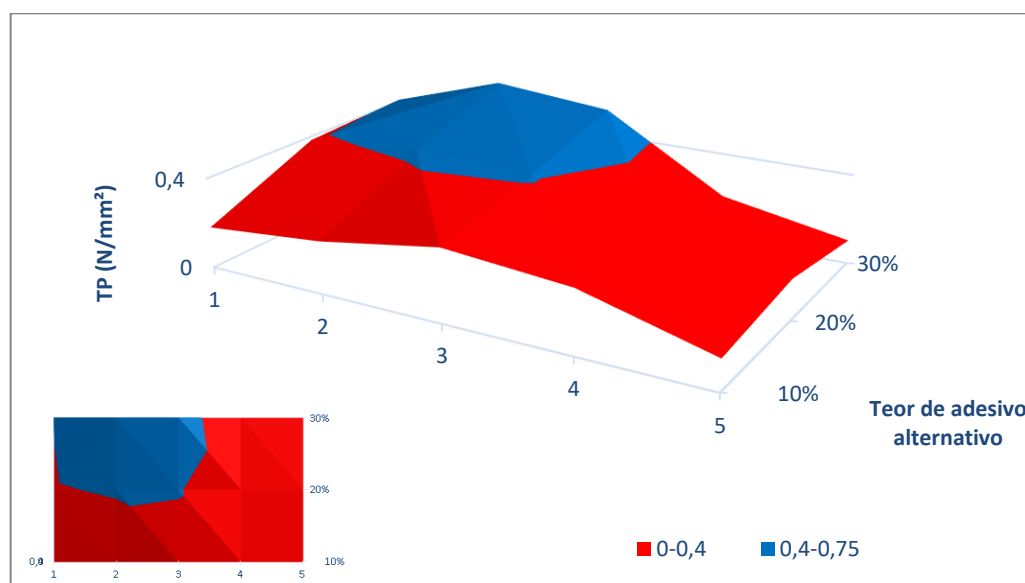
Tabela 21 - Valores médios de resistência à tração perpendicular e sua classificação

| Composições      | TP<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | CV (%) | Classificação<br>ABNT (2024) | Classificação<br>ANSI (2022)         | Classificação<br>EN (2010) |
|------------------|----------------------------|--------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| C1 <sup>10</sup> | 0,182                      | 5,98   | -                            | LD-1, LD-2                           | -                          |
| C2 <sup>10</sup> | 0,231                      | 6,65   | -                            | LD-1, LD-2                           | -                          |
| C3 <sup>10</sup> | 0,319                      | 5,76   | -                            | LD-1, LD-2                           | P1                         |
| C4 <sup>10</sup> | 0,276                      | 6,62   | -                            | LD-1, LD-2                           | -                          |
| C5 <sup>10</sup> | 0,133                      | 7,72   | -                            | LD-1                                 | -                          |
| C1 <sup>20</sup> | 0,383                      | 4,75   | -                            | LD-1, LD-2                           | P1                         |
| C2 <sup>20</sup> | 0,424                      | 3,70   | P2, P4                       | LD-1, LD-2,<br>M-1, M-S              | P1, P2, P4                 |
| C3 <sup>20</sup> | 0,412                      | 5,92   | P2, P4                       | LD-1, LD-2,<br>M1- M-S               | P1, P2, P4                 |
| C4 <sup>20</sup> | 0,258                      | 6,25   | -                            | LD-1, LD-2                           | -                          |
| C5 <sup>20</sup> | 0,180                      | 7,96   | -                            | LD-1, LD-2                           | -                          |
| C1 <sup>30</sup> | 0,408                      | 4,87   | P2, P4                       | LD-1, LD-2,<br>M-1, M-S              | P1, P2, P4                 |
| C2 <sup>30</sup> | 0,571                      | 3,07   | P2, P3,<br>P4, P5            | LD-1, LD-2,<br>M-1, M-S, M-2,<br>M-3 | P1, P2, P3,<br>P4, P5      |
| C3 <sup>30</sup> | 0,520                      | 2,62   | P2, P3,<br>P4, P5            | LD-1, LD-2,<br>M-1, M-S, M-2         | P1, P2, P3,<br>P4, P5      |
| C4 <sup>30</sup> | 0,204                      | 6,63   | -                            | LD-1, LD-2                           | -                          |
| C5 <sup>30</sup> | 0,105                      | 9,01   | -                            | LD-1                                 | -                          |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com base nos dados coletados e apresentados na tabela acima, a Figura 67 apresenta a malha delineada que discrimina em azul valores médios superiores à 0,4 N/mm<sup>2</sup> (valor mínimo preconizado pelos documentos normativos).

Figura 67 – Malha delineada pelos resultados de resistência à tração perpendicular médios das composições estudadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

### 4.3 ANÁLISES MICROSCÓPICAS

#### 4.3.1 Microscopia Óptica (MO)

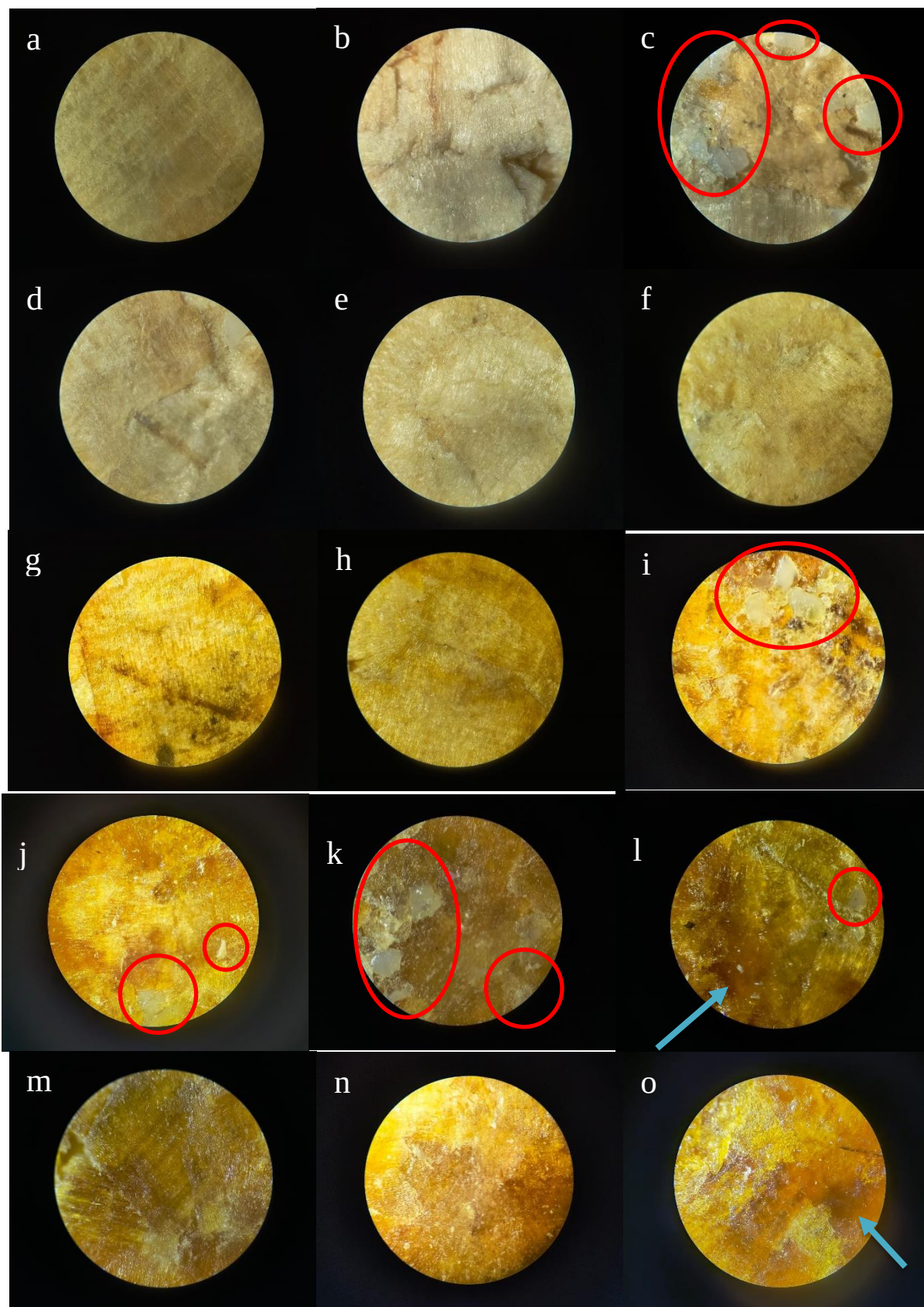
A análise de microscopia óptica possibilitou visualizar com mais nitidez e maior riqueza de detalhes a face dos corpos de prova produzidos. A Figura 68 apresenta uma imagem de cada composição proposta neste trabalho.

As setas azuis nas imagens indicam regiões onde houve acúmulo de breu colofônia na superfície dos corpos de prova analisados e as regiões circunscritas (em vermelho) evidenciam o acúmulo de PETr.

O acúmulo de adesivos em determinadas regiões da superfície pode ser prejudicial para o melhor adensamento e compactação do painel, pois pode significar ausência ou diminuição do teor de adesivo em outras regiões, isso pode justificar os elevados desvios obtidos nos resultados de algumas propriedades, como inchamento em espessura.

É possível observar, por exemplo, que houve acúmulo de breu colofônia nas imagens das composições C4<sup>30</sup> e C5<sup>30</sup>, respectivamente composições que continham 75% e 100% de breu como adesivo, empregado sob teor de 30% em relação à massa seca de madeira de pinus.

Figura 68 – Imagem de microscópio óptico de corpos de prova das composições estudadas: (a) C1<sup>10</sup>, (b) C1<sup>20</sup>, (c) C1<sup>30</sup>, (d) C2<sup>10</sup>, (e) C2<sup>20</sup>, (f) C2<sup>30</sup>, [...] e (o) C5<sup>30</sup>



Fonte: Acervo do autor

Durante a etapa inicial desta pesquisa (fase exploratória) foram experimentadas composições com teores de 40% e 50% de adesivo alternativo, seguindo as mesmas proporções entre breu e PETr, entretanto, essas composições foram posteriormente descartadas por conta da elevada taxa de adesivo em relação à madeira. A Figura 69 apresenta algumas imagens destes painéis outrora experimentados e evidencia sua má conformação e má consolidação devido aos elevados teores de resina alternativa.

Aparentemente o excesso de resina (em estado líquido, durante a prensagem) percolou através das partículas de madeira por caminhos preferenciais em direção às regiões de menor tensão (extremidades dos painéis), causando extravasamento. Por fim, pode-se observar ainda, que a distribuição da resina alternativa proposta foi desigual, fato evidenciado pela mancha escura observada na superfície superior do painel com 40% de teor de resina.

Figura 69 – Painéis de partículas exploratórios produzidos contendo 0% de PETr e 100% de breu colofônia como adesivo alternativo: (a) teor de 40% de adesivo, e (b) teor de 50% de adesivo



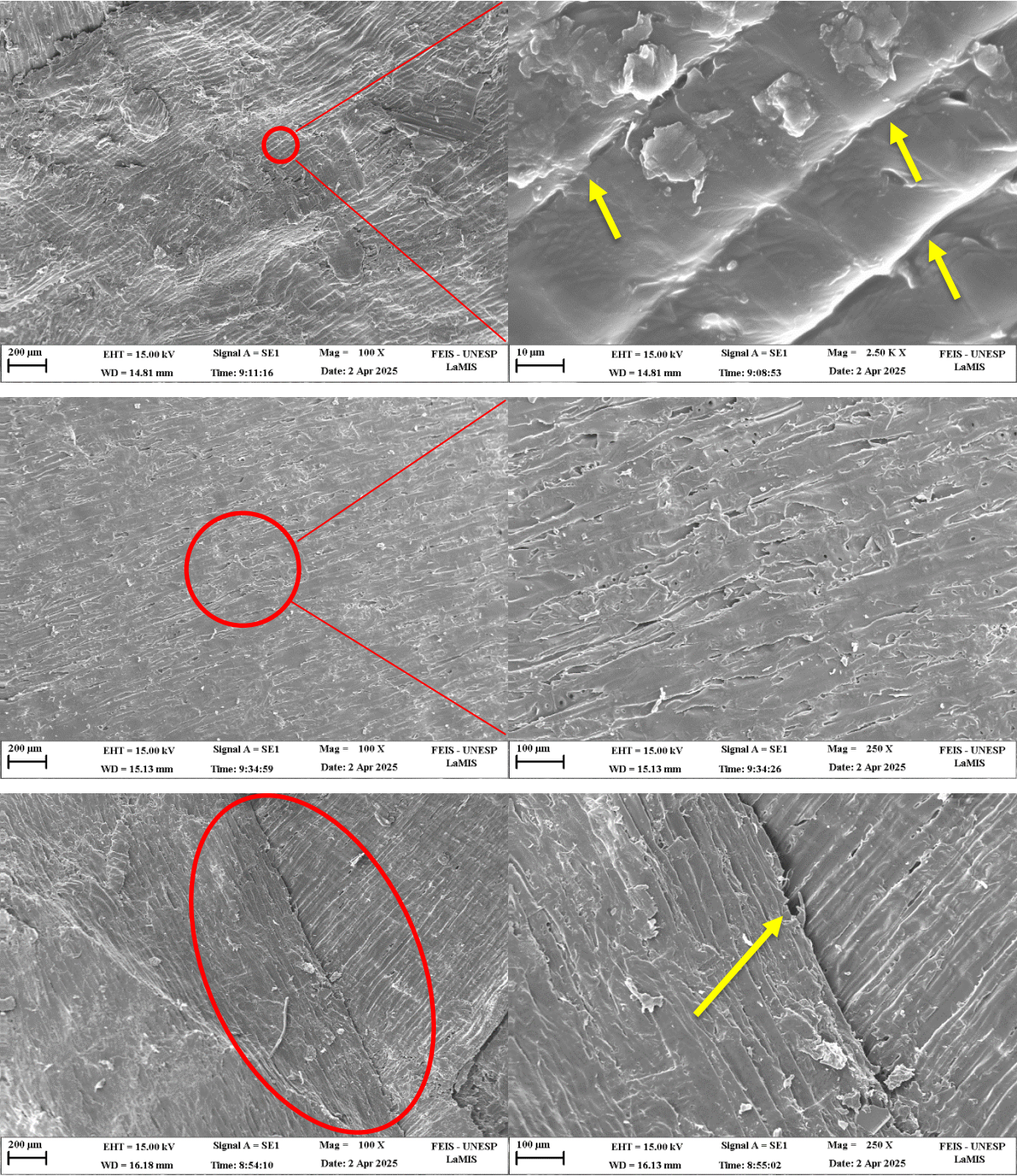
Fonte: Acervo do autor

#### **4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As imagens de microscopia eletrônica de varredura realizadas na superfície dos corpos de prova produzidos, são apresentadas nesse capítulo. Foram destacadas regiões críticas de interesse, seja por deposição de adesivo alternativo ou por falta dele. São ainda apresentadas imagens superficiais dos painéis que

tiveram boa conformação e consequentemente alcançaram melhores resultados de propriedades físicas e mecânicas. A Figura 70 evidencia exatamente esta condição, apresentando pares de imagens da superfície de painéis que continham teores de 30% de adesivo alternativo com mistura entre PETr e breu colofônia.

Figura 70 – MEV de amostras dos painéis de partícula produzidos com teor de 30% de adesivo alternativo: (a) C2<sup>30</sup>; (b) C3<sup>30</sup>; e (c) C4<sup>30</sup>



Fonte: Acervo do autor

Duas imagens de MEV da superfície de cada composição são apresentadas, com diferentes magnitudes, com intuito de apresentar detalhes da anatomia da madeira de pinus, bem como a morfologia superficial dos painéis e sua conformação. As regiões inscritas em circunferências ou elipses vermelhas estão apresentadas ao lado com maior magnitude para apresentar detalhes relevantes a esta discussão.

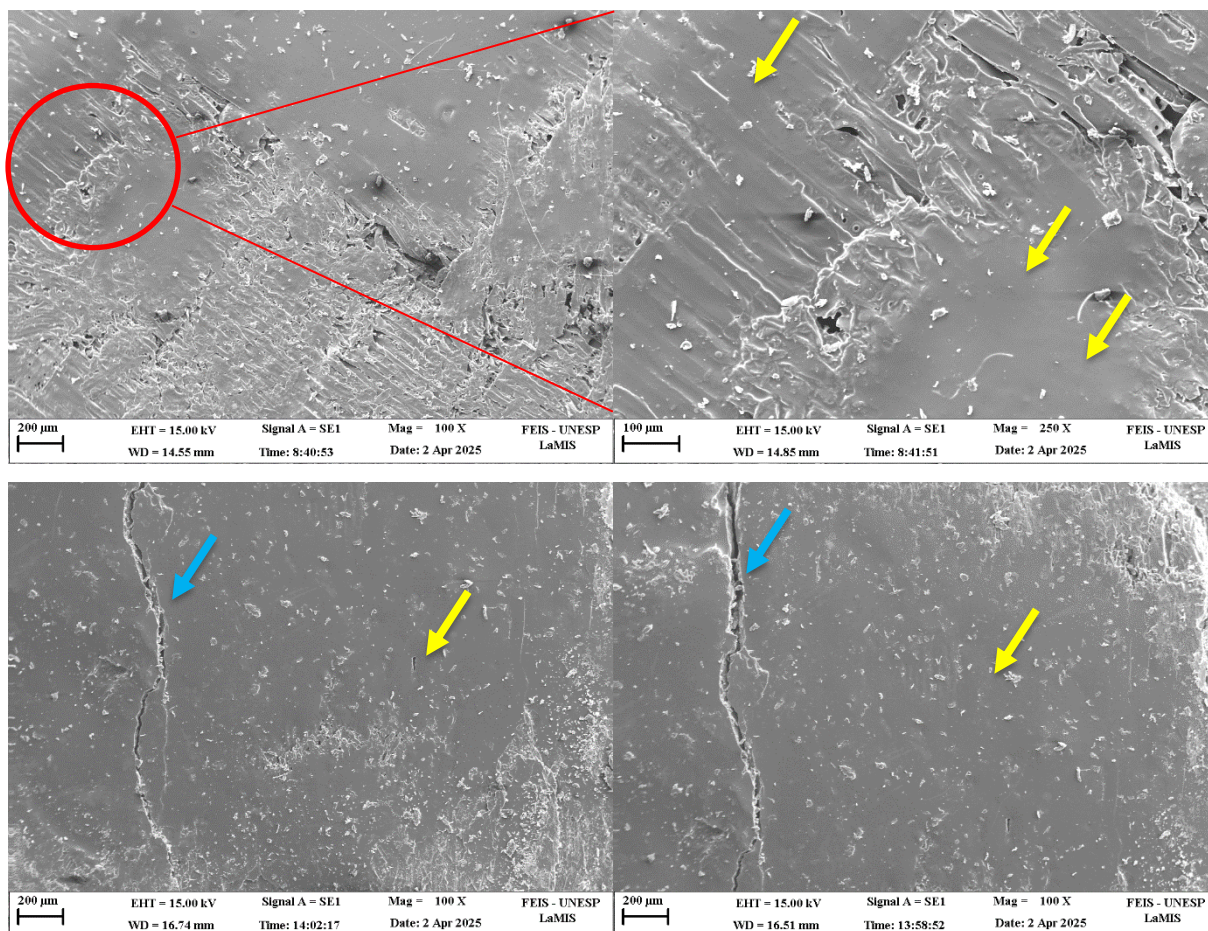
Na Figura 70a é possível observar a superfície de um painel pertencente à composição C2<sup>30</sup> – portanto, contendo 30% de teor de adesivo alternativo em relação à madeira de pinus, sendo 75% de PETr e 25% de breu – sendo a primeira imagem com aumento de 100 vezes e a seu lado um detalhe com aumento de 2500 vezes. Na região de menor magnitude de aumento é possível observar a excelente conformação superficial dos painéis pertencentes a este grupo de composição, com boa compactação, densificação e poucos vazios entre partículas. Com auxílio do aumento é possível observar – destacado em setas amarelas – a morfologia da madeira, que tem natureza fibrosa e alveolar.

Assim como no exemplar da composição C2<sup>30</sup>, as outras duas composições apresentadas: C3<sup>30</sup> e C4<sup>30</sup> (Figura 70b, Figura 70c) apresentam boa conformação e densificação. Destaque é dado à imagem da composição C4<sup>30</sup> para destacar (em amarelo) a região de sobreposição de duas partículas de madeira, deflagradas pela diferente direção das fibras de crescimento.

A Figura 71 apresenta imagens superficiais de espécimes que continham elevada quantidade de breu colofônia, pertencentes à composição de mistura C5<sup>30</sup>, contendo 30% de adesivo alternativo constituído apenas por breu colofônia.

Na Figura 71a é possível identificar regiões em que é possível observar a direção preferencial das fibras de madeira, acompanhadas de regiões em que a superfície da madeira está sob uma camada de breu colofônia (circunscrito em vermelho). É possível inferir isto através da retilineidade da superfície coberta pela camada de breu. Estas superfícies sem rugosidade são destacadas com auxílio de setas amarelas. Também é possível identificar regiões de transição em que são identificados vazios que não foram bem preenchidos, resultando em uma densificação mais deficitária e prejudicada em comparação às composições da Figura 70.

Figura 71 – MEV de amostras dos painéis de partícula produzidos com teor de 30% de adesivo de breu (C5<sup>30</sup>): (a) deposição de breu na superfície; e (b) fraturas



Fonte: Acervo do autor

Na Figura 71b é possível observar duas regiões distintas fraturadas, destacadas com auxílio de setas azuis. Também destacadas com setas amarelas, estão as regiões que contam com revestimento superficial de breu sobre as fibras da madeira. Estas regiões de fratura deflagram a característica frágil e vítrea do breu colofônia em temperatura ambiente e evidenciam – especialmente quando comparadas às composições com mesmo teor de adesivo alternativo mas contendo mistura entre PETr e breu – que empregar apenas breu como ligante de partículas não é razoável.

Com intuito de evidenciar a diferença superficial dos painéis produzidos com diferentes teores e proporções de adesivos alternativos, a Figura 72a apresenta a face superior de um painel produzido com apenas 10% de adesivo alternativo de PETr, enquanto a Figura 72b destaca a face superior de um painel produzido com 30% de adesivo alternativo de breu colofônia.

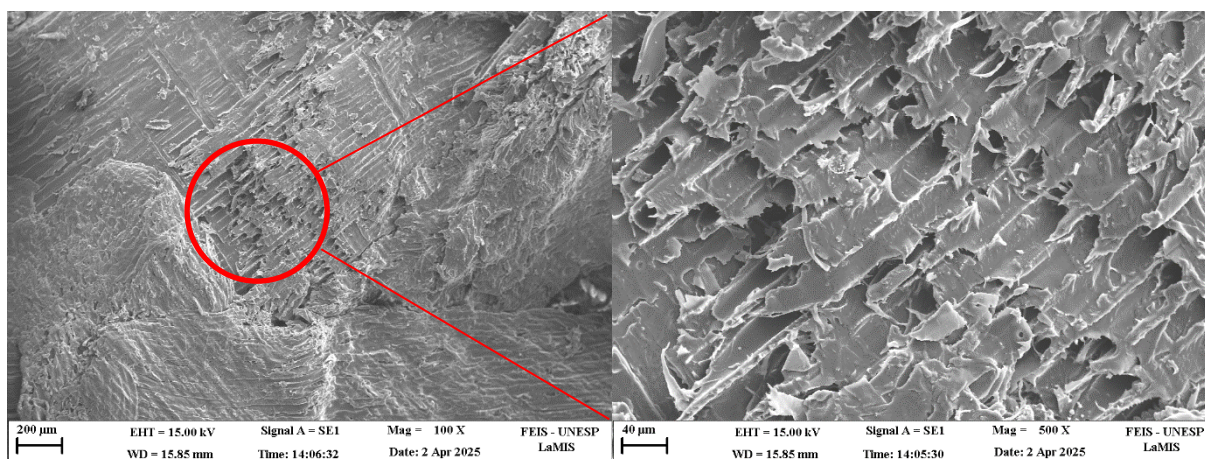
Figura 72 – Superfície de painéis de partículas pertencentes às respectivas composições: (a) C1<sup>10</sup>; e (b) C5<sup>30</sup>



Fonte: Acervo do autor

A superfície irregular e com grande quantidade de vazios dos painéis produzidos com baixos teores de PETr como adesivo deflagram sua debilidade e convergem com o insatisfatório desempenho físico-mecânico deste produto. A seguir são apresentadas imagens de MEV da superfície do (Figura 73).

Figura 73 – MEV de amostras dos painéis de partícula produzidos com teor de 10% de adesivo de PETr (C1<sup>10</sup>): (a) superfície irregular; e (b) fraturas

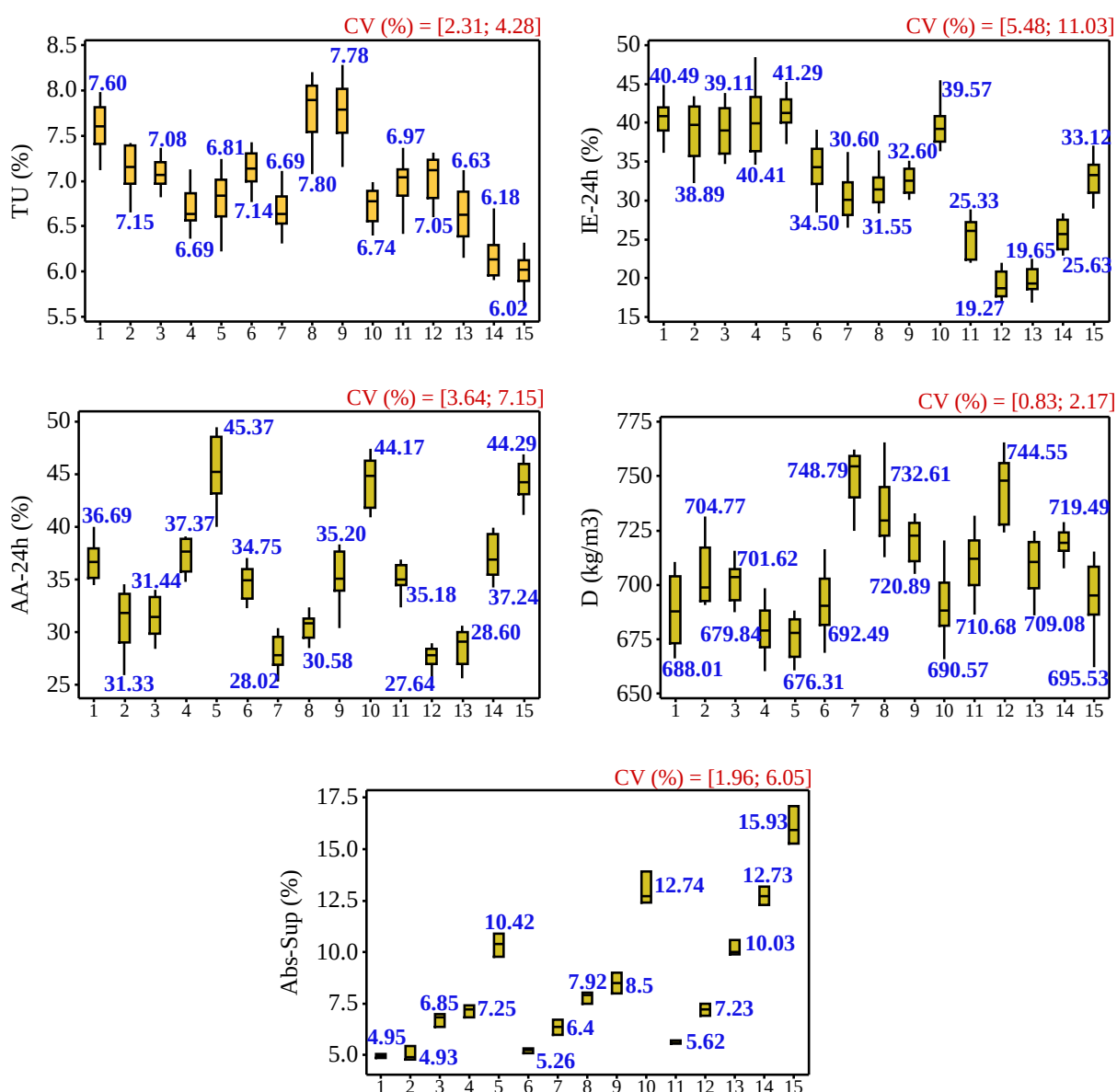


Fonte: Acervo do autor

#### 4.4 AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS

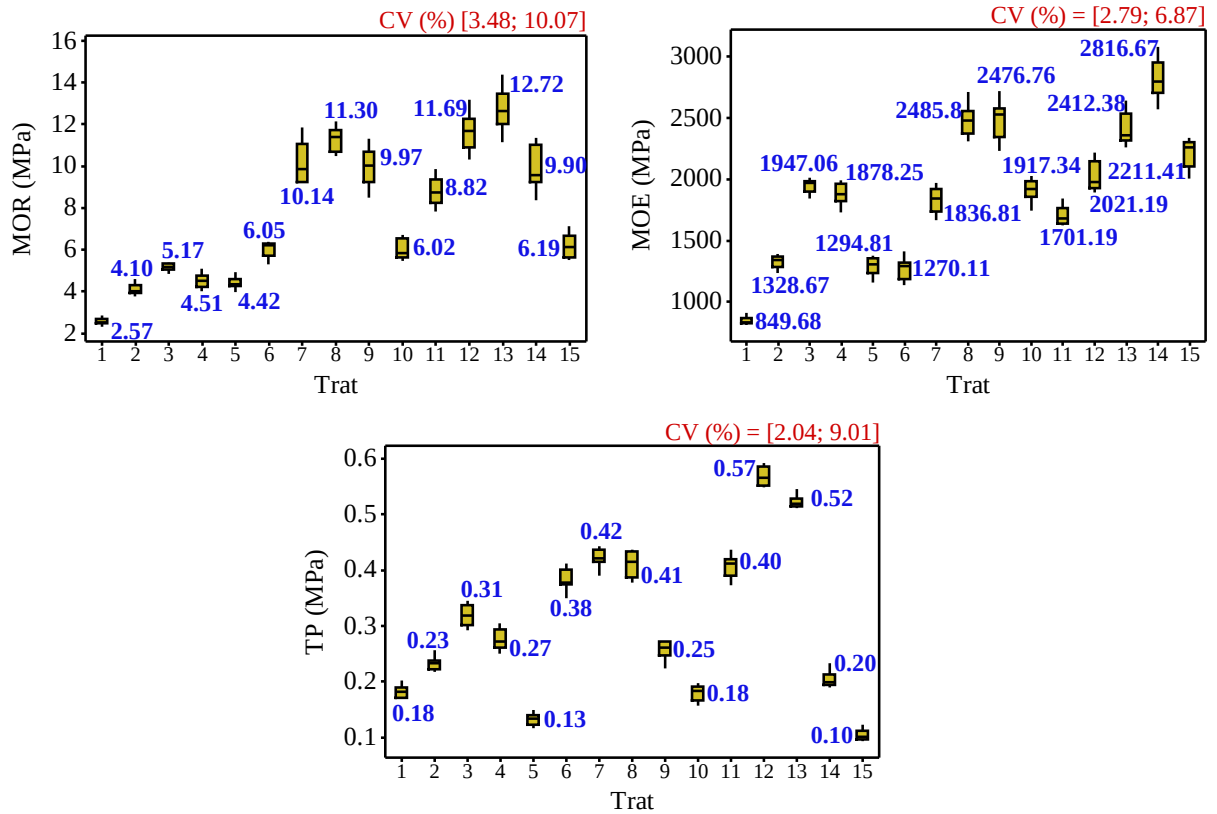
Nas Figuras 74 e 75 são apresentados os boxplots, os valores médios e os valores extremos dos coeficientes de variação das propriedades físicas (12 amostras por composição e por propriedade, com exceção da absorção superficial, em que foram consideradas 3 amostras) e mecânicas (10 amostras por composição e por propriedade) referentes aos painéis produzidos de acordo com as 15 composições propostas neste trabalho (eixo das abcissas) e apresentadas anteriormente na Tabela 2.

Figura 74 – Resultados das propriedades físicas dos painéis



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 75 – Resultados das propriedades mecânicas dos painéis



Fonte: Elaboração do próprio autor

Na Tabela 22, são apresentados os resultados do teste de contraste de médias de Tukey acerca da influência isolada dos fatores: teor de resina alternativa (%Res) e proporção de PETr em relação ao breu (%PETr).

Tabela 22 – Resultados do teste de contraste de médias de Tukey

| Propriedades | Resina |     |     | PETr |     |     |     |      |
|--------------|--------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|
|              | 10%    | 20% | 30% | 0%   | 25% | 50% | 75% | 100% |
| TU           | A      | A   | B   | C    | B   | AB  | AB  | A    |
| I            | A      | B   | C   | A    | B   | B   | B   | AB   |
| AA           | A      | A   | A   | A    | B   | C   | C   | B    |
| D            | B      | A   | A   | D    | BC  | B   | A   | CD   |
| AS           | B      | AB  | A   | A    | B   | BC  | CD  | D    |
| MOR          | C      | B   | A   | B    | A   | A   | A   | B    |
| MOE          | C      | B   | A   | B    | A   | A   | B   | C    |
| TP           | B      | A   | A   | D    | C   | A   | A   | B    |

Do teste de Tukey (5% de significância), A denota o nível do fator associado ao maior valor médio da propriedade, B o segundo maior valor médio e assim sucessivamente, e letras iguais implicam em níveis do fator com médias estatisticamente equivalentes.

Cabe destacar que os p-valores (probabilidade p) do teste de normalidade de Anderson Darling (5% de significância) dos resíduos da análise de variância (5% de significância) em cada propriedade avaliada foi superior ao nível de 5% de significância (0.096; 0.741), o que valida os resultados do teste de Tukey.

Observando os teores de adesivo (10%, 20% e 30%) e de PETr em relação à quantidade de breu colofônia nas misturas propostas em cada composição (0%, 25%, 50% 75% e 100%) é possível inferir que exclusivamente para o ensaio de AA não houve diferença significativa entre o teor de adesivo utilizado, resultando portanto em médias estatisticamente equivalentes. Este fato pode estar relacionado ao desempenho prejudicado das resinas alternativas quando em contato com a água (ZHANG, 2024; CAZELLA, 2024).

Por outro lado, no ensaio físico de I e nos ensaios mecânicos de MOR e MOE é possível observar que o aumento gradual no teor de adesivo culminou em resultados estatisticamente divergentes. Além disso, pode-se notar que os maiores valores (representados na Tabela 22 pela letra A) das duas propriedades mecânicas citadas foram alcançados com o teor de 30% de resina, enquanto para a propriedade física de inchamento o maior valor foi encontrado para o teor de 10%. Se faz claro, portanto, que quanto maior o teor de adesivo, maiores são os resultados de resistência mecânica e menores os inchamentos em espessura.

A propriedade física de D e a mecânica de TP respeitam o mesmo padrão outrora observado, entretanto, cabe dizer que não houve diferença significativa dos resultados quando o teor de adesivo subiu de 20% para 30%.

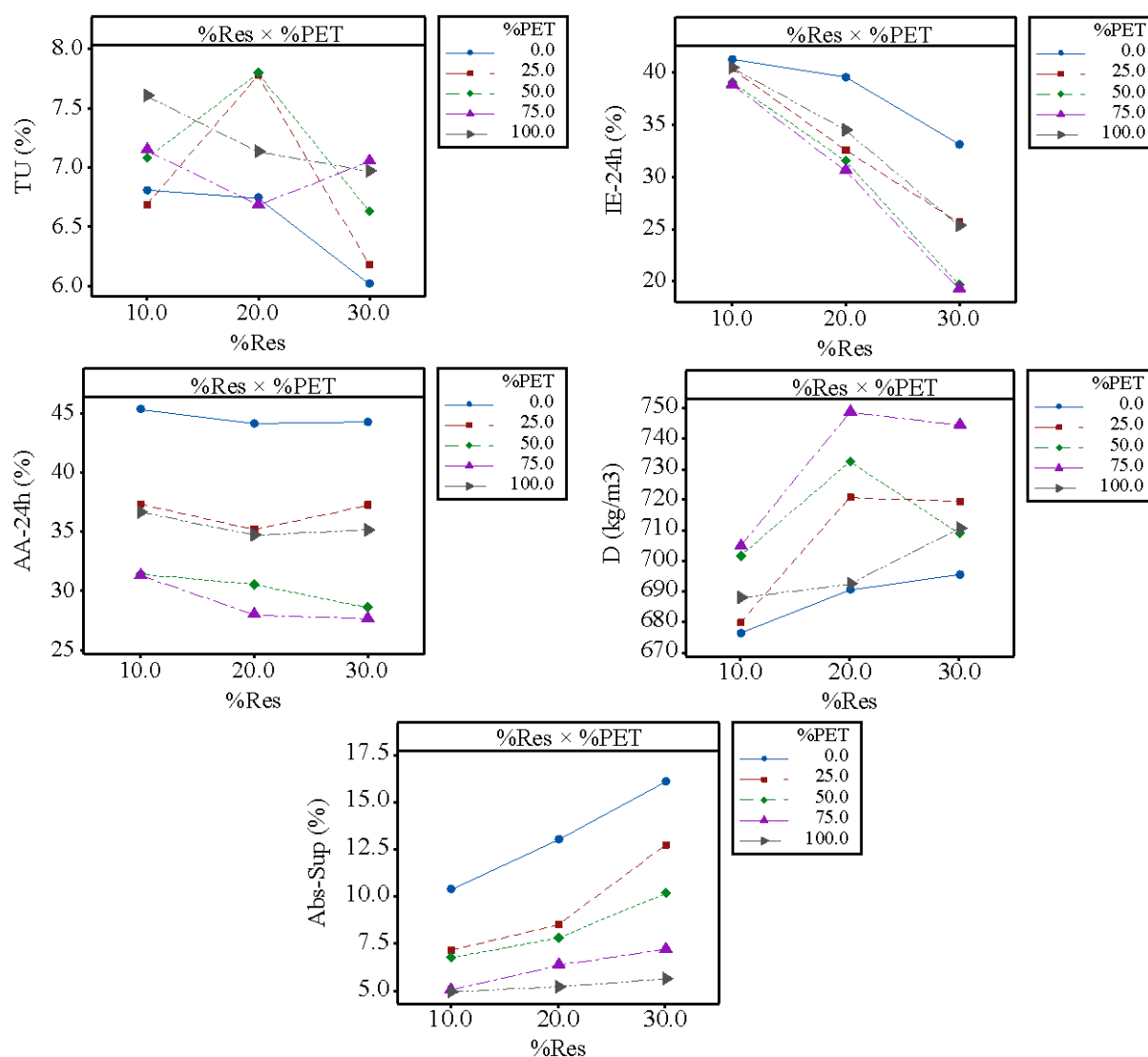
De forma análoga, a propriedade física de TU não apresentou diferença significativa quando os teores subiram de 10% para 20%, entretanto apresentou menores resultados (característica favorável para painéis de partículas) com o aumento do teor de adesivo alternativo de 20% para 30%. Por fim, a propriedade física de AS também foi favorecida com o aumento do teor de resina, uma vez que maiores valores representam um maior comprimento longitudinal da mancha de escorrimento (menor absorção), observada na composição com teor de 30%.

Quando o teor de adesivo foi mantido estável, pôde-se observar que em todas as propriedades mecânicas avaliadas houve um melhor comportamento (maiores resultados de resistência) para as composições que continham mistura entre PETr e breu. Ainda é possível inferir que o aumento gradual nos teores de PETr em relação ao breu contribuíram para o aumento dos valores da propriedade de TU. Ou seja,

quanto maior a proporção de PETr em relação ao breu nos adesivos, maiores foram os resultados de TU dos painéis avaliados. Por outro lado, as propriedades de AA e I apresentaram os melhores resultados quando houve mistura do PETr e breu. Por fim a propriedade de AA apresentou clara melhora quanto maiores os teores de breu.

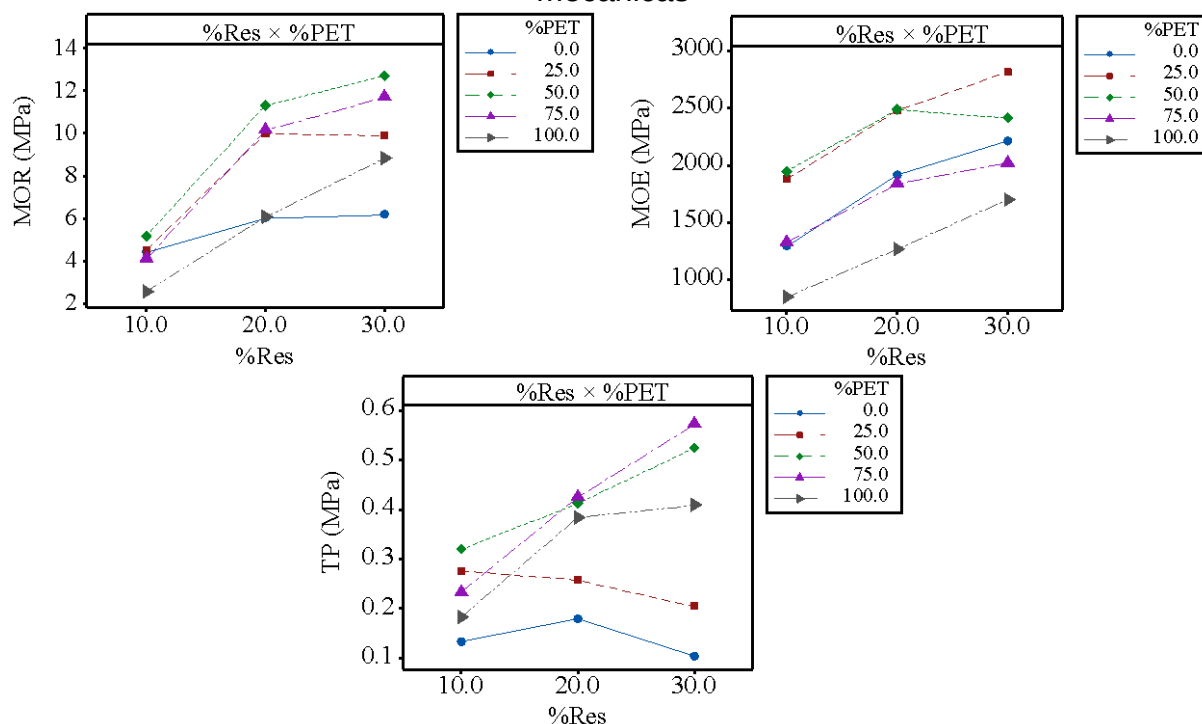
Com relação aos efeitos de interação, esses foram significativos em todas as propriedades avaliadas. Os gráficos de interação entre os fatores das propriedades físicas e mecânicas são apresentados nas Figuras 76 e 77, respectivamente, cabendo destacar que os p-valores do teste de normalidade de Anderson-Darling foram superiores (0.137; 0.876) ao nível de 5% de significância, o que valida os resultados obtidos da análise de variância.

Figura 76 – Gráficos de interação entre fatores (%Res × %PETr) das propriedades físicas



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 77 – Gráficos de interação entre fatores (%Res × %PETr) das propriedades mecânicas



Fonte: Elaboração do próprio autor

Quanto aos efeitos da interação entre os dois fatores experimentados (duas variáveis: teor de adesivo alternativo e proporção entre PETr e breu colofônia) é possível inferir que para as propriedades mecânicas de MOR, MOE e TP em linhas gerais, quanto maior o aumento do teor de adesivo alternativo há uma tendência crescente na diferença entre a resistência média dos corpos de prova de diferentes proporções de PETr e breu. Característica mais deflagrada nos resultados da propriedade de MOR e TP (Figura 77).

É possível observar também que o ganho de resistência com o acréscimo de 10% de adesivo alternativo do teor de 10% para 20% é muito mais expressivo do que o ganho de resistência com o acréscimo dos mesmos 10% de adesivo do teor de 20% para 30% em relação à massa seca de madeira de pinus. Esta constatação se evidencia no decaimento da segunda metade das curvas, especialmente verificadas nas três propriedades avaliadas.

Esta análise permite identificar intervalos ótimos de mistura, uma vez que a partir de determinado teor, o mesmo acréscimo de adesivo já não garante o mesmo ganho de eficiência.

Para as propriedades físicas, especialmente as de AS, AA e I é possível observar com clareza a diferença de resultados que existe entre as composições quando se varia a proporção de PETr em relação ao breu.

Considerando a metodologia de superfície de resposta, na Tabela 23 são apresentados os modelos obtidos para cada propriedade, os coeficientes de determinação ( $R^2$  aj) e os valores extremos (Min: mínimo; Max: máximo) obtidos.

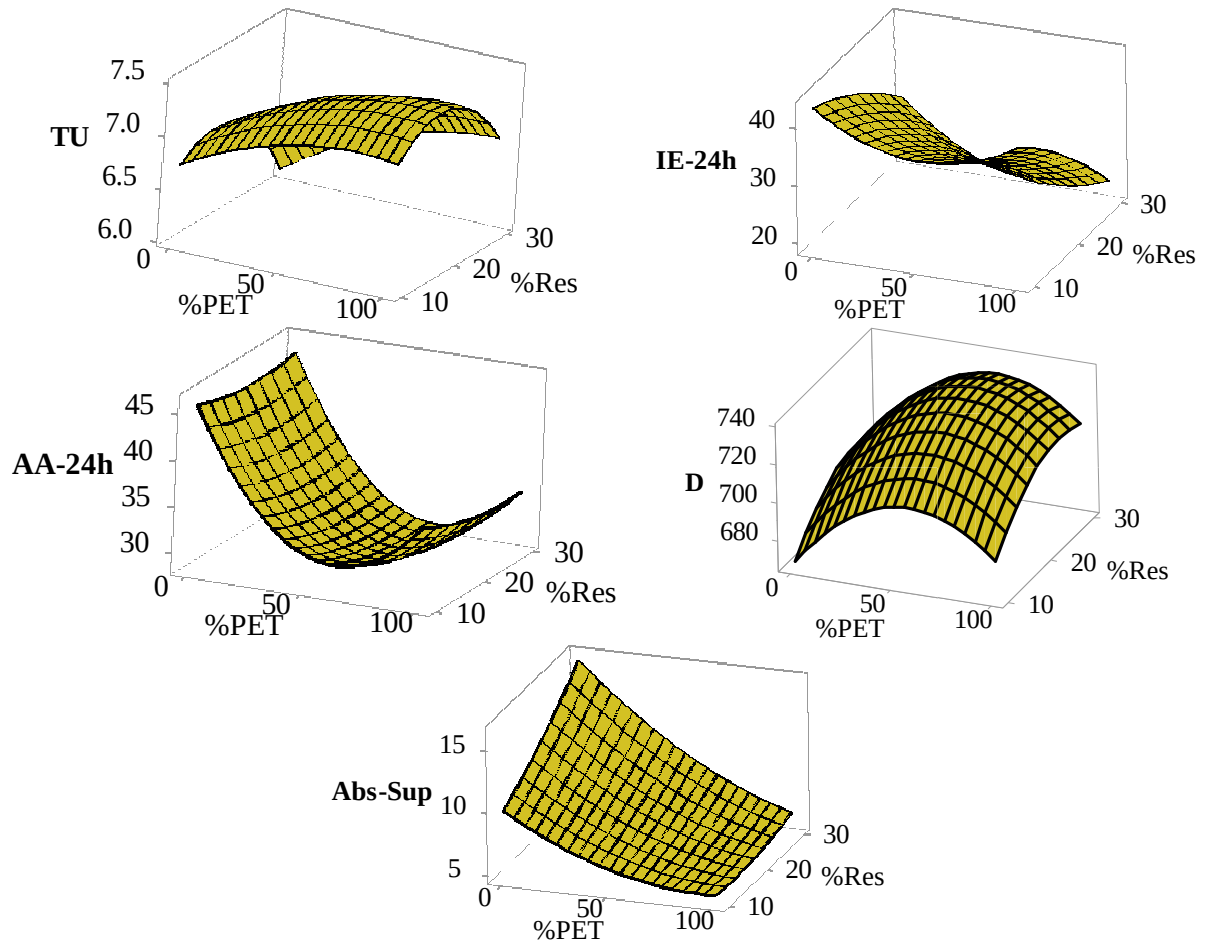
Tabela 23 – Modelos e valores extremos

| Modelo                                                                                                                | $R^2$ aj<br>(%) | Ext.  | R     | P     | $f_{ext}$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-----------|
| $TU = 5.829 + 0.1325 \cdot R + 0.0107 \cdot P - 0.00411 \cdot R^2 - 0.000075 \cdot P^2 + 0.000145 \cdot R \cdot P$    | 27.59           | ----- | ----- | ----- | -----     |
| $IE-24h = 45.02 - 0.005 \cdot R - 0.2052 \cdot P - 0.0145 \cdot R^2 + 0.002309 \cdot P^2 - 0.00376 \cdot R \cdot P$   | <u>93.96</u>    | Min   | 30    | 68.86 | 20.87     |
| $AA-24h = 49.44 - 0.436 \cdot R - 0.4770 \cdot P + 0.00971 \cdot R^2 + 0.003918 \cdot P^2 - 0.00089 \cdot R \cdot P$  | <u>94.47</u>    | Min   | 25.37 | 63.76 | 28.70     |
| $D = 613.2 + 6.85 \cdot R + 1.287 \cdot P - 0.1408 \cdot R^2 - 0.01134 \cdot P^2 + 0.0014 \cdot R \cdot P$            | <u>58.85</u>    | ----- | ----- | ----- | -----     |
| $Abs-Sup = 8.18 + 0.139 \cdot R - 0.0761 \cdot P + 0.00430 \cdot R^2 + 0.000539 \cdot P^2 - 0.002703 \cdot R \cdot P$ | <u>96.80</u>    | Min   | 15.27 | 100   | 4.96      |
| $MOR = -3.66 + 0.848 \cdot R + 0.1139 \cdot P - 0.01686 \cdot R^2 - 0.001544 \cdot P^2 + 0.002238 \cdot R \cdot P$    | <u>93.97</u>    | Max   | 28.99 | 57.89 | 11.93     |
| $MOE = 530 + 102.9 \cdot R + 23.38 \cdot P - 1.512 \cdot R^2 - 0.2880 \cdot P^2 - 0.075 \cdot R \cdot P$              | <u>92.88</u>    | Max   | 30    | 36.68 | 2643.77   |
| $TP = 0.051 + 0.0118 \cdot R + 0.00490 \cdot P - 0.000359 \cdot R^2 - 0.000064 \cdot P^2 + 0.000184 \cdot R \cdot P$  | <u>87.52</u>    | Max   | 10.49 | 23.21 | 0.17      |

*R = teor de resina; P: teor de PET; modelos considerados significativos pela análise de variância (ANOVA, 5% de significância) encontram-se sublinhados.*

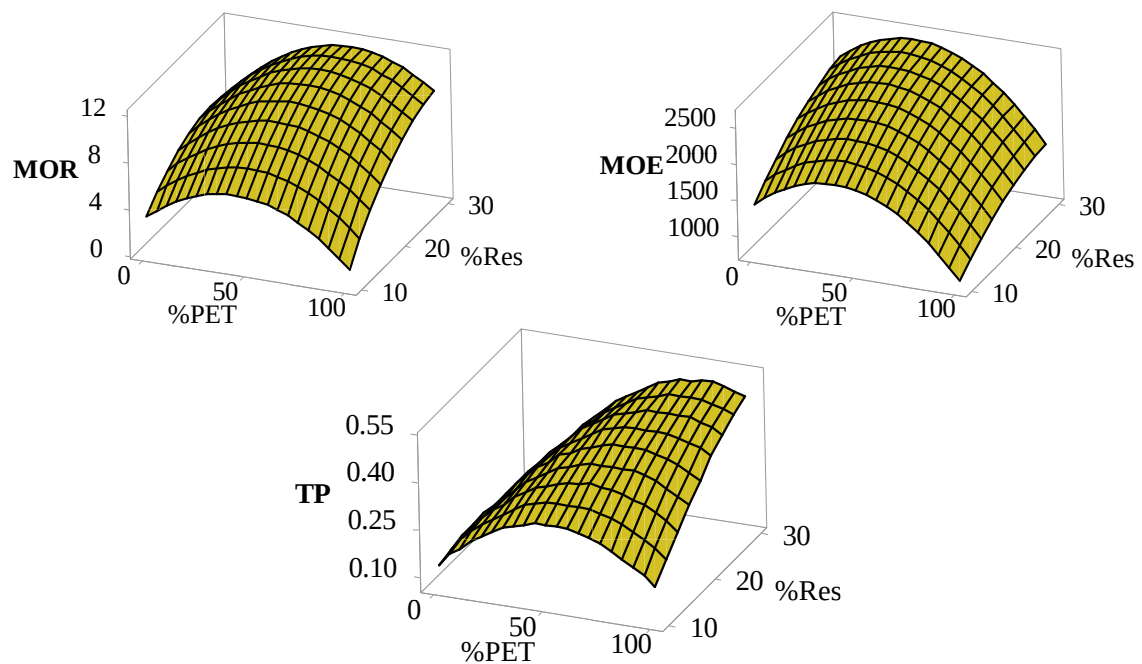
Nas Figuras 78 e 79 são apresentados os gráficos das superfícies geradas para a estimativa das propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, em conformidade com as figuras do item 4. Resultados e Discussões que apresentam a malha delineada dos resultados obtidos em cada uma das propriedades e seu atendimento ou não aos mínimos valores exigidos para classificações normativas.

Figura 78 – Gráficos de superfície das propriedades físicas



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 79 – Gráficos de superfície das propriedades mecânicas



Fonte: Elaboração do próprio autor

## 5. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos neste trabalho pôde-se concluir que é possível produzir painéis de partícula de madeira de pinus aglutinados apenas com adesivos alternativos de polietileno tereftalato reciclado e breu colofônia com potencial para atender às exigências normativas vigentes, nacionais e internacionais. Destaca-se que as únicas composições propostas que atenderam a todas as exigências mínimas normativas estabelecidas foram as composições C2<sup>30</sup> e C3<sup>30</sup> que continham 75% e 50% de PETr respectivamente, com teor de 30% de adesivo alternativo em relação à massa seca de madeira.

Entretanto, o emprego de apenas breu colofônia ou apenas PETr como adesivo alternativo se mostrou promissor, porém ainda necessita de ajustes, já que atende à diversos requisitos normativos, mas não sua totalidade. Deve-se destacar que elevados teores de breu contribuíram para um melhor desempenho quanto ao módulo de elasticidade dos painéis, enquanto maiores teores de PETr favoreceram o desempenho no ensaio de tração perpendicular.

Por fim, o emprego de PETr e breu como alternativa aos adesivos de base formaldeído figura como solução ambiental com tripla aptidão: Diminuir riscos à saúde humana e ao meio – ao evitar o uso de adesivos de base formaldeído – enquanto atenua os prejuízos do descarte irregular de plástico – ao empregar PETr às composições – e contribui para o sequestro de carbono da atmosfera – devido às florestas plantadas que fornecem resina natural.

## REFERÊNCIAS

- AMAZONIL, (2025). Produtos da floresta. Ananindeua – PA, Brasil. Disponível em: <https://amazonoil.com.br/produtos-da-floresta/resina-de-breu-branco-protium-heptaphyllum/>. Acesso em: maio de 2025.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – ANSI (2022). **ANSI A208.1:** Particleboards. Gaithersburg, United States.
- ARIANTI, I. et al. The Effect of Adding Plastic Bottle PET Waste in the Making of Sawdust Particleboard. **International Journal of Research Publication and Reviews**. 2 (2021) 737-744.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2013). **ABNT 14810-1:** Painéis de partícula de media densidade Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, Brasil
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2021). **ABNT 16915:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2022). **ABNT 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2024). **ABNT 14810-2:** Painéis de partículas de media densidade Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2024). **ABNT 6457:** Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2025). **ABNT 6458:** Solos – Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm. Rio de Janeiro, Brasil.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 1542 – 60**, 1993. Test method for qualitative detection of rosin in varnishes. United States, 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 1554 – 10**, 2016. Standard Terminology Relating to Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. United States, 2016.
- ATLAS DO PLÁSTICO, (2020). Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. Fundação Heirich Boll, Rio de Janeiro, Brazil. Disponível em: <https://br.boell.org/sites/default/files/2020-11/Atlas%20do%20PI%C3%A1stico%20-%20vers%C3%A3o%20digital%20-%2030%20de%20novembro%20de%202020.pdf>. Acesso em março de 2025.
- BEKHTA P. et al. Properties of eco-friendly particleboards bonded with lignosulfonate-ureaformaldehyde adhesives and PMDI as a crosslinker. **Materials**. 14 (2021) 4875.
- BENYATHIAR, P. et al. Polyethylene terephthalate (PET) bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: a review. **Polymers**. 14 (2022) 2366.

BISPO, R. A. *et al.* Physical and microstructural properties of coconut (cocos nucifera) particleboards bound with castor oil-based polyurethane resin. **BioResources**. 19-3 (2024) 6559-6568.

BISPO, R. A. *et al.* Production and evaluation of particleboards made from coconut fibers, pine and eucalyptus using bicomponent polyurethane-castor oil resin. **BioResources**. 17-3 (2022) 3944-3951.

BISPO, R. A. Produção e avaliação de painéis de partículas de fibra de coco, pinus e eucalipto aglutinadas com adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona. 2021, 124p. **Dissertação** (Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2021.

CAMPOS, C. I., LAHR, F. A. R., Production and characterization of MDF using eucalyptus fiber and castor-oil based polyurethane resin. **Materials Research**. 7 (2004) 421-425.

CAMPOS, P. H. S. *et al.* Evaluation and production of high-strength wood composite panels with polyethylene terephthalate (PET). **BioResources**. 18-4 (2023) 8528-8535.

CARVALHO, F. A. *et al.* Eco-friendly particleboard production: integrating recycled PET and bio-based pine resin adhesive. **BioResources**, 20-2 (2025) 3443-3452.

CAZELLA, P. H. *et al.* Polyethylene terephthalate (PET) as a recycled raw material for particleboards produced from pinus wood and biopolymer resin. **Journal of Cleaner Production**, 447 (2024) 141460.

CHEN, G. F. Developments in the field of rosin chemistry and its implications in coatings, **Progress in Organic Coatings** 20 (1992) 139–167.

CHEN, L. *et al.* Technological innovations review in reducing formaldehyde emissions through adhesives and formaldehyde scavengers for building materials. **Environmental Research**, 273 (2025) 121242.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Ficha de informação toxicológica: Formaldeído. Divisão de Saúde Humana e Saúde Ambiental. p. 3, (2022).

COMMERCIAL STANDART – CS (1966). **CS 236-66**: Mat formed wood particleboard. Washington D.C., United States.

DIAS, F. M. Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada. 2005. 116p. **Tese** (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Curso de Engenharia de Matérias, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2005.

DWIVEDI, P. *et al.* Thermogravimetric kinetic study of catalytic and non-catalytic pyrolysis of PET bottles and micro carbon rod formation. **The Journal of Chemical Thermodynamics**. 209 (2025) 107530.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Produtos florestais não madeireiros, p. 136. Rondônia, 2017.

EUROPEAN STANDARD – EN (2010). **EN 312**: Particleboards: specifications. British Standard Institution. London, United Kingdom.

FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção**, 6° ed., v. 01, Rio de Janeiro, LTC, (2019). 568 p. 24 x 17 cm.

FARIA, D. L. *et al.* Particleboards based on agricultural and agroforestry wastes glued with vegetal polyurethane adhesive: An efficient and eco-friendly alternative. **Industrial Crops & Products**, 214 (2024) 118540.

FLORPINUS INDÚSTRIA QUÍMICA, (2021). Infográfico: a química do breu. Campo Largo – PR, Brasil. Disponível em: <https://florpinus.com.br/wp-content/uploads/2021/08/infografico-breu.pdf>. Acesso em: março de 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Forest Products Conversion Factors**. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.4060/ca7952en>> Acesso em maio de 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Global initiative tackles marine litter to clean up the world's oceans**. Roma: FAO, (2021). Disponível em: <https://www.fao.org/newsroom/detail/Global-initiative-tackles-marine-litter-to-clean-up-the-world-s-oceans/en>. Acesso em janeiro de 2025.

GIROTO, D. H. *et al.* Diagnóstico PFNM – Produtos Florestais Não Madeireiros, p. 169, Jutaí-AM, 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório 2024**, p. 99. Brasília, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS – IPEF. Potencial e perspectivas do mercado. Circular técnica nº41, Departamento de Silvicultura – ESALQ-USP. 1978.

IWAKIRI, S., TRIANOSKI, R. **Painéis de Madeira Reconstituída**. 2. ed. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, (2020). 259 p.

IŽDINSKÝ, J. *et al.* Polyethylene terephthalate recycling in particleboard production. In: INTERNATIONAL ACADEMY OF WOOD SCIENCE MEETING, 2012. **Wood Best Material for Mankind Proceedings**. Arbora Publishes. (2013). p. 93-97. Svolen, Slovakia.

JOINT FOREST SECTOR QUESTIONNAIRE DEFINITIONS – JFSQ. Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa – UNECE, 2024.

JOSEPH, T. M. *et al.* Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, 9 (2024) 100673.

KLÍMEK, P. *et al.* Utilization of air-plasma treated waste polyethylene terephthalate particles as a raw material for particleboard production. **Composites Part B**, 90 (2016) 188-194.

KWON, E. E. *et al.* Polyethylene terephthalate production from a carbon neutral resource. **Journal of Cleaner Production** 469 (2024) 143210.

LAKSHMANAN, A. *et al.* Development of a non-wood composite from whole jute plant. **Materials Today: Proceedings**. 76 (2023) 239-246

LAO, W-L. *et al.* Carbon footprint as an environmental indicator for wood flooring industry in China. **Case Studies in Construction Materials**. 21 (2024) e03594.

LEE, S. H. *et al.* Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: a review. **Journal of Materials Research and Technology**. 20 (2022) 4630-4658.

LI, R. *et al.* A novel particleboard using unsaturated polyester resin as a formaldehyde-free adhesive. **Construction and Building Materials**. 148 (2017) 781-788.

LIGUORI, F. *et al.* Hydrolytic depolymerisation of polyesters over heterogeneous ZnO catalyst. **RSC Sustainability**. 1 (2023) 1394–1403.

LUKAWSKI, D. *et al.* Phenol-formaldehyde resin enriched with graphene nanoplatelets as an electroconductive adhesive for wood composites. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. 132 (2024) 103678.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard & dry-process fiber board manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Publications, 1977. 672 p.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard** vol I – Materials. Southern Illinois University Press, London – Amsterdam, 1974, 244 p.

MUHAIMIN, S. S. A. *et al.* Characterization of bamboo particleboard bonded with Nelumbo nucifera seed starch-citric acid-based adhesive. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 138 (2025) 103937.

NAKANISHI, E. Y. *et al.* Latex and rosin films as alternative waterproofing coatings for 3-layer sugarcane-bamboo-based particleboards. **Polymer Testing**, 75 (2019) 284-290.

N'EMEC, M. *et al.* Development of an innovative powder adhesive based on epoxy-polyester and lignin for production of particleboards. **Case Studies in Construction Materials**. 23 (2025) e04985.

NEELALOCHANA, V. D. *et al.* Polyethylene terephthalate (PET) waste in electrochemical applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 13 (2025) 116823.

NIKANISHI, E. Y. *et al.* Latex and rosin films as alternative waterproofing coatings for 3-layer sugarcane-bamboo-based particleboards. **Polymer Testing**, 75 (2019) 284-290.

PFEIL, W., PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 240 p. 28 x 21 cm.

PIETRZAK, K. *et al.* Effect of the addition of tall oil-based polyols on the thermal and mechanical properties of urethane elastomers. **Polymer Degradation and Stability**. 108 (2014) 201-211.

PIZZI, A. **Aminoresin and wood adhesive**. Wood Adhesives: Chemistry and technology. Dekker, New York, Vol.1, 1983, 59-104p.

QUIMISUL SC BRASIL – Produtos Químicos e Laboratório. **Peso específico do breu colofônia**. Santa Catarina: QUIMISUL, (2025). Disponível em: <https://quimisulsc.com.br/produto/breu/?srsltid=AfmBOooMKTFJFF9ceVYnd1tIWbrVxmIpHK0jcMdPEbFXZziFhmTogc9a>. Acesso em março de 2025.

RAHMAN, K-S. *et al.* Flat-pressed wood plastic composites from sawdust and recycled polyethylene terephthalate (PET): physical and mechanical properties. **SpringerPlus**. 2 (2013) 629.

RAVINDRAN L. *et al.* A comprehensive review on phenol-formaldehyde resin-based composites and foams. **Polymer Composites**. 43 (2022) 8602–8621.

RODRIGUES, F. R. Particleboard composite made from pinus and eucalyptus residues and polystyrene waste partially replacing the castor oil-based polyurethane as binder. **Materials Research**. 26 (2023) suppl.1.

SALTHAMMER, T. *et al.* Formaldehyde in the Indoor Environment. **Chemical Reviews**, 110 (2010) 2536–2572.

SELBO, M. L. **Adhesives bonding of wood**. Technical Bulletin. n.1512, Washington DC, 1975.

SHIXIAN, F. *et al.* Thermal depolymerization of polyethylene terephthalate waste and its use in coal-blending coking. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**. 53 (2025) 602-612.

SKEIST, I. **Handbook of adhesives**. Reinhold Publishing. Nova York, 1962.

SNIF - Sistema Nacional de Informações Florestais. **Boletim SNIF 2024**. ed. 1. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2024.

SOUZA, M. V. *et al.* Painéis aglomerados com resíduo de Pinus caribaea var. caribaea com adesivo bicomponente sustentável. **Ambiente Construído**, 23-3 (2023) 263-276.

SOUZA, M. V. *et al.* Use of Eucalyptus urophylla waste as raw material in composite particleboards. **Maderas Ciencia y Tecnologia**, 27 (2025) 19.

SUGAHARA, E. S. *et al.* High-density particleboard made from agro-industrial waste and different adhesives. **BioResources**, 14-3 (2019) 5162-5170.

THUSHARI, G. G. N. *et al.* Plastic pollution in the marine environment. **Heliyon**. 6 (2020) e04709.

UMDAGAS, L. *et al.* Advances in chemical recycling of polyethylene terephthalate (PET) via hydrolysis: A comprehensive review. **Polymer Degradation and Stability**, 234 (2025) 111246.

VIEIRA, A. **Sermões do Padre Antonio Vieira**. Lisboa, 1. ed. v.1, Oficina de Miguel Deslandes, 1679.

WANG, J. *et al.* Preparation and characterization of natural rosin stabilized nanoparticles via miniemulsion polymerization and their pressure-sensitive adhesive applications. **Industrial Crops & Products**, 124 (2018) 244-253.

WETHTHASINGHE, K. K. *et al.* Carbon footprint of wood and plastic as packaging materials – An Australian case of pallets. **Journal of Cleaner Production**. 363 (2022) 132446.

WU, H. *et al.* A sustainable adhesive via one-pot simple preparation derived from bio-sourced phytic acid and corn starch for green wood panels: Ideal bonding performance and ultra-high flame retardancy. **Chemical Engineering Journal**, 508 (2025) 161026

XIE, Y. L. *et al.* Integration of UV-vis spectroscopy and machine learning for identification of recycled polyethylene terephthalate. **Food Packaging and Shelf Life**, 48 (2025) 101463.

XU, S. *et al.* Formaldehyde-free mycelium composites production from spent mushroom substrates for particleboard substitution: Physical, antimicrobial, and environmental assessments. **Chemical Engineering Journal**, 482 (2024) 149170.

ZHANG, L. *et al.* Development of plant oil-based adhesives for formaldehyde-free bamboo particleboards. **Industrial Crops & Products**, 210 (2024) 118146.

ZHANG, T. *et al.* Preparation of wood formaldehyde-free adhesive by concentrated water delignification black liquor. **Journal of Cleaner Production**, 491 (2025) 144869.