

# RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o arquivo completo desta tese só será disponibilizado somente a partir de 01/08/2026.

**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 TEREFTALATO 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

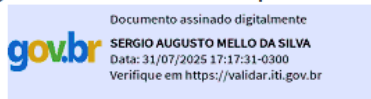
TÍTULO DA TESE: Produção e avaliação de painéis de partícula com resina alternativa de polietileno tereftalato e breu colofônia

**AUTOR: RODRIGO ANDRAUS BISPO**

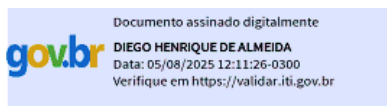
**ORIENTADOR: JORGE LUIS AKASAKI**

**COORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA**

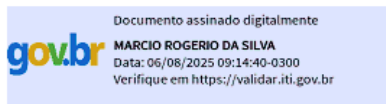
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciência dos Materiais, área: Ciência e Engenharia dos Materiais pela Comissão Examinadora:



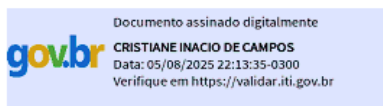
Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



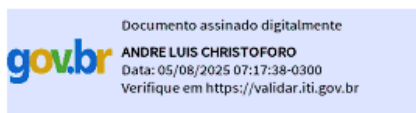
Prof. Dr. DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA (Participação Virtual)  
Departamento Acadêmico de Engenharia Civil / Universidade Federal de Rondônia - UNIR



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: 24° CBECiMat (2022), XXI B-MRS Meeting (2023) e 25° 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 µm, 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°C, P = 5,7MPa). 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<sup>30</sup> and C3<sup>30</sup> 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 exportação 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 lepas, (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>	Resultados das propriedades mecânicas dos painéis.....	127
<b>Figura 76</b>	Gráficos de interação entre fatores (%Res x %PETr) das propriedades físicas.....	129
<b>Figura 77</b>	Gráficos de interação entre fatores (%Res x %PETr) das 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>Recycled 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

<i>B</i>	Largura do corpo de prova (mm);
<i>CV</i>	Coefficiente de variação (%);
<i>D</i>	Densidade (g/cm <sup>3</sup> );
<i>D<sub>cp</sub></i>	Densidade do corpo de prova (g/cm <sup>3</sup> );
<i>D<sub>p</sub></i>	Densidade nominal do painel (g/cm <sup>3</sup> );
<i>D<sub>a</sub></i>	Distância entre os apoios do aparelho (mm);
<i>D%</i>	Variação percentual da densidade;
<i>D<sub>média</sub></i>	Densidade média das composições (g/cm <sup>3</sup> );
<i>E</i>	Espessura do corpo de prova (mm);
<i>E<sub>0</sub></i>	Espessura do corpo de prova antes da imersão (mm);
<i>E<sub>1</sub></i>	Espessura do corpo de prova após o período de 24 horas de imersão (mm);
<i>I</i>	Inchamento em espessura do corpo de prova (%);
<i>M<sub>p</sub></i>	Massa de partículas (g);
<i>M<sub>cp</sub></i>	Massa do corpo de prova (g);
<i>M<sub>1</sub></i>	Massa do conjunto (picnômetro + álcool absoluto + partículas submersas) (g);
<i>M<sub>2</sub></i>	Massa do conjunto (picnômetro + álcool absoluto) (g);
<i>M<sub>An</sub></i>	Massa de água necessária para atingir o teor de umidade desejado (g);
<i>MOE</i>	Módulo de elasticidade (N/mm <sup>2</sup> );
<i>MOR</i>	Módulo de resistência à flexão estática (N/mm <sup>2</sup> );
<i>M<sub>Pi</sub></i>	Massa das partículas no teor de umidade inicial (g);
<i>M<sub>s</sub></i>	Massa seca das partículas (g);
<i>M<sub>u</sub></i>	Massa úmida das partículas (g);
<i>P</i>	Carga de ruptura (N);
<i>P<sub>1</sub></i>	Carga no limite proporcional, lida no indicador de cargas (N);
<i>S</i>	Área da superfície do corpo de prova (mm <sup>2</sup> );
<i>TP</i>	Resistência à tração perpendicular (N/mm <sup>2</sup> );
<i>U</i>	Teor de umidade das partículas (%);
<i>U<sub>d</sub></i>	Teor de umidade desejado das partículas (%);

$U_i$	Teor de umidade inicial das partículas (%);
$V_{cp}$	Volume do corpo de prova ( $\text{mm}^3$ );
$V_p$	Volume final do painel ( $\text{cm}^3$ );
$b_1 e b_2$	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 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );
$\rho_w$	Massa específica do álcool absoluto ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );
$\pm$	Mais ou menos;
%	Percentual;
$^{\circ}\text{C}$	Graus Célsius;
"	Polegadas.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	27
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	27
1.2	OBJETIVOS.....	30
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	30
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	30
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	31
2.1	PAINEL DE PARTÍCULAS – <i>PARTICLEBOARDS</i> .....	31
<b>2.1.1</b>	<b>Definição</b> .....	31
<b>2.1.2</b>	<b>Classificação por finalidade de uso</b> .....	33
<b>2.1.3</b>	<b>Desempenho econômico e industrial</b> .....	34
<b>2.1.4</b>	<b>Características gerais</b> .....	38
2.2	FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES DOS PAINEIS.....	39
<b>2.2.1</b>	<b>Geometria das partículas</b> .....	39
<b>2.2.2</b>	<b>Densidade das partículas</b> .....	40
2.3	PARTÍCULAS.....	41
<b>2.3.1</b>	<b>Pinus</b> .....	41
2.4	ADESIVO.....	43
<b>2.4.1</b>	<b>Adesivos convencionais</b> .....	43
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> .....	45
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> .....	56
2.5	PAINÉIS DE PARTÍCULAS ALTERNATIVOS.....	56
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	73
3.1	COMPOSIÇÕES PROPOSTAS.....	73
3.2	MATERIAIS.....	74
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	76
<b>3.3.1</b>	<b>Composição granulométrica</b> .....	76
<b>3.3.2</b>	<b>Massa específica das partículas</b> .....	78

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

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

# 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 sobriedade 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.*

## 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

- AMAZONOIL, (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%3%A1stico%20-%20vers%3%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, Jutai-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 ureaurethane 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/?srsId=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.