

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE**  
**MATERIAIS**

**RICARDO SILVÉRIO FERREIRA**

**PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DE UM COMPÓSITO PLÁSTICO - MADEIRA A  
BASE DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO/ FIBRA DE VIDRO/ POLIETILENO DE  
ALTA DENSIDADE**

**LONDRINA**

**2022**

**RICARDO SILVÉRIO FERREIRA**

**PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DE UM COMPÓSITO PLÁSTICO - MADEIRA A  
BASE DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO/FIBRA DE VIDRO/ POLIETILENO DE  
ALTA DENSIDADE**

**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF A PLASTIC COMPOSITE -  
WOOD BASED ON EUCALYPTUS RESIDUES / FIBERGLASS / HIGH DENSITY  
POLYETHYLENE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Londrina.

Orientador: Prof. Dr. Elton Guntendorfer Bonafé

**LONDRINA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Câmpus Londrina



**RICARDO SILVERIO FERREIRA**

**PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DE UM COMPÓSITO PLÁSTICO-MADEIRA A  
BASE DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO/FIBRA DE VIDRO/POLIETILENO DE ALTA  
DENSIDADE**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciência E Engenharia De Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Materiais Para Aplicação Em Engenharia E Tecnologia.

Data de aprovação: 30 de Agosto de 2022

Elton Guntendorfer Bonafe, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Oscar De Oliveira Santos Junior, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá (Uem)

Rodolfo Krul Tessari, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/08/2022.

[https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno08/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?p\\_pesscodnr=227488&p\\_cade docpescodnr=83100&p\\_cadedoccodnr=85056&p\\_cargo=&p\\_tipo=3&p\\_retorno=](https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno08/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?p_pesscodnr=227488&p_cade docpescodnr=83100&p_cadedoccodnr=85056&p_cargo=&p_tipo=3&p_retorno=)

FERREIRA, Ricardo Silvério. **Preparo E Caracterização De Um Compósito Plástico - Madeira A Base De Resíduos De Eucalipto/Fibra De Vidro/Poliétileno De Alta Densidade**. 2022. 27p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais (PPGCEM) – UTFPR.

## RESUMO

Os compósitos de plástico-madeira são compostos por um reforço, podendo ser finas partículas de madeira envolvidas em uma matriz polimérica. Essa mistura visa reduzir custo de produção além de diminuir o consumo de madeira, como nos produtos tradicionais. Esses materiais normalmente são produzidos a partir de resíduos de madeira, cascas de arvores, casca de coco, e polímeros de baixo custo comercial (muitas vezes reciclados). Neste sentido, o objetivo do projeto foi produzir WPCs empregando uma mistura de serragem de eucalipto, com fibras de vidro combinadas com o polietileno de alta densidade, por um processo de extrusão convencional. A quantidade da matriz foi fixada em 60% (m/m massa total dos WPCs) e as proporções de serragem de eucalipto e fibra de vidro (St/FG) foram de 100, 75, 25, 0% (m/m) em relação ao teor de material reforço. Os materiais compósitos preparados foram caracterizados por MEV-EDS, DSC, FTIR, umidade, densidade e capacidade de absorção de água. As análises de densidade e umidade mostraram que a adição de serragem, fibra de vidro na matriz de HDPE causaram alteração na estrutura química do material. Tal informação também foi corroborada pelos espectros de FTIR. Além disso, os dados de DSC mostraram que o material compósito apresentou estabilidade térmica superior a 130°C e baixa retenção de umidade. Entre todos os materiais, a formulação 40St foi a que apresentou melhor resistência a compressão, maior que a matriz pura. Neste sentido, os resultados indicaram que foi possível produzir e substituir 40% do HDPE por serragem, coproduto da madeira, melhorando as propriedades de compressão. Esse material tem potencial aplicação em regiões de altas temperaturas e umidade como acabamentos (decks externos, grades, bancos de parque, cercas, portas e janelas).

**Palavras-chave:** fibras naturais, fibras sintéticas, polietileno de alta densidade.

FERREIRA, Ricardo Silvério. **Preparo E Caracterização De Um Compósito Plástico – Madeira A Base De Resíduos De Eucalipto/Fibra De Vidro/Polietileno De Alta Densidade**. 2022. 27p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais (PPGCEM) – UTFPR.

### **ABSTRACT**

Wood-plastic composites are composed of a reinforcement, which can be fine wood particles wrapped in a polymer matrix. This mixture aims to reduce production costs in addition to reducing wood consumption, as in traditional products. These materials are typically produced from wood waste, tree bark, coconut husks, and low-cost commercial polymers (often recycled). In this sense, the objective of the project was to produce WPCs using a mixture of eucalyptus sawdust, with glass fibers combined with high density polyethylene, through a conventional extrusion process. The amount of matrix was fixed at 60% (w/w total mass of WPCs) and the proportions of eucalyptus sawdust and fiberglass (St/FG) were 100, 75, 25.0% (w/w) in relation to the content of reinforcing material. The composite materials prepared were characterized by SEM-EDS, DSC, FTIR, moisture, density and water absorption capacity. The density and moisture analyzes showed that the addition of sawdust, fiberglass in the HDPE matrix caused changes in the chemical structure of the material. Such information was also corroborated by the FTIR spectra. In addition, the DSC data showed that the composite material showed thermal stability above 130°C and low moisture retention. Among all materials, the 40St formulation presented the best compressive strength, higher than the pure matrix. In this sense, the results indicated that it was possible to produce and replace 40% of HDPE with sawdust, a wood co-product, improving the compression properties. This material has potential application in regions of high temperature and humidity as finishes (external decks, railings, park benches, fences, doors and windows).

**Keywords:** natural fibers, synthetic fibers, high density polyethylene.

## LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Tipos de materiais compósitos. ....	9
<b>Figura 2:</b> Classificação dos tipos de compósitos utilizando vários tipos de reforço. ...	10
<b>Figura 3:</b> Estrutura química representativa das matrizes poliméricas empregadas como WPCs.....	12
<b>Figura 4:</b> Estrutura química do polietileno e esquema dos diferentes tipos de polietileno. ....	13
<b>Figura 5:</b> Imagens digitais do HDPE e dos materiais compósitos plástico-madeira....	20
<b>Tabela 1:</b> Propriedades físico-química do HDPE e dos materiais compósitos plástico madeira.....	23
<b>Figura 6:</b> Espectros de FTIR para os precursores e dos materiais compósitos.....	24
<b>Figura 7:</b> Curvas de DSC dos precursores e diferentes misturas para o compósito plástico-madeira. ....	25
<b>Figura 8:</b> Micrografias dos precursores e diferentes misturas para o compósito plástico-madeira.....	27
<b>Figura 9:</b> Mapeamento e composição atômica da superfície dos precursores e misturas para o compósito plástico-madeira.....	29
<b>Figura 10:</b> Imagens digitais dos corpos de prova dos materiais antes e após a execução dos ensaios. ....	30

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**WPCs** - wood-plastic composites

**St** – Serragem Eucalipto

**FG** – Fibra de Vidro

**MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura;

**EDS** – Espectroscopia de Energia Dispersiva

**DSC** – Calorimetria Exploratória Diferencial

**FTIR** - Espectroscopia na região do Infravermelho;

**HDPE** – Polietileno de Alta Densidade

**PE** - Polietileno

**PS** - Poliestireno

**PP** – Polipropileno

**LDPE** – Polietileno de Baixa Densidade

**PLA** – Poli ácido-áctico

**PVC** – poli cloreto de vinila

**LLDPE** - Linear de Baixa Densidade

**G** - Guaiacil

**S** – Siringil

**PLA** - Àcido Polilático

**ASTM** – American Society for Testing

**GB/T 1043.1-2008** – Determinação das Propriedades de Impacto

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1 Compósitos .....	9
1.2 Compósitos plástico-Madeira (WPC) .....	10
1.3 Componentes empregados na obtenção dos WPCs .....	12
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1 Objetivo geral .....	16
2.2 Objetivo específico .....	16
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
3.1 Materiais .....	17
3.2 Parâmetros mecânicos da extrusora .....	17
3.3 Preparação dos compósitos de madeira-plástica .....	17
3.4 Densidade .....	18
3.5 Retenção de água (%) .....	18
3.6 Propriedades mecânicas .....	19
3.7 Microscopia eletrônica de varredura .....	19
3.8 DSC .....	19
3.9 FTIR .....	19
3.10 Análise estatística .....	19
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>20</b>
4.1 Obtenção dos materiais compósitos plástico-madeira .....	20
4.2 Propriedades físico-química dos materiais compósitos plástico-madeira .....	22
4.3 FTIR .....	24
4.4 DSC .....	25
4.5. MEV .....	26
4.6 EDS .....	28
4.7 Caracterização mecânica .....	29
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>31</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>32</b>

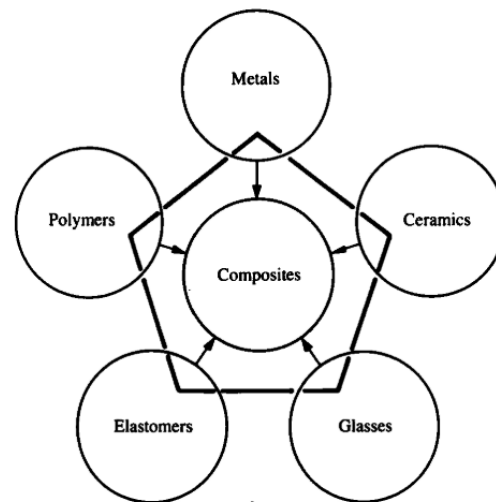


## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Compósitos

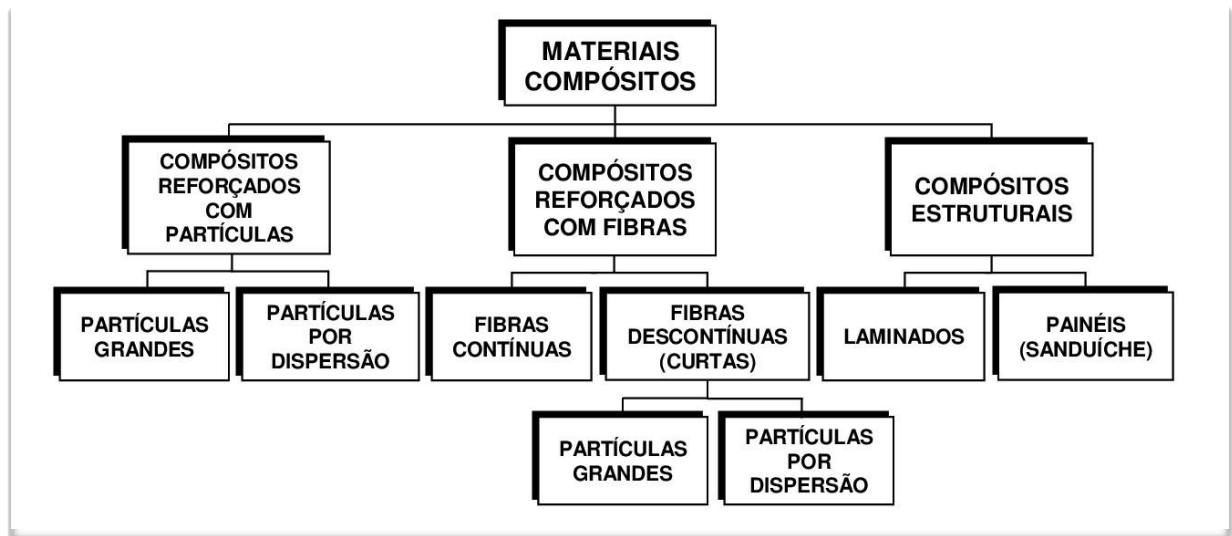
Compósitos por definição, são materiais estruturais resultantes através da combinação de dois ou mais materiais imiscíveis, com propriedades químicas e/ou físicas diferentes e mecânicas complementares (**Figura 1**). Eles são considerados materiais heterogêneos e multifásicos. A fase matriz é responsável pela transferência de esforços, e a fase de reforço, garante resistência ao esforço. A matriz normalmente é contínua, como polímeros, inseridas na fase de reforço (fibras, flocos, etc) (Sajan & Philip Selvaraj, 2021). Registros evidenciaram o uso destes materiais em indústrias aeroespaciais na década de 1970.

Atualmente são empregados em equipamentos para uso esportivo, naves espaciais, aviões, barcos, pontes, automóveis e prédios (Zakaria et al., 2019).



**Figura 1:** Tipos de materiais compósitos.

Os materiais compósitos são classificados em três grupos principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais conforme **Figura 2** (CALLISTER JR. W.D.; RETHWISH, 2016).



24  
25 **Figura 2:** Classificação dos tipos de compósitos utilizando vários tipos de reforço.

26 Fonte: Adaptado de (CALLISTER JR. W.D.; RETHWISH, 2016).

27 A crescente aplicação dos materiais compósitos é devida às vantagens em  
28 relação aos materiais convencionais. Eles são mais leves em peso, rigidez e  
29 resistência ideais, resistentes à corrosão, custos de produção baixos, expansão  
30 térmica e condutividade elétrica menores que o metal. Em compósitos de matriz  
31 termoplástica, as peças podem ser feitas e unidas por aquecimento. Além disso,  
32 qualquer sucata pode ser reutilizada e remodelada (M. et al., 2018). Na área da  
33 engenharia, os compósitos de plástico-madeira (WPC) têm mostrado  
34 promissoras aplicações tanto para ambientes residenciais como industriais.

### 35 36 **1.2 Compósitos plástico-Madeira (WPC)**

37 Os compósitos plástico-madeira (do inglês, wood-plastic composites, WPC)  
38 são materiais compósitos obtidos a partir de elementos a base de madeira, como  
39 folheado, fibras ou partículas, que são combinadas com polímeros para criar um  
40 compósito. É um termo amplamente utilizado e, como tal, os elementos de madeira  
41 podem ser combinados com polímeros termofixos (não são reprocessados) ou  
42 termoplásticos (podem ser remodelados com aquecimento). Os Termoplásticos  
43 consistem em macromoléculas de comprimento na ordem de 20 a 30 nm e fluem  
44 facilmente sob tensão sem elevadas temperaturas, permitindo assim ser fabricados  
45 no formato solicitado e mantendo a forma quando resfriados à temperatura ambiente.

46           Esses polímeros podem ser repetidamente aquecidos, fabricados, resfriados e,  
47           consequentemente, serem reciclados. As matrizes poliméricas termoplásticas são  
48           mais empregadas em WPC devido ao seu baixo custo, ampla disponibilidade e baixas  
49           temperaturas de processamento (geralmente < 225 °C), que são adequadas para  
50           processar fibras naturais sem que sofram degradação térmica(Wang et al., 2020; X.  
51           Zhao, Li, Wang, Tekinalp, Larsen, et al., 2020; X. Zhao, Li, Wang, Tekinalp, Richard,  
52           et al., 2020). Os termoplásticos mais conhecidos são acrílicos, nylon (poliamida),  
53           polietileno (PE), poli (éter-éter cetona), poliestireno (PS) e polipropileno (PP) (Nazário  
54           et al., 2016).

55           Assim como outros materiais compósitos, os materiais constituintes são  
56           preservados em suas formas originais e são incorporados para obter um novo material  
57           compósito com propriedades mecânicas e físicas adequadas à sua aplicação e de  
58           baixo custo (Elsheikh et al., 2022; Haque et al., 2019; Yang et al., 2019). Esses  
59           materiais podem ser produzidos por extrusão, moldagem por injeção e moldagem por  
60           compressão ou prensagem. Os processos de fabricação mais recentes para WPC  
61           incluem fabricação aditiva por meio de modelagem de camada fundida e sinterização  
62           a laser (Gardner et al., 2015).

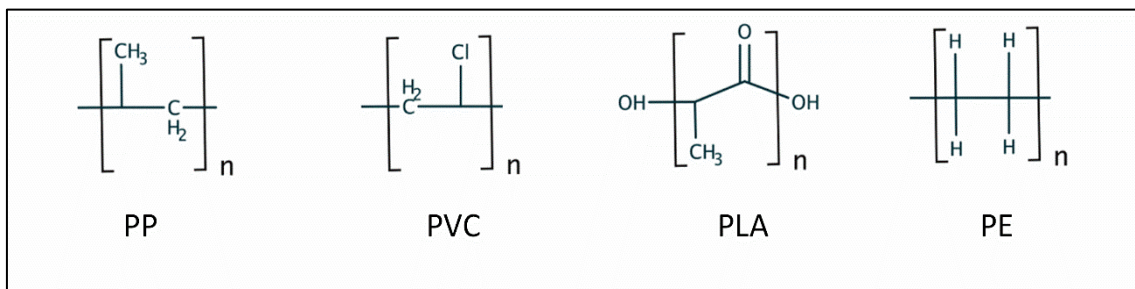
63           Ainda, podem ser produzidos na forma de pranchas ou vigas que podem ser  
64           utilizadas como pisos de decks externos, grades, bancos de parque, toalhas de porta  
65           de carro, encostos de assento de carro, cercas, molduras de portas e janelas,  
66           estruturas de placas de madeira e móveis internos, potencial aplicação em painéis de  
67           isolamento térmico e acústico (Haque et al., 2019; Yang et al., 2019). Os diferentes  
68           nichos de mercado alcançados se devem a características positivas como alta rigidez,  
69           reciclabilidade, baixo custo, baixa densidade e propriedades mecânicas boas para a  
70           sua finalidade (Lei et al., 2015). Além disso, são ecologicamente corretos,  
71           biodegradáveis, renováveis e contribuem para a redução do efeito estufa (Mittal et al.,  
72           2016; Sanjay et al., 2018).

73           De forma a garantir o desenvolvimento sustentável, muito se estuda para  
74           conservar e preservar o ambiente, especialmente quando o resíduo agride e polui,  
75           como é o caso dos materiais plásticos. A degradação desses materiais demanda  
76           muito tempo, e ainda quando queimados produzem gases tóxicos como as dioxinas,  
77           furanos, mercúrio, bifenilos policlorados, entre outros (Caraschi & Leao, 2002). Além  
78           disso, resíduos provenientes de grandes madeireiras também afetam o equilíbrio do

79 meio ambiente. Estima-se que no Brasil aproximadamente 30 milhões de toneladas  
 80 de resíduos de madeira são produzidos pelo mercado de madeiras (Biomassa-BR,  
 81 n.d.). Neste sentido, a madeira plástica é uma excelente alternativa sustentável que  
 82 utiliza da mistura de vários elementos, dentre eles resíduos (sub-produtos)  
 83 combinados com polímeros para produzir um novo produto com valor agregado a  
 84 partir de precursores de baixo valor comercial.

### 85 1.3 Componentes empregados na obtenção dos WPCs

86 Os compósitos de plástico-madeira são produzidos empregando um material  
 87 plástico como matriz e, madeira como enchimento (Gardner et al., 2015). Várias  
 88 matrizes poliméricas têm sido aplicadas na preparação dos WPCs. Eles são polietileno  
 89 de alta densidade (HDPE), polietileno de baixa densidade (LDPE), polipropileno (PP),  
 90 Poli(ácido-ácico) (PLA), poli(cloreto de vinila) (PVC) e poli(estireno) (PS) (Figura 3)  
 91 (Elsheikh et al., 2021). Esses polímeros devem garantir condições de  
 92 processabilidade (temperatura de fusão e pressão) que não degradem termicamente  
 93 os constituintes da madeira. As fibras da madeira das cadeias de celulose podem se  
 94 desintegrar quando exposta à temperaturas superior a 200°C (Elsheikh et al., 2021;  
 95 Gardner et al., 2015).

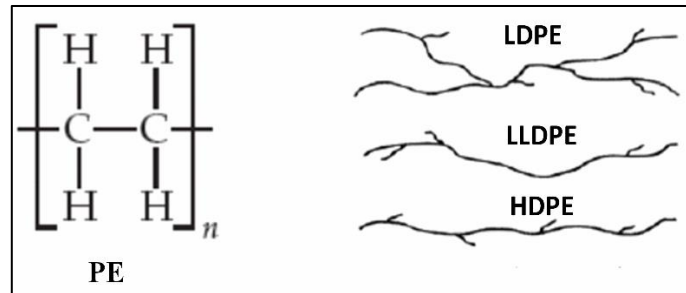


96

97 **Figura 2 :** Estrutura química representativa das matrizes poliméricas empregadas como WPCs. Fonte:  
 98 (X. Zhao et al., 2022)

99 O polietileno é um material biocompatível, classificado como uma poliolefina  
 100 com processos de fabricação desenvolvidos em três grupos principais com referência  
 101 à sua faixa de densidade. É possível produzir polietileno de baixa densidade (LDPE),  
 102 linear de baixa densidade (LLDPE) e de alta densidade (HDPE), dependendo do grau  
 103 de ramificação na estrutura da molécula (Sirin et al., 2022) (**Figura 4**). O HDPE tem  
 104 resistência a diversos solventes, alta relação resistência-densidade e alta resistência  
 105 específica (Elsheikh et al., 2022). No entanto, é caracterizado como um material com

106 baixa resistência (Babikir et al., 2019; Elsheikh et al., 2020). Portanto, outros materiais  
 107 são combinados durante o processo de produção para melhorar suas propriedades  
 108 mecânicas. Resíduos de madeiras têm sido utilizados como fonte natural de fibras  
 109 para reforçar compósitos poliméricos (X. Zhao et al., 2022), além de diminuir os custos  
 110 de produção e reduzir impactos ambientais.



111

112 **Figura 3:** Estrutura química do polietileno e esquema dos diferentes tipos de polietileno.

113 Polietileno (PE); polietileno de baixa densidade - LDPE; polietileno de baixa densidade e cadeia linear  
 114 – LLDPE; polietileno de alta densidade - HDPE.

115 A madeira é uma matéria-prima que tem uso em diferentes áreas no planeta.  
 116 Suas características garantem aplicação como ferramentas, abrigos, móveis, fonte de  
 117 calor, transporte, decoração, entre outras. Em países em desenvolvimento, ela é  
 118 responsável como fonte de abastecimento de combustível. Fatores como baixa  
 119 densidade, alta tenacidade e não ser tóxica tem impulsionado seu uso ao ponto de  
 120 escassez em alguns lugares (Bhaskar et al., 2020).

121 Os principais componentes macromoleculares presentes em todas as madeiras  
 122 são celulose, hemiceluloses e ligninas. A proporção destes componentes varia em  
 123 função da espécie. Estão relacionados a parte estrutural do vegetal. Em média  
 124 representam 45% de celulose, 30% de hemicelulose e 20% de ligninas (X. Zhao, Li,  
 125 Wang, Tekinalp, Larsen, et al., 2020).

126 A celulose é considerada um políssacarídeo linear de alto peso molecular,  
 127 unidas por ligações glicosídicas  $\beta$ -D, 1-4, considerada o principal componente das  
 128 paredes celulares dos vegetais (Xu et al., 2020). As hemiceluloses estão associadas  
 129 com as moléculas de celulose nas paredes celulares. Composta por açúcares neutros  
 130 como glucoses, manose e galactose (hexoses), xilose e arabinose (pentoses). São  
 131 cadeias moleculares mais curtas que a celulose, podendo ter ramificações em suas  
 132 cadeias laterais.

133 A lignina é um biomaterial composta por grupos aromáticos mais abundante.  
134 Esta macromolécula é composta por três subestruturas de fenilpropano metoxilado  
135 (guaiacil (G), siringil (S) e *p*-hidroxifenil (H) [4-5]. As estruturas de lignina variam de  
136 acordo com os tipos de biomassas lignocelulósicas. Por exemplo, em madeira macia  
137 seu teor varia de 25 a 31%, contendo exclusivamente unidades G. A madeira dura  
138 contém 16-24% da lignina, compreendendo unidades G e S. Para matérias-primas de  
139 biomassa herbácea, o teor de lignina é de cerca de 16-21%, contendo todas as três  
140 unidades, juntamente com ácidos hidroxicinâmicos, (ácido ferúlico e *p*-cumárico ) [6].  
141 Essas unidades de lignina são tipicamente ligadas a ligações éter ( $\beta$ -O-4 e  $\alpha$ -O-4) e  
142 carbono-carbono ( $\beta$ - $\beta$ ,  $\beta$ -5, etc.) [1, 3, 5, 8].

143 A madeira advinda da cultura do eucalipto apresenta importância comercial  
144 significativa na economia brasileira. Dados obtidos da Indústria Brasileira de Árvores,  
145 são aproximadamente um montante de 5,5 milhões de hectares plantados no território  
146 nacional, com produtividade média de 39 m<sup>3</sup>/ha/ano. Em geral, a cultura de eucalipto  
147 tem sido desenvolvida com destaque devido a algumas características, como  
148 crescimento rápido, capacidade de adaptação em regiões com condições  
149 edafoclimáticas diferentes, entre outras. Além disso, a madeira do eucalipto apresenta  
150 utilização diversificada nas mais diversas áreas e, portanto, possui um potencial  
151 econômico diferenciado (*Embrapa*, n.d.).

152 Entretanto, o processamento desta madeira gera uma quantidade de resíduos  
153 expressiva. Aproximadamente 60% do volume total da tora são aproveitados,  
154 produzindo três tipos de coprodutos: serragem, cepilho e lenha. A serragem é  
155 considerada um coproduto da madeira. Ela é fruto do processo de usinagem em  
156 madeireiras, onde uma pequena parte é reaproveitada (De Lima & Da Silva, 2005).

157 Fibras naturais, como a serragem, têm sido incorporados em diferentes  
158 polímeros para produzir WPC. As fibras naturais, além de serem eficientes no reforço  
159 dos compósitos, são sustentáveis, biodegradáveis, excelente razão rigidez/peso,  
160 baixa abrasão, e mais baratas que as fibras sintéticas. Os benefícios comuns da  
161 utilização de fibras naturais para polímeros de reforço incluem sua natureza “verde” e  
162 sustentável, biodegradabilidade, excelente relação rigidez/peso, baixa abrasão e  
163 baixo custo (C. Liu et al., 2020; X. Zhao, Li, Wang, Tekinalp, Richard, et al., 2020).  
164 Além disso, os WPCs têm maior resistência a água, utilizam menos madeira, além de  
165 reduzir custos de produção (Bhaskar et al., 2020).

166 WPCs são compostos principalmente de polímero e madeira. Apesar disso,  
167 fibras sintéticas também têm sido utilizadas. Elas resultam em materiais finais com  
168 melhores propriedades mecânicas, mantendo as características da madeira na  
169 superfície dos WPCs. Dentre as fibras sintéticas estão as fibras de vidro (Jiang et al.,  
170 2007; Tamrakar et al., 2012; Zolfaghari et al., 2013). As fibras de vidro são  
171 amplamente utilizadas na fabricação de compósitos pois apresentam fácil  
172 acessibilidade e baixo custo comercial, indo de encontro com o objetivo dos WPCs.  
173 Essas fibras são obtidas a partir do vidro. São compostas quimicamente por partículas  
174 de sílica e distribuídas em uma rede de silício-oxigênio de característica amorfa. São  
175 encontradas como lã, malha, placa e fios. Os filamentos que compõe esses materiais  
176 podem variar de 5-24  $\mu\text{m}$  (Rajesh et al., 2021). Apesar das fibras terem sido  
177 produzidas a partir de um material frágil, elas são responsáveis por propriedades  
178 satisfatórias, como baixo coeficiente de dilatação térmica, resistência a tração e a  
179 vibração, retenção das propriedades mecânicas a altas temperaturas, grande  
180 alongamento na ruptura, facilidade de processamento e baixo custo (relatado  
181 anteriormente).

182 Os materiais compósitos de plástico-madeira foram produzidos através da  
183 combinação de vários polímeros e madeira. Zhao e colaboradores produziram WPCs  
184 a partir da mistura de ácido polilático (PLA) com fibras naturais de pinho modificadas  
185 com epóxi em diferentes quantidades (0.5-4%) (X. Zhao, Li, Wang, Tekinalp, Larsen,  
186 et al., 2020). Compósito de madeira plástica foram obtidos a partir da mistura de  
187 serragem de pinho com polietileno de alta densidade empregando um agente  
188 compatibilizador – Dupont Fusabond® E265 (Horta et al., 2017). Fibras de vidro foram  
189 combinadas com farinha de carvalho e HDPE para formar WPCs usando o polietileno  
190 grafado com anidrido maleico como agente de acoplamento. Pratheep e autores  
191 preparam WPCs ecologicamente corretos usando pó de sabugo de milho e pó de fibra  
192 de coco combinados com PVC (Pratheep et al., 2020). No entanto, não foi encontrado  
193 na literatura WPCs baseados na mistura de serragem de eucalipto, fibra de vidro e  
194 HDPE.

195

196

197

198

199

200

201

202

203

## 204 2. OBJETIVOS

205

206

### 2.1 Objetivo geral

207

208

209

- Produzir compósitos plástico-madeira a partir da mistura de serragem de eucalipto e fibra de vidro combinados com polietileno de alta densidade a partir do processo de extrusão convencional.

210

### 2.2 Objetivo específico

211

212

213

- Preparar compósitos de plástico-madeira empregando fibras naturais de serragem de eucalipto e fibras de vidro combinados com polietileno de alta densidade;

214

215

- Determinar a melhor proporção entre os agentes de enchimento serragem de eucalipto e fibras de vidro;

216

- Determinar a densidade, umidade e capacidade de absorção de água;

217

218

- Avaliar a propriedade mecânica de resistência à compressão dos materiais finais e comparar com o polietileno de alta densidade puro;

219

220

- Caracterizar o material por FTIR, MEV-EDS e DSC, Densidade; Absorção de Água, Ensaio Mecânicos de Compressão.

221

222

223

224



225

226

### 227 **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### 228 **3.1 Materiais**

229 O polímero comercial puro polietileno de alta densidade (HDPE) foi obtido na  
230 forma de granulado por uma indústria local atuante no setor de reciclagem. A fibra  
231 sintética de vidro foi fornecida por uma empresa atuante no ramo de isolamento  
232 térmico. E a serragem de eucalipto foi obtida através das operações de corte com  
233 serra-fita e serra-circular, cedida por uma madeireira local.

#### 234 **3.2 Parâmetros mecânicos da extrusora**

235 A extrusora compõem-se de um motor WEG de 3CV 3.400RPM, equipado com:  
236 redutor modelo axial de relação de 1:32; acoplamento D5 de característica elástico;  
237 eixo da rosca principal de alimentação em Aço SAE1045 com comprimento de  
238 500mm; canhão do diâmetro de 2 polegadas Aço SAE1045; matriz de saída Aço  
239 SAE1045 com diâmetro interno de 32mm; sistema de saída para refrigeração do  
240 polímero extrusado em Aço Inoxidável 31; bomba de água para circulação com a  
241 função de radiador; quatro resistências de mica para aquecimento do canhão  
242 principal; sensor de temperatura acoplado no canhão principal; e painel elétrico para  
243 comando do equipamento. O equipamento foi produzido e idealizado pelo engenheiro  
244 mecânico Ricardo Silvério Ferreira.

#### 245 **3.3 Preparação dos compósitos de madeira-plástica**

246 Os WPCs foram obtidos a partir da mistura do polietileno de alta densidade com  
247 os agentes de reforço fibra de vidro e serragem de eucalipto. Estudos prévios  
248 realizados em laboratório determinaram a melhor proporção da matriz polimérica  
249 (HDPE) no material compósito. Desta forma, a quantidade de polímero foi mantida fixa  
250 em 60% (m/m). Os teores de serragem de eucalipto e fibra de vidro foram investigados  
251 em três concentrações. As proporções de serragem de eucalipto/fibra de vidro (St/FG)  
252 referentes aos 40% (m/m) da mistura final serão: 40/0; 30/10; 20/20; 10/30; 0/40. As

253 proporções de St/FG em relação a quantidade de material reforço serão: 100/0; 75/25;  
254 50/50; 25/75; 0/100. Essas estão nomeadas de 40St; 30St; 20St; 10St; 0St. As fibras  
255 de serragem de eucalipto foram secas a 40°C por aproximadamente 48 horas para a  
256 remoção do excesso de umidade. Em seguida foram trituradas e peneiradas para  
257 garantir que o tamanho das partículas seja constante no material. As fibras de vidro  
258 foram trituradas em moinho e peneiradas para obter tamanho de partícula constante,  
259 a matriz foi utilizada em sua forma original como disponibilizada pelo fabricante. Os  
260 diferentes materiais foram obtidos a partir da extrusão convencional a temperatura de  
261 200°C. Após a pesagem, respeitando as proporções estabelecidas, os materiais foram  
262 misturados mecanicamente e introduzidos na extrusora. O material compósito adquiriu  
263 geometria cilíndrica após o processo de extrusão. Os WPCs produzidos foram  
264 acondicionados em embalagem de poliestireno, a temperatura ambiente, para as  
265 análises posteriores.

### 266 **3.4 Densidade**

267 A densidade dos corpos de prova foi calculada assumindo que a água utilizada  
268 para imersão tem densidade de um grama/cm<sup>3</sup> (1000 kg/m<sup>3</sup>) a partir da equação 1.

$$269 \quad \text{Densidade} = \frac{M_0}{V_0} \quad (\text{Eq. 1})$$

270 Em que  $M_0$  é a massa da amostra após seca em estufa (kg) e  $V_0$  é o volume da  
271 amostra, (m<sup>3</sup>).

### 272 **3.5 Retenção de água (%)**

273 A absorção de água dos materiais foi calculada após imersão em 24 horas em  
274 água destilada. As amostras foram pesadas inicialmente ( $M_0$ ) e transferidas a potes  
275 de polietileno contendo água destilada. Após as 24 horas, elas foram coletadas dos  
276 potes, retirado o excesso de água com auxílio de um papel toalha, e realizada as  
277 medidas ( $M_f$ ). Com os valores das massas (inicial e final), foi possível calcular a % de  
278 retenção de água a partir da equação 2.

$$279 \quad \text{absorção de água (\%)} = \frac{M_f - M_0}{M_0} \quad (\text{Eq. 2})$$

280 Em que  $M_f$  corresponde a massa final (g) após 24 horas e  $M_0$  corresponde a  
281 massa inicial da amostra seca previamente em estufa.

### 282 **3.6 Propriedades mecânicas**

283 Os ensaios de propriedades mecânicas foram realizados em um instrumento  
284 de teste universal eletrônico CMT6104 (MTS Industrial Systems Co., Ltd., Xangai,  
285 China). Uma máquina de teste de impacto de feixe XJJ-5 (Jinjian Testing Instrument  
286 Co., Ltd., Chengde, China) será usada para realizar a análise de compressão (5  
287 réplicas) de acordo com o GB/T 1043.1-2008. A dimensão da amostra foi de 100 mm  
288 x 10 mm x 7 mm.

### 289 **3.7 Microscopia eletrônica de varredura**

290 A morfologia da superfície dos compósitos foi investigada através da  
291 microscopia eletrônica de varredura. As amostras foram revestidas por pulverização  
292 com liga de ouro-paládio (Polaron SC 7620 Sputter Coater, Quorum Technologies,  
293 Newhaven, Reino Unido) a uma espessura de 10 nm (10–15 mA, sob vácuo de 130  
294 mTorr). O MEV (JSM-6500F, microscópio eletrônico de varredura por emissão de  
295 campo, JEOL, Japão) foi operado a uma voltagem de aceleração de 5 kV.

### 296 **3.8 DSC**

297 A análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi realizada em um  
298 aparelho Shimadzu (modelo DSC60 Plus, Japão) com taxa de aquecimento de 10  
299 °C/min, de 20 a 350 °C, sob purga de 50 mL/min de argônio.

### 300 **3.9 FTIR**

301 Os espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) das  
302 amostras foram obtidos em um espectrofotômetro de infravermelho Agilent (Cary 30,  
303 EUA). Foi empregado 3mg de cada amostra com aproximadamente 100mg de KBr. A  
304 análise foi realizada na faixa espectral de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$   
305 e 64 varreduras.

306

### 307 **3.10 Análise estatística**

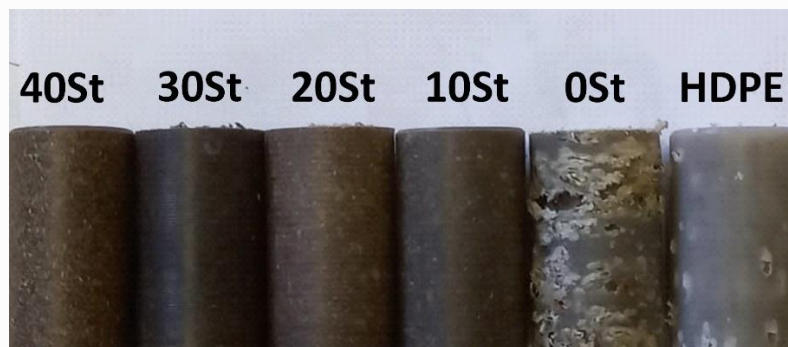
308 Os dados foram analisados usando o software *PAST*, com análise de variância  
309 e o teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

## 310 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 311 4.1 Obtenção dos materiais compósitos plástico-madeira

312 Os materiais compósito plástico-madeira foram obtidos a partir de diferentes  
313 misturas de serragem (St), fibra de vidro (FG) não contínua e polietileno de alta  
314 densidade (HDPE). A composição do WPC foi mantida fixa em 60% (m/m) composto  
315 pela matriz e 40% (m/m) do material reforço. Os materiais reforço (St e FG) foram  
316 testados em quatro concentrações em relação a massa de serragem: 0 (0St), 25  
317 (10St), 50 (20St), 75 (30St) e 100% (40St). Uma amostra composta somente pela  
318 matriz (HDPE) foi produzida para fins de comparação. A imagem digital (Figura 5)  
319 apresenta todas as formulações após extrusão e usinadas para a realização do ensaio  
320 de propriedade mecânica (compressão). As imagens dos corpos de prova  
321 apresentaram aparências distintas em função da concentração do material reforço. As  
322 amostras contendo serragem exibiram características homogênea em sua extensão.  
323 O mesmo não foi observado para as formulações 0St e HDPE.

324 **Figura 5.** Imagens digitais do HDPE e dos materiais compósitos plástico-madeira.  
325



326

327 As macromoléculas da matriz polimérica têm característica apolar (Meemusaw  
328 et al., 2017). Elas são compostas por unidades repetitivas de grupos etileno. Esses  
329 grupos interagem por meio de forças de Van der Waals, dipolos momentâneos criados  
330 entre os diferentes grupos apolares presentes nas moléculas. Essas forças são  
331 consideradas fracas. Entretanto, a formulação contendo apenas o HDPE foi estável,  
332 quando comparada aos demais. Apesar de serem mantidas por forças fracas, o fato  
333 delas apresentarem massas molares altas justificam ser estáveis em condições

334 ambientes. Além disso, a matriz empregada neste estudo apresenta baixa quantidade  
335 de ramificações. Isso permite melhor empacotamento entre as cadeias do poli(etileno)  
336 e, portanto, maior a estabilidade do material.

337 A presença de pequenas imperfeições nas paredes laterais deste material pode  
338 ser explicada pela forma de sua obtenção. O processo de extrusão consiste de uma  
339 rosca linear e infinita na qual trabalha sob controle de temperatura. Alguns materiais  
340 poliméricos, assim como HDPE, quando atingem sua temperatura de amolecimento,  
341 se tornam viscosos. A alta viscosidade impede que bolhas de ar presentes no material  
342 sejam expelidas, e geram espaços vazios no interior do corpo de prova. Esses  
343 espaços são expostos durante o processo de usinagem, ao qual o material é  
344 submetido para adquirir a forma desejada (corpo de prova para compressão).

345 A formulação 0St foi a que apresentou maior quantidade de imperfeições  
346 visíveis ao longo do material. Isso pode ser facilmente visualizado na Figura 5. Este  
347 material é composto somente pela fibra de vidro e a matriz polimérica. As imagens de  
348 microscopia que serão abordadas posteriormente, ilustram a baixa estabilidade do  
349 material. As fibras de vidro de dimensões heterogênea estão aderidas sobre a  
350 superfície do HDPE. Isso implica em uma fraca interação entre a matriz polimérica e  
351 o material fibroso. Mas essa amostra foi produzida com intuito de estudar apenas o  
352 comportamento das FG com o HDPE, visto que compósitos plástico-madeira são  
353 caracterizados pela presença do material celulósico. Portanto, essa formulação não  
354 pode ser considerada um WPC.

355 Por outro lado, a adição da serragem contribuiu para melhorar a aparência física do  
356 material. As imperfeições não são possíveis de serem observadas visualmente. Na  
357 superfície é possível notar as fibras da madeira envolvidas pela matriz polimérica,  
358 diferentemente do verificado para formulação 0St. A serragem, por se tratar de um  
359 resíduo da madeira, é composta por celulose, hemicelulose e ligninas. Dentre eles, a  
360 celulose é o componente abundante. Ela é considerada um polissacarídeo de cadeia  
361 linear, composto basicamente por átomos de carbono e oxigênio (conforme será  
362 discutido posteriormente, Secção EDS). As hidroxilas presentes na estrutura do  
363 polissacarídeo permitem interagir por ligações de hidrogênio com as fibras de vidro.  
364 Ainda, a disposição linear da celulose permite um melhor entrelaçamento entre as  
365 macromoléculas, produzindo um material mais compacto. Essas características são

366 possíveis de serem observadas na Figura 8, e com mais detalhes nas micrografias do  
367 MEV.

#### 368 **4.2 Propriedades físico-química dos materiais compósitos plástico-** 369 **madeira**

370 Os valores de densidade para todas as formulações e para o HDPE após o  
371 processo de extrusão são apresentados na **Tabela 1**. Os valores de densidade  
372 variaram de 780 a 987 kg/m<sup>3</sup>. Kumar e colaboradores encontraram um valor de  
373 densidade próximo aos encontrados neste estudo (950 kg/m<sup>3</sup>) (Kumar et al., 2022). A  
374 diferença entre estes valores pode ser justificada pois determinamos a densidade do  
375 material após o processo de extrusão, diferentemente do abordado anteriormente. A  
376 taxa de aquecimento ou resfriamento de um determinado material interfere na forma  
377 em que as macromoléculas irão se organizar na rede polimérica. Essa organização  
378 reflete diretamente em propriedades físicas do material, como temperatura vítrea,  
379 ponto de fusão, densidade, etc(CALLISTER JR. W.D.; RETHWISH, 2016). Ainda, a  
380 presença de bolhas de ar alojadas no material (perceptível na Figura 1) também  
381 contribuem para diminuir a densidade.

382 Os valores de densidade para os WPCs apresentaram uma tendência  
383 crescente com a adição de St. Os resultados variaram em média 177 kg/m<sup>3</sup> entre as  
384 amostras 10St e 40St. Esse coproduto da madeira apresenta em sua composição a  
385 celulose como componente majoritário. Sua adição pode ter melhorado o  
386 empacotamento entre as macromoléculas da matriz e do material reforço, por se tratar  
387 de um polissacarídeo de cadeia linear, além de interagir com as FG. De acordo com  
388 Callister et. al., a linearidade das cadeias poliméricas facilita o alinhamento entre elas,  
389 e, portanto, geram massas específicas maiores em um mesmo volume (CALLISTER  
390 JR. W.D.; RETHWISH, 2016).

391 Portanto, a combinação do HDPE com o resíduo lignocelulósico resultará em  
392 um material, possivelmente, mais compacto. Este fato foi constatado visualmente na  
393 **Figura 5**, onde superfícies mais lisas e menos rugosas foram obtidas para as  
394 formulações 10St, 20St, 30St e 40St.

395

396 **Tabela 1.** Propriedades físico-química do HDPE e dos materiais compósitos plástico-madeira.

Formulações	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Retenção de água
<b>HDPE</b>	872	0,12±0,00 <sup>b</sup>	0,03±0,00 <sup>c</sup>
<b>0St</b>	780	0,12±0,00 <sup>b</sup>	0,83±0,0 <sup>b</sup>
<b>10St</b>	810	0,86±0,08 <sup>a</sup>	2,40±0,09 <sup>a</sup>
<b>20St</b>	840	0,82±0,05 <sup>a</sup>	2,38±0,08 <sup>a</sup>
<b>30St</b>	910	0,89±0,05 <sup>a</sup>	2,37±0,06 <sup>a</sup>
<b>40St</b>	987	0,87±0,01 <sup>a</sup>	2,45±0,06 <sup>a</sup>

397 Todas as amostras apresentaram umidade percentual inferior a 1% (m/m).  
 398 Apesar dos baixos teores de umidade, as amostras contendo as fibras naturais foram  
 399 as que apresentaram maior capacidade em reter água. Esse comportamento era  
 400 esperado, visto que as moléculas presentes na madeira apresentam grupos hidroxilas  
 401 ligados em suas estruturas. Estes grupos permitem interagir com moléculas de água  
 402 por ligações de hidrogênio. De acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), todas as  
 403 amostras de WPCs resultaram em valores iguais para esta determinação.  
 404 Comportamento semelhante foi relatado anteriormente (Barbos et al., 2020).

405 A capacidade do material em reter água após 24 horas foi avaliada para todos  
 406 os materiais compósitos e HDPE. Como era esperado, a amostra contendo apenas a  
 407 matriz não apresentou valor significativo de ganho de massa. As macromoléculas de  
 408 polietileno são materiais hidrofóbicos e, portanto, baixa afinidade com moléculas de  
 409 água são esperadas. Fato este que justifica o resultado obtido. Este comportamento  
 410 também foi observado para o compósito 0St. Já para os WPCs foi possível observar  
 411 um de ganho de massa de água. No entanto, esse perfil foi estatisticamente igual para  
 412 todas as quantidades de serragem adicionada. O aumento de massa de água para os  
 413 WPCs após as 24 horas de análise ficou ao redor de 2,40%. A capacidade dos WPCs  
 414 em reter água está ligado aos grupos hidróxidos que compõe esses materiais. Esse  
 415 comportamento também foi observado por (Barbos et al., 2020). O que não aconteceu,  
 416 foi o aumento de água na estrutura em função da adição da serragem. Mesmo com a  
 417 adição de grupos hidrofílicos no material, o teor de HDPE ainda é superior no  
 418 compósito. Portanto, a tendência é ter baixa absorção de compostos polares. Ponto  
 419 positivo encontrado no material seria a baixa retenção de umidade na estrutura. Isso  
 420 aumenta sua vida útil, podendo ser aplicado mesmo em regiões de alta umidade,  
 421 como por exemplo, em regiões de praia.

422

### 4.3 FTIR

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

435

436

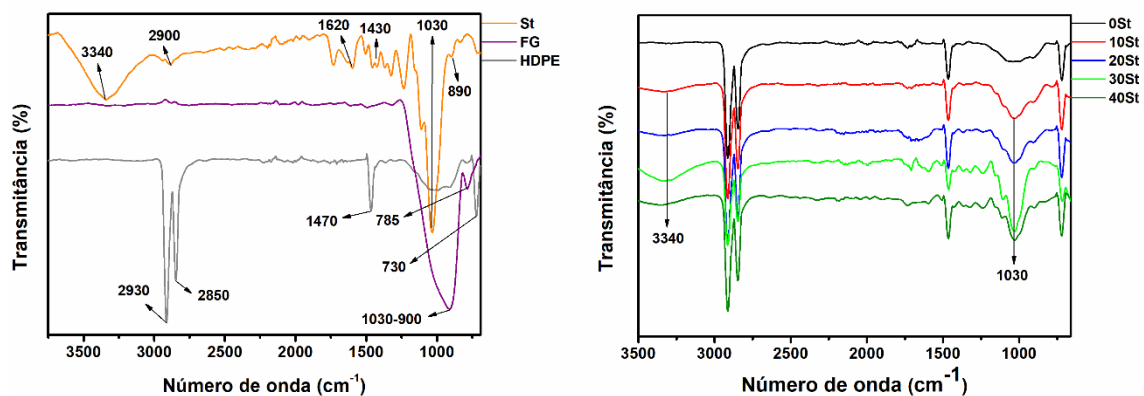
437

438

Os espectros de FTIR para os precursores (St, FG e HDPE) e para as diferentes formulações (0St, 10St, 20St, 30St e 40St) estão dispostos na **Figura 6**. Foram identificados sinais característicos dos precursores em sua forma isolada. Em relação ao polietileno, picos de absorção registrados entre 2800 e 3000  $\text{cm}^{-1}$  são atribuídos às vibrações de estiramento C-H. O sinal identificado em 1470  $\text{cm}^{-1}$  corresponde a vibração de flexão C-H, enquanto que em 730  $\text{cm}^{-1}$  é reportado como sendo à vibração de flexão C-H fora do plano (Parthasarathi et al., 2010). A serragem, por sua vez, exibiu a primeira absorção ao redor de 3340  $\text{cm}^{-1}$ , referente aos grupos -OH, os quais são característicos em polissacarídeos, assim como a celulose. A banda na região de 2900  $\text{cm}^{-1}$  é atribuída as vibrações de estiramento de C-H, relatada também para o HDPE (R. Liu et al., 2014). Outro sinal característico deste material lignocelulósico é identificado em 1620  $\text{cm}^{-1}$ , o qual indica a absorção de grupos aromáticos presentes na lignina. Já os sinais em 1430 e 890  $\text{cm}^{-1}$  indicam partes cristalinas e amorfas, respectivamente, da celulose baseado na conformação do grupo do carbono seis (C6) (W. Zhao et al., 2022). Para as fibras de vidro, a banda entre 700 e 1300  $\text{cm}^{-1}$  corresponde as ligações do grupo Si-O (Caban, 2022).

439

**Figura 6.** Espectros de FTIR para os precursores e dos materiais compósitos



440

441

442

443

444

445

Os espectros obtidos para as diferentes misturas de HDPE, serragem e fibra de vidro evidenciam a formação do material compósito. Todas as absorções registradas na matriz e nos materiais reforço (St e FG) estão presentes nos espectros das misturas. Especificamente, o sinal em 3340  $\text{cm}^{-1}$  corresponde aos grupos -OH

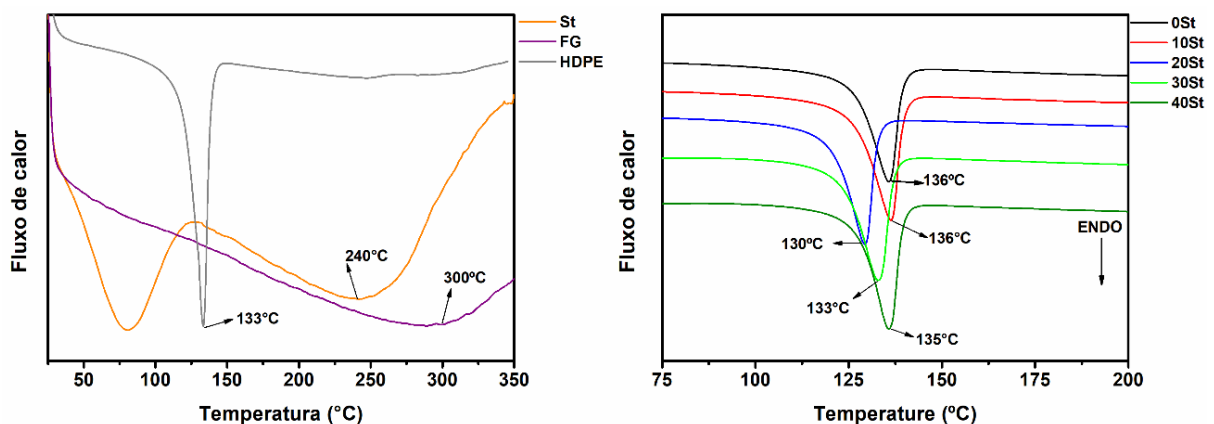


446 que compõe as fibras naturais (celulose), mas não constituem o polietileno e as fibras  
 447 sintéticas. Esse sinal por sua vez, foi identificado apenas nos espectros dos WPCs  
 448 (10, 20, 30, 40St). Outro ponto importante, são os picos agudos em 2930 e 2850  $\text{cm}^{-1}$   
 449 atribuídos ao polietileno. Esses sinais também foram encontrados tanto nos WPCs  
 450 quanto na amostra 0St (40% FG). Por fim, a banda em 1030  $\text{cm}^{-1}$  apresentada no  
 451 espectro dos WPCs é diferente da exibida na amostra 0St. Portanto, os sinais  
 452 exclusivos dos precursores foram identificados nas misturas, comprovando a  
 453 formação do material compósito.

#### 454 4.4 DSC

455 As curvas de DSC para os precursores e os materiais compósitos são  
 456 apresentadas na **Figura 7**. A serragem apresentou dois picos endotérmicos em  
 457 aproximadamente 80°C e 240°C. O primeiro pico corresponde a perda de moléculas  
 458 de água ligadas no material, como discutido anteriormente. O segundo evento está  
 459 relacionado a ruptura da ligação glicosídica presente nos polissacarídeos (Gautam &  
 460 Santhiya, 2019; Hanauer et al., 2021). O pico em 133 °C observado para o polietileno  
 461 corresponde ao a fusão do material. Sajwan reportou uma temperatura de fusão entre  
 462 126-131°C para 28 amostras de tubos de HDPE fabricados e fornecidos por diferentes  
 463 fabricantes da Índia (Sajwan et al., 2008). A fibra de vidro exibiu um sinal endotérmico  
 464 indefinido próximo a 300°C. Esse pico pode estar relacionado a transição vítrea do  
 465 material que pode ocorrer nesta faixa de temperatura.

466 **Figura 7.** Curvas de DSC dos precursores e diferentes misturas para o compósito plástico-madeira.



467

468 De forma contrária, os materiais compósitos apresentaram perfis de curvas  
 469 muito semelhantes, com pouca distinção entre as formulações. Todas as amostras

470 apresentaram um pico endotérmico entre 130 a 136°C. O perfil das curvas dos  
471 compósitos se aproximou do obtido para o HDPE puro. A quantidade do HDPE no  
472 material compósito foi mantida constante (60%) e superior aos demais constituintes  
473 (40%). Desta forma, o polietileno governa as interações existentes no material.  
474 Entretanto, foi possível observar um deslocamento na temperatura de fusão com  
475 adição/remoção das fibras naturais/sintéticas no material. Este fato justifica que as  
476 interações no interior do material foram modificadas com a adição do material reforço.

477 A amostra 0St e 10St foram as provocaram um maior aumento na estabilidade  
478 térmica do compósito. As duas formulações são as que apresentam a maior  
479 quantidade de fibra de vidro, sendo 100 e 75% (m/m) em relação ao total de reforço  
480 adicionado inicialmente (40%, m/m). A fibra sintética foi a que apresentou maior  
481 estabilidade térmica entre todos os precursores. Desta forma, essa maior estabilidade  
482 térmica da FG pode ter sido transferida as formulações 0St e 10St. Esta hipótese  
483 poderia ser aplicada até a formulação 20St. Neste caso, a quantidade de FG decaiu de  
484 75 para 50% na mistura final, resultando na diminuição de 3°C da temperatura de  
485 fusão do material.

486 A partir deste ponto, o nível de concentração das fibras naturais pode  
487 compensar o efeito da redução das fibras de vidro no material resultante. As  
488 formulações 30St e 40St, contendo 75 e 100% de serragem na mistura resultante,  
489 respectivamente, que por sua vez produziram  $T_{\text{fusão}}$  de 133 e 135°C. Aqui, os autores  
490 sugerem que o efeito linear das macromoléculas de celulose que facilitam o  
491 empacotamento entre as cadeias poliméricas, sejam responsáveis pela estabilidade  
492 térmica adquirida nas misturas mais concentradas em serragem.

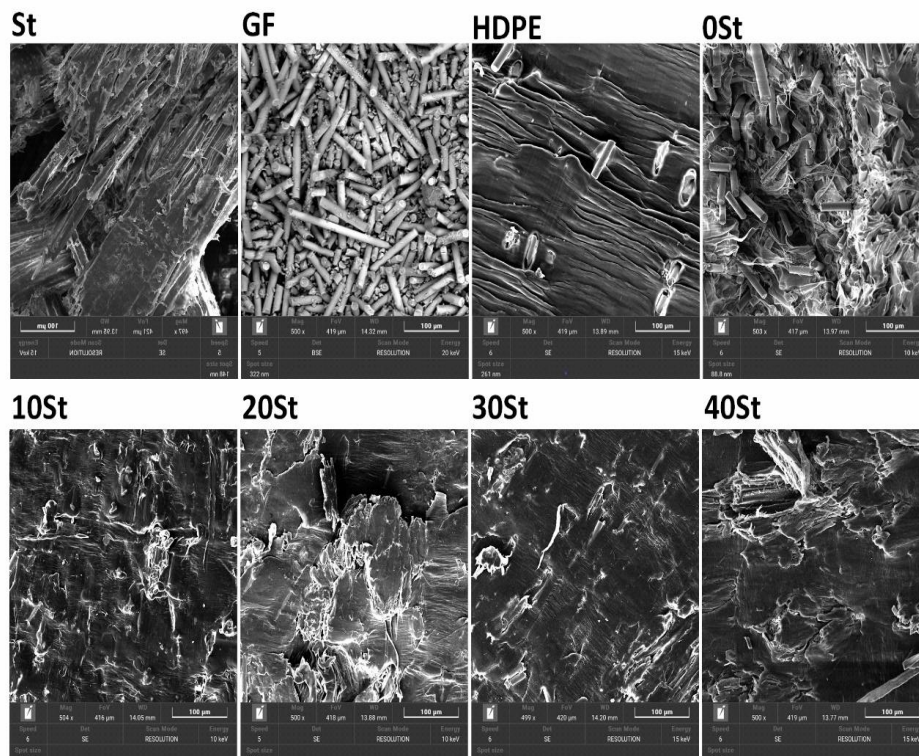
#### 493 **4.5 MEV**

494 As micrografias dos materiais isolados e presente nas misturas são  
495 apresentados com ampliações de 500× (**Figura 8**). As fibras naturais são facilmente  
496 visualizadas nas imagens de MEV. O material fibroso apresenta superfície irregular  
497 em toda sua extensão. Já as fibras de vidro, apresentam superfície mais regulares,  
498 com geometria na forma de bastões com tamanhos diferentes. De forma contrária, a  
499 superfície da matriz é mais regular, contendo pouca rugosidade, sugerindo um  
500 material mais compacto. Os pequenos bastões identificados em sua superfície, podem

501 ser impurezas das próprias fibras sintéticas, visto sua semelhança na micrografia  
 502 apresentada anteriormente.

503 A micrografia realizada para a amostra sem a adição de serragem (0St), sugere  
 504 baixa interação interfacial entre as fibras sintéticas e o polímero matriz. Pequenos  
 505 bastões são facilmente observados sobre a superfície do material polimérico. Imagens  
 506 semelhantes foram obtidas em trabalho anterior (Huang et al., 2008). Esses resultados  
 507 corroboram com o abordado na **seção 4.1**, onde foi relatado que materiais menos  
 508 resistentes foram gerados a partir desta formulação. A fraca interação existente entre  
 509 as fibras sintéticas e o HDPE reflete em baixas propriedades mecânicas, que é  
 510 abordado na seção 4.7. De forma contrária, as imagens apresentadas para os WPCs  
 511 comprovam que as fibras naturais melhoram a interação interfacial entre todos os  
 512 componentes dos materiais compósitos. Elas atuam como um compatibilizador natural  
 513 entre a matriz do compósito e do material sintético usado como reforço. A interação  
 514 entre os componentes do WPC contribui para gerar um material mais compacto e  
 515 resistente. Isso pode ser confirmado analisando as imagens advindas das misturas  
 516 HDPE/St/FG. As superfícies desses materiais foram mais homogêneas e ausência de  
 517 materiais particulados adsorvidos sobre a superfície.

518 **Figura 8.** Micrografias dos precursores e diferentes misturas para o compósito plástico-madeira.



519

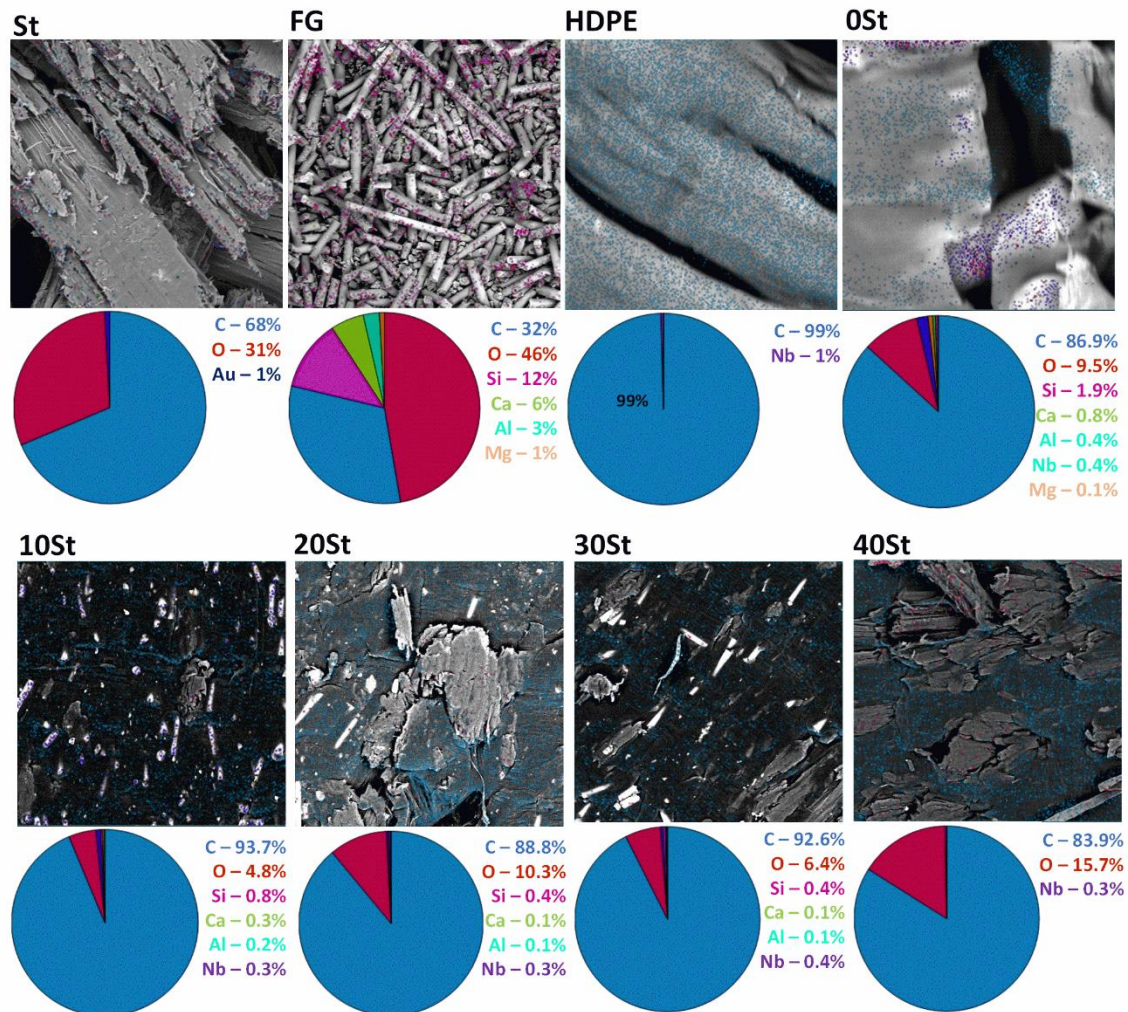
## 520 4.6 EDS

521 A composição atômica e a distribuição dos átomos sob a superfície dos  
522 diferentes materiais foram avaliadas por EDS (**Figura 9**). Essa medida permite avaliar  
523 a dispersividade dos constituintes das diferentes amostras. O perfil atômico exibido  
524 para o material de reforço natural (St) foi conforme o esperado. Material é composto  
525 por aproximadamente 68% de átomos de carbono e 31% de átomos de oxigênio. O  
526 Au é fruto do processo de metalização das amostras, empregados em casos em que  
527 a superfície do material de baixa condutividade elétrica. Como as madeiras de forma  
528 geral são compostas de celulose, hemiceluloses e ligninas, é natural que fosse  
529 identificado altas quantidades de C e O. As fibras de vidro exibiram alta concentração  
530 de carbono e oxigênio. Os átomos de Si, Ca, Al e Mg, normalmente são introduzidos  
531 em algumas formulações na forma de óxidos, com intuito de melhorar propriedades  
532 desejáveis no compósito. Os átomos de carbono podem estar relacionados as resinas  
533 empregadas na produção deste material. O HDPE foi identificado quase que na  
534 totalidade átomos de C.

535 Os mesmos átomos foram identificados nos precursores isolados (St, FG e  
536 HDPE) e nos compósitos. Com exceção da amostra 40St, onde o átomo de silício não  
537 foi identificado. Este fato justifica que a transferência dos diferentes materiais ocorreu  
538 em todas as formulações propostas. O que difere são as quantidades em cada  
539 material compósito. Isso é perceptível analisando os níveis de silício, carbono e  
540 oxigênio entre as diferentes formulações.

541 No entanto, o mapeamento dos átomos para a formulação 0St indica  
542 características heterogêneas do material. Os átomos de silício característico das fibras  
543 de vidro estão aglomerados em alguns pontos da superfície da amostra. Isso pode  
544 indicar que as fibras sintéticas não estão distribuídas homogeneamente ao longo  
545 material. Seções anteriores relataram baixa homogeneidade desta formulação,  
546 corroborando com os resultados do EDS. Entretanto, a distribuição dos átomos nos  
547 materiais compósito plástico-madeira ocorreu de forma dispersa ao longo da  
548 superfície dos WPCs. As imagens das formulações 10, 20, 30 e 40St exibem essa  
549 distribuição, com ausência de regiões ricas em silício. Nestas amostras esses átomos  
550 estão de forma aleatória em todo o material.

551 **Figura 9.** Mapeamento e composição atômica da superfície dos precursores e misturas para o  
 552 compósito plástico-madeira.



553

554

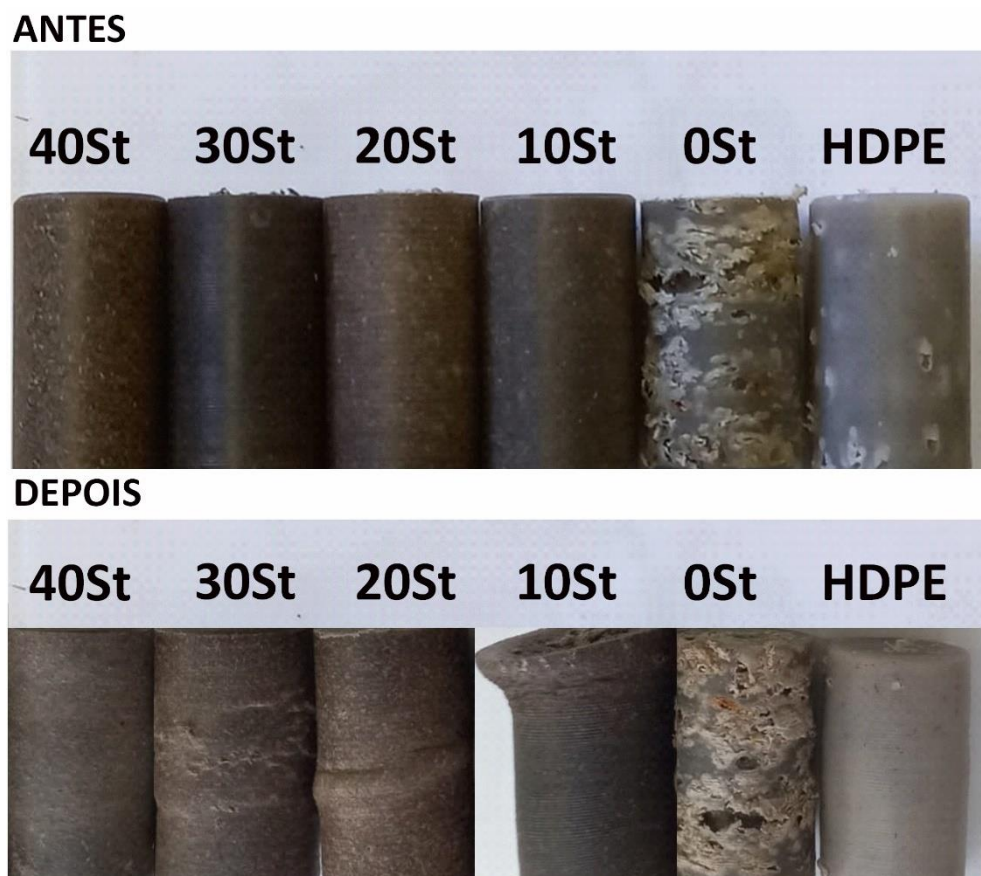
#### 555 4.7 Caracterização mecânica

556 Ensaio mecânicos de compressão foram realizados em todas as amostras.  
 557 Os corpos de prova antes e após o ensaio são apresentados na **Figura 10**. Os valores  
 558 máximos, em kN, para cada compósito foi de 11,034(**40St**), 7,785(**30St**), 4,788(**20St**),  
 559 6,561(**10St**), 0,978(**0St**), 7,383(**HDPE**). O compósito 0St foi a formulação que  
 560 demonstrou menor resistência a compressão. De maneira contrária, as formulações  
 561 40St e HDPE (controle) foram as que impuseram maior dificuldade à compressão do  
 562 material. Os resultados de compressão corroboram com os obtidos pelas demais  
 563 análises de caracterização.

564 Como mencionado anteriormente, além da característica linear da celulose, que  
 565 permite melhor empacotamento entre cadeias poliméricas, as interações entre os

566 polissacarídeos e as fibras sintéticas auxiliaram na interação interfacial entre a FG e  
567 o HDPE. Por consequência, materiais mais resistentes foram produzidos com a  
568 utilização da serragem. Diante disso, foi possível produzir um material mais resistente  
569 que o HDPE puro sem a utilização de agente estabilizante. Esse ponto foi  
570 extremamente positivo, pois foi possível substituir 40% de um polímero de origem não  
571 renovável por um subproduto da madeira pouco utilizado e biodegradável. Além de  
572 gerar um produto menos danoso ao meio ambiente, produtos mais baratos podem ser  
573 produzidos a partir desta formulação.

574 **Figura 10.** Imagens digitais dos corpos de prova dos materiais antes e após a execução dos ensaios.



575

576

577

578

579

580

## 581        **5. CONCLUSÃO**

582            Os resultados indicaram que WPCs podem ser produzidos a partir da mistura  
583 serragem de eucalipto, polietileno de alta densidade e fibra de vidro. Com base nestes  
584 resultados, a formulação que apresentou maior resistência à compressão foi o  
585 material 40St. As análises de caracterização mostraram que foi possível substituir  
586 40% de HDPE por serragem, coproduto da madeira, melhorando a resistência à  
587 compressão do material. Esses materiais apresentaram estabilidade térmica e baixa  
588 retenção de umidade, o que possibilita sua aplicação em regiões com alta umidade e  
589 temperatura (praias, rios, etc). A resistência intermediária do material não o habilita  
590 para atuar como um ponto de estrutura, mas como um material de acabamento com  
591 aparência amadeirada.

592

593

594

595

596

597

598

599

600

601

602

603

604

605

606        **6. REFERÊNCIAS**

- 607        Babikir, H. A., Elaziz, M. A., Elsheikh, A. H., Showaib, E. A., Elhadary, M., Wu, D., &  
608        Liu, Y. (2019). Noise prediction of axial piston pump based on different valve materials  
609        using a modified artificial neural network model. *Alexandria Engineering Journal*, 58(3),  
610        1077–1087. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.09.010>
- 611        Barbos, J. D. V., Azevedo, J. B., Cardoso, P. da S. M., da Costa Garcia Filho, F., & del  
612        Río, T. G. (2020). Development and characterization of WPCs produced with high  
613        amount of wood residue. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 9684–  
614        9690. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.06.073>
- 615        Bhaskar, K., Jayabalakrishnan, D., Vinoth Kumar, M., Sendilvelan, S., & Prabhakar,  
616        M. (2020). Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. *Materials*  
617        *Today: Proceedings*, 45, 5886–5891. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.570>
- 618        Biomassa-BR. (n.d.). *Os resíduos de madeira gerados anualmente no Brasil são*  
619        *estimados em 30 milhões de toneladas*. Retrieved March 15, 2022, from  
620        [https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/os-residuos-de-madeira-](https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/os-residuos-de-madeira-gerados-anualmente-no-brasil-sao-estimados-em-30-milhoes-de-toneladas/20160211-103419-X618)  
621        [gerados-anualmente-no-brasil-sao-estimados-em-30-milhoes-de-](https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/os-residuos-de-madeira-gerados-anualmente-no-brasil-sao-estimados-em-30-milhoes-de-toneladas/20160211-103419-X618)  
622        [toneladas/20160211-103419-X618](https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/os-residuos-de-madeira-gerados-anualmente-no-brasil-sao-estimados-em-30-milhoes-de-toneladas/20160211-103419-X618)
- 623        Caban, R. (2022). FTIR-ATR spectroscopic, thermal and microstructural studies on  
624        polypropylene-glass fiber composites. *Journal of Molecular Structure*, 1264, 133181.  
625        <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2022.133181>
- 626        CALLISTER JR. W.D.; RETHWISH, D. G. (2016). *Ciência e Engenharia de Materiais:*  
627        *uma Introdução*. LTC.
- 628        Caraschi, J., & Leao, A. (2002). Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos  
629        reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos. *Acta Scientiarum : Technology*,  
630        24. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v24i0.2462>
- 631        De Lima, E. G., & Da Silva, D. A. (2005). Resíduos Gerados Em Indústrias De Móveis  
632        De Madeira Situadas No Pólo Moveleiro De Arapongas-Pr. *Floresta*, 35(1), 105–116.  
633        <https://doi.org/10.5380/ufv.v35i1.2434>
- 634        Elsheikh, A. H., Deng, W., & Showaib, E. A. (2020). Improving laser cutting quality of  
635        polymethylmethacrylate sheet: experimental investigation and optimization. *Journal of*



- 636 *Materials Research and Technology*, 9(2), 1325–1339.  
637 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.059>
- 638 Elsheikh, A. H., Panchal, H., Shanmugan, S., Muthuramalingam, T., El-Kassas,  
639 Ahmed. M., & Ramesh, B. (2022). Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-  
640 processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly  
641 assessment. *Cleaner Engineering and Technology*, 8(March), 100450.  
642 <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100450>
- 643 Elsheikh, A. H., Shehabeldeen, T. A., Zhou, J., Showaib, E., & Abd Elaziz, M. (2021).  
644 Prediction of laser cutting parameters for polymethylmethacrylate sheets using random  
645 vector functional link network integrated with equilibrium optimizer. *Journal of*  
646 *Intelligent Manufacturing*, 32(5), 1377–1388. [https://doi.org/10.1007/s10845-020-](https://doi.org/10.1007/s10845-020-01617-7)  
647 [01617-7](https://doi.org/10.1007/s10845-020-01617-7)
- 648 *Embrapa*. (n.d.). Retrieved March 9, 2022, from  
649 <https://www.embrapa.br/florestas/transferecia-de-tecnologia/eucalipto>
- 650 Gardner, D. J., Han, Y., & Wang, L. (2015). Wood–Plastic composite technology.  
651 *Current Forestry Reports*, 1(3), 139–150. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0016-6>
- 652 Gautam, M., & Santhiya, D. (2019). Pectin/PEG food grade hydrogel blend for the  
653 targeted oral co-delivery of nutrients. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and*  
654 *Engineering Aspects*, 577, 637–644.  
655 <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2019.06.027>
- 656 Hanauer, D. C., de Souza, A. G., Cargnin, M. A., Gasparin, B. C., Rosa, D. dos S., &  
657 Paulino, A. T. (2021). Pectin-based biohydrogels reinforced with eucalyptus sawdust:  
658 Synthesis, characterization,  $\beta$ -D-Galactosidase immobilization and activity. *Journal of*  
659 *Industrial and Engineering Chemistry*, 97, 368–382.  
660 <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2021.02.022>
- 661 Haque, M. M. U., Goda, K., Ogoe, S., & Sunaga, Y. (2019). Fatigue analysis and  
662 fatigue reliability of polypropylene/wood flour composites. *Advanced Industrial and*  
663 *Engineering Polymer Research*, 2(3), 136–142.  
664 <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.07.001>

- 665 Horta, J. F., Simões, F. J., & Mateus, A. (2017). Study of Wood-Plastic Composites  
666 with Reused High Density Polyethylene and Wood Sawdust. *Procedia Manufacturing*,  
667 12(December 2016), 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.026>
- 668 Huang, X., Li, B., Shi, B., & Li, L. (2008). Investigation on interfacial interaction of flame  
669 retarded and glass fiber reinforced PA66 composites by IGC/DSC/SEM. *Polymer*,  
670 49(4), 1049–1055. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2007.12.037>
- 671 Jiang, L., Wolcott, M. P., Zhang, J., & Englund, K. (2007). Flexural properties of surface  
672 reinforced wood/plastic deck board. *Polymer Engineering & Science*, 47(3), 281–288.  
673 <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pen.20705>
- 674 Kumar, S., Ramesh, M. R., Doddamani, M., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2022).  
675 Mechanical characterization of 3D printed MWCNTs/HDPE nanocomposites. *Polymer*  
676 *Testing*, 114, 107703. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107703>
- 677 Lei, B., Zhang, Y., He, Y., Xie, Y., Xu, B., Lin, Z., Huang, L., Tan, S., Wang, M., & Cai,  
678 X. (2015). Preparation and characterization of wood-plastic composite reinforced by  
679 graphitic carbon nitride. *Materials and Design*, 66(PA), 103–109.  
680 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.041>
- 681 Liu, C., Luan, P., Li, Q., Cheng, Z., Sun, X., Cao, D., & Zhu, H. (2020). Biodegradable,  
682 Hygienic, and Compostable Tableware from Hybrid Sugarcane and Bamboo Fibers as  
683 Plastic Alternative. *Matter*, 3(6), 2066–2079.  
684 <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.10.004>
- 685 Liu, R., Zhang, Y., Bai, L., Huang, M., Chen, J., & Zhang, Y. (2014). Synthesis of  
686 cellulose-2,3-bis(3,5-dimethylphenylcarbamate) in an ionic liquid and its chiral  
687 separation efficiency as stationary phase. *International Journal of Molecular Sciences*,  
688 15(4), 6161–6168. <https://doi.org/10.3390/IJMS15046161>
- 689 M., P., B., P., S., C., & M., P. (2018). Lightweight composite materials for automotive-  
690 a review. *Carbon N Y*, 1(2500), 151.
- 691 Meemusaw, M., Maia, J., Jamieson, A., & Magaraphan, R. (2017). Structural changes  
692 in HDPE produced by in-line plasma-pretreated reactive extrusion. *Materials*  
693 *Chemistry and Physics*, 199, 34–42.  
694 <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2017.06.028>

- 695 Mittal, V., Saini, R., & Sinha, S. (2016). Natural fiber-mediated epoxy composites - A  
696 review. *Composites Part B: Engineering*, 99, 425–435.  
697 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.051>
- 698 Nazário, G. F., Silva, V. C. da, Rocha, A. H. S., Rodrigues, F. R., & Lima, F. P. dos A.  
699 (2016). Madeira plástica: Uma revisão conceitual. *Revista Engenharia Em Ação*  
700 *UniToledo*, 01, 54–71.
- 701 Parthasarathi, V., Sundaresan, B., Dhanalakshmi, V., & Anbarasan, R. (2010).  
702 Functionalization of HDPE with aminoester and hydroxyester by thermolysis method—  
703 An FTIR-RI approach. *Thermochimica Acta*, 510(1–2), 61–67.  
704 <https://doi.org/10.1016/J.TCA.2010.06.023>
- 705 Pratheep, V. G., Priyanka, E. B., Thangavel, S., Jason Gousanal, J., Bijoy Antony, P.  
706 T., & Kavin, E. D. (2020). Investigation and analysis of corn cob, coir pith with wood  
707 plastic composites. *Materials Today: Proceedings*, xxxx.  
708 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.288>
- 709 Rajesh, D., Anand, P., Balaji, V., Surrya Prakash, D., Ramesh Kumar, R., & Karthick,  
710 M. (2021). Mechanical characterization of glass fiber and glass fiber reinforced with  
711 aluminium particulated polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 2–5.  
712 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.202>
- 713 Sajjan, S., & Philip Selvaraj, D. (2021). A review on polymer matrix composite materials  
714 and their applications. *Materials Today: Proceedings*.  
715 <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.08.034>
- 716 Sajwan, M., Aggarwal, S., & Singh, R. B. (2008). Forensic characterization of HDPE  
717 pipes by DSC. *Forensic Science International*, 175(2–3), 130–133.  
718 <https://doi.org/10.1016/J.FORSCIINT.2007.05.020>
- 719 Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Senthamaraiannan, P., Senthil, S., & Pradeep,  
720 S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A  
721 comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 566–581.  
722 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>
- 723 Sirin, M., Zeybek, M. S., Sirin, K., & Abali, Y. (2022). Effect of gamma irradiation on  
724 the thermal and mechanical behaviour of polypropylene and polyethylene blends.

- 725 *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110034.  
726 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110034>
- 727 Tamrakar, S., Shaler, S., Lopez-Anido, R., Gardner, D., West, C., Han, Y., & Edgar, R.  
728 (2012). Mechanical Property Characterization of Fiber-Reinforced Polymer Wood-  
729 Polypropylene Composite Panels Manufactured Using a Double Belt Pressing  
730 Technology. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 1193–1200.  
731 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000489](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000489)
- 732 Wang, L., Gardner, D. J., Wang, J., Yang, Y., Tekinalp, H. L., Li, K., Zhao, X., Neivandt,  
733 D. J., Han, Y., Ozcan, S., & Anderson, J. (2020). Towards industrial-scale production  
734 of cellulose nanocomposites using melt processing: A critical review on structure-  
735 processing-property relationships. *Composites Part B: Engineering*, 201(August),  
736 108297. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108297>
- 737 Xu, K., Liu, C., Kang, K., Zheng, Z., & Wang, S. (2020). Isolation of nanocrystalline  
738 cellulose from rice straw and preparation of its biocomposites with chitosan:  
739 Physicochemical characterization and evaluation of interfacial compatibility.  
740 *Composites Science and Technology*, 154(2018), 8–17.  
741 <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.10.022>
- 742 Yang, X., Tang, X., Ma, L., & Sun, Y. (2019). Sound Insulation Performance of  
743 Structural Wood Wall Integrated with Wood Plastic Composite. *Journal of Bioresources  
744 and Bioproducts*, 4(2), 111–118. <https://doi.org/10.21967/jbb.v4i2.215>
- 745 Zakaria, M. R., Md Akil, H., Abdul Kudus, M. H., Ullah, F., Javed, F., & Nosbi, N. (2019).  
746 Hybrid carbon fiber-carbon nanotubes reinforced polymer composites: A review.  
747 *Composites Part B: Engineering*, 176(April), 107313.  
748 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107313>
- 749 Zhao, W., Yan, W., Zhang, Z., Gao, H., Zeng, Q., Du, G., & Fan, M. (2022).  
750 Development and performance evaluation of wood-pulp/glass fibre hybrid composites  
751 as core materials for vacuum insulation panels. *Journal of Cleaner Production*, 357,  
752 131957. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131957>
- 753 Zhao, X., Copenhaver, K., Wang, L., Korey, M., Gardner, D. J., Li, K., Lamm, M. E.,  
754 Kishore, V., Bhagia, S., Tajvidi, M., Tekinalp, H., Oyedeki, O., Wasti, S., Webb, E.,  
755 Ragauskas, A. J., Zhu, H., Peter, W. H., & Ozcan, S. (2022). Recycling of natural fiber

- 756 composites: Challenges and opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*,  
757 177(October 2021), 105962. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105962>
- 758 Zhao, X., Li, K., Wang, Y., Tekinalp, H., Larsen, G., Rasmussen, D., Ginder, R. S.,  
759 Wang, L., Gardner, D. J., Tajvidi, M., Webb, E., & Ozcan, S. (2020). High-Strength  
760 Polylactic Acid (PLA) Biocomposites Reinforced by Epoxy-Modified Pine Fibers. *ACS*  
761 *Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(35), 13236–13247.  
762 <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c03463>
- 763 Zhao, X., Li, K., Wang, Y., Tekinalp, H., Richard, A., Webb, E., & Ozcan, S. (2020).  
764 Bio-treatment of poplar via amino acid for interface control in biocomposites.  
765 *Composites Part B: Engineering*, 199(May), 108276.  
766 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108276>
- 767 Zolfaghari, A., Behraves, A. H., Adli, A., & TabkhPaz, M. (2013). Continuous glass  
768 fiber reinforced wood plastic composite in extrusion process: Feasibility and  
769 processing. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32.  
770 <https://doi.org/10.1177/0731684412461461>