

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

**Resíduo agroindustrial de andiroba na produção de
painéis MDP: estudo de melhoria das propriedades
físico-mecânicas**

Isaias da Costa Barbosa

Manaus/AM

2026

Isaias da Costa Barbosa

Resíduo agroindustrial de andiroba na produção de painéis MDP: estudo de melhoria das propriedades físico-mecânicas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, da Faculdade de Tecnologia, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção de qualificação do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof. Dra. Virginia Mansanares Giacon

Manaus/AM

2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B238r Barbosa, Isaias da Costa
Resíduo agroindustrial de andiroba na produção de painéis MDP:
estudo de melhoria das propriedades físico-mecânicas / Isaias da
Costa Barbosa. - 2026.
114 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Virginia Mansanares Giacon.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas,
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais, Manaus, 2026.

1. Painéis de Média Densidade. 2. Resíduo de andiroba. 3.
Resina poliuretana de óleo de mamona. 4. Compósitos
lignocelulósicos. 5. Propriedades físico-mecânicas. I. Giacon,
Virginia Mansanares. II. Universidade Federal do Amazonas.
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais. III. Título

Isaias da Costa Barbosa

Resíduo agroindustrial de andiroba na produção de painéis MDP: estudo de melhoria das propriedades físico-mecânicas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, da Faculdade de Tecnologia, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção de qualificação do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais.

Aprovado em 15 de maio de 2026:

Profa. Dra. Virginia Mansanares Giacon (Orientadora e Presidente)
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

Prof. Dr. Viktor Oswaldo Cárdenas Concha
Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP).

Profa. Dra. Cristina Gomes da Silva
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

Dedico este trabalho aos meus pais, que, com amor, coragem e sabedoria, foram os meus primeiros mestres.

Com todo o meu carinho e eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, sabedoria e amparo físico e espiritual concedidos ao longo desta jornada.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e por acreditarem em mim em todos os momentos.

À Professora Dra. Virgínia Mansanares Giacon, pela orientação atenciosa, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante a realização deste trabalho.

Aos amigos, pelo incentivo, pelas palavras de apoio e pela presença constante; e, em especial, aos colegas do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LaMAC), pelo companheirismo, pelas discussões enriquecedoras e pelas contribuições ao longo desta trajetória acadêmica.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LaMAC), ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN), ao Laboratório de Ressonância Magnética Nuclear (NMRLAB), ao Laboratório de Polímeros Nanoestruturados (NANOPOL), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio institucional e financeiro essencial para a concretização desta etapa; e à Associação dos Trabalhadores Agroextrativistas de Eirunepé, pela colaboração e apoio prestados durante a realização deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a construção deste trabalho, expresso minha mais sincera gratidão.

*"A sabedoria é a principal coisa; portanto,
adquire a sabedoria; e com tudo o que
possuis, adquire o entendimento."*

Provérbios 4:7

RESUMO

O resíduo da extração do óleo de andiroba (*Carapa guianensis*) constitui uma biomassa lignocelulósica abundante na Amazônia com potencial para aplicação na produção de materiais compósitos. Entretanto, a presença de óleo residual e de outros compostos extrativos pode comprometer a adesão interfacial entre as partículas lignocelulósicas e a matriz polimérica, reduzindo o desempenho físico-mecânico dos materiais produzidos. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de tratamentos físico-químicos aplicados ao resíduo de andiroba, visando à remoção do óleo residual, bem como investigar a influência da proporção poliol/pré-polímero nas propriedades físico-mecânicas de compósitos utilizados na fabricação de painéis de média densidade (MDP) produzidos com resina poliuretana bicomponente derivada de óleo de mamona. Inicialmente, os resíduos foram submetidos a diferentes rotas de tratamento, sendo sua eficiência avaliada por ressonância magnética nuclear de baixo campo (RMN). A rota contendo solução aquosa com 20% de surfactante apresentou o melhor desempenho, promovendo remoção aproximada de 57% do óleo residual presente na biomassa. Após a definição da condição mais eficiente, foram produzidos painéis utilizando resíduo tratado e in natura, mantendo-se constante o teor de resina em 30% da massa total e variando-se as proporções entre poliol e pré-polímero. A caracterização físico-mecânica revelou que o tratamento do resíduo promoveu reduções significativas na absorção de água (22,8%) e no inchamento em espessura após 24 horas (32,4%), além de aumentos médios globais de aproximadamente 250% no módulo de ruptura (MOR) e 196% no módulo de elasticidade (MOE), em comparação aos painéis produzidos com resíduo in natura. Os resultados indicaram que a remoção de óleo residual favoreceu a interação entre a matriz polimérica e as partículas lignocelulósicas, contribuindo para uma melhor transferência de tensões na interface. Embora a variação da relação poliol/pré-polímero tenha influenciado o desempenho dos painéis, seu efeito mostrou-se secundário em comparação ao impacto do tratamento aplicado ao resíduo. Conclui-se que o tratamento físico-químico da biomassa de andiroba constitui uma estratégia eficaz para a valorização desse resíduo agroindustrial, ampliando seu potencial de aplicação na produção sustentável de painéis MDP e agregando valor à cadeia produtiva da andiroba.

Palavras-chave: Painéis de Média Densidade; Resíduo de andiroba; Resina poliuretana de óleo de mamona; compósitos lignocelulósicos; Propriedades físico-mecânicas.

ABSTRACT

The residue generated from the extraction of andiroba oil (*Carapa guianensis*) is an abundant lignocellulosic biomass in the Amazon region with potential application in the production of composite materials. However, the presence of residual oil and other extractive compounds may impair the interfacial adhesion between lignocellulosic particles and the polymer matrix, thereby reducing the physical and mechanical performance of the resulting materials. In this context, the present study aimed to evaluate the effect of physicochemical treatments applied to andiroba residue for the removal of residual oil, as well as to investigate the influence of the polyol/prepolymer ratio on the physical and mechanical properties of composites used in the manufacture of medium-density particleboards (MDP) produced with a castor oil-based bicomponent polyurethane resin. Initially, the residues were subjected to different treatment routes, and their effectiveness was assessed by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR). The treatment consisting of an aqueous solution containing 20% surfactant showed the best performance, promoting the removal of approximately 57% of the residual oil present in the biomass. After defining the most efficient treatment condition, panels were produced using both treated and untreated residues, while maintaining a constant resin content of 30% of the total mass and varying the polyol/prepolymer ratios. Physical and mechanical characterization revealed that the treatment of the residue promoted significant reductions in water absorption (22.8%) and thickness swelling after 24 hours (32.4%), as well as overall average increases of approximately 250% in modulus of rupture (MOR) and 196% in modulus of elasticity (MOE) compared with panels produced using untreated residue. The results indicated that residual oil removal improved the interaction between the polymer matrix and the lignocellulosic particles, contributing to more efficient stress transfer at the interface. Although variations in the polyol/prepolymer ratio influenced panel performance, their effect was secondary when compared with the impact of residue treatment. It can be concluded that the physicochemical treatment of andiroba biomass is an effective strategy for valorizing this agro-industrial residue, expanding its potential application in the sustainable production of MDP panels and adding value to the andiroba production chain.

Keywords: Medium-density particleboards (MDP); Andiroba residue; Castor oil-based polyurethane resin; Lignocellulosic composites; Physical and mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação macroscópica entre painéis MDF e MDP.....	20
Figura 2 – Produção global e regional de PB, MDF e OSB entre os anos 2020 - 2022.	23
Figura 3 - Mercado de Painéis de Fibra de Média Densidade (MDF) - Produto Brasil, 2021-2033	24
Figura 4: fluxograma do processo produtivo de painéis de madeira reconstituída.....	27
Figura 5 Esquema da estrutura lignocelulósica baseada da imagem MEV de fibra de eucalipto	32
Figura 6 – Partes da planta <i>Carapa guianensis</i> (andiroba): (a) a semente em corte; (b) resíduo do processo de extração; (c) o resíduo cominuído.	41
Figura 7– Fluxograma das etapas metodológicas do estudo.	52
Figura 8: Equipamento de RMN de baixo campo.....	56
Figura 9 – Mensuração da densidade do resíduo.	57
Figura 10 – a) Peneiras granulométricas da série Tyler; b) Peneiramento manual dos resíduos.	57
Figura 11– Sistema de refluxo utilizado para determinação do teor de extrativos.	58
Figura 12 – (a) Mistura da resina ao resíduo; (b) dispersão da mistura no molde; (c) nivelamento do material; (d) fechamento do molde; (e) prensagem; (f) extração da placa; (g) painel finalizado.....	62
Figura 13 – (a) Molde em montagem, (b) Projeto e construção do ferramental, (c) Estrutura do molde.....	64
Figura 14 – Paquímetro carbografite e micrometro mitutoyo.....	66
Figura 15 – Balança Analítica Shumadzu modelo AUX220.	66
Figura 16 – Determinação do Teor de umidade (a) Estufa para secagem das amostras; (b) Dessecador para estabilização das amostras.	67
Figura 17 – Corpo de prova com a marcação para aferição no ponto central e dimensões.....	68
Figura 18 – Ensaio de absorção e inchamento em imersão por 24 horas.	68
Figura 19 – Corpos de prova para ensaio mecânico.....	69

Figura 20 – Máquina Universal de Ensaio, para execução do ensaio de flexão	70
Figura 21 – (a) Espectros RMN de baixo campo das amostras de óleo de andiroba. (b) Curva de calibração para a estimativa do percentual de massa de óleo de andiroba em resíduos tratados e não tratados.	72
Figura 22 – Estimativa da massa de óleo de andiroba (mg) presente em 15 g dos resíduos AD-10, AD-20, AQ, ST e AL, determinada por RMN de baixo campo.	73
Figura 23; Distribuição granulométrica do resíduo biomassa sem tratamento (ST) após peneiramento utilizando peneiras série Tyler.	78
Figura 24; Distribuição granulométrica do resíduo tratado (AD-20) que foi passou pela série Tyler de peneiras padrão.	79
Figura 25 – Teor de absorção de água (%) dos corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba sem tratamento (ST) e tratado (T) nas cinco formulações avaliadas.....	83
Figura 26 – Teor de inchamento (%) dos corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba sem tratamento (ST) e tratado (T) para as cinco formulações avaliadas.....	84
Figura 27; Módulo de ruptura (MOR) dos painéis produzidos com resíduo de andiroba tratado (T) e não tratado (ST), obtido por ensaio de flexão em três pontos.	87
Figura 28; Módulo de elasticidade dos corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba tratado (T) e não tratado (ST), com valores de 250–600 MPa para ST e 850–1.200 MPa para T).	88
Figura 29-MEV do resíduo de andiroba In Natura. a) 30x; b)150x	91
Figura 30-MEV do resíduo de andiroba tratado. a) 30x; b)150x.....	91
Figura 31-Amostra T24. a) 30x; b)150x.....	92
Figura 32-Amostra ST34 a) 30x; b)150x	93
Figura 33- Amostra T54 a) 30x; b)150x.....	94
Figura 34 Amostra ST48 a) 30x; b)150x	94
Figura 35:Corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba tratado e não tratado após armazenamento.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições experimentais empregadas nos tratamentos aplicados aos resíduos de extração do óleo de andiroba, incluindo massa utilizada, composição das soluções e tempo de processamento.	55
Tabela 2 – Proporções de poliol (POL) e pré-polímero (PP) utilizadas na fabricação dos painéis, considerando tanto as formulações com resíduo tratado quanto sem tratamento.	61
Tabela 3:Densidade aparente para os resíduos de andiroba.....	76
Tabela 4:Composição Majoritária do Resíduo de andiroba biomassa sem tratamento (ST) e tratado (AD-20).....	80
Tabela 5: MOR e MOE calculado para os diferentes tipos de painéis produzidos.	86

SUMÁRIO

1. Introdução	15
2. Objetivos	18
2.1 Objetivo Geral.....	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. Revisão da literatura	19
3.1 Painéis de Média Densidade (MDP): Mercado, Insumos e Impactos Ambientais ..	19
3.1.1 Conceito e Caracterização das Painéis de Média Densidade (MDP)	19
3.1.2 Panorama do Mercado Global e Nacional de MDP	22
3.1.3 Principais insumos utilizados na fabricação de painéis MDP	26
3.1.4 Impactos ambientais de monoculturas de eucalipto e pinus na biodiversidade...	27
3.2 Resíduos Agroindustriais como Alternativa Sustentável	28
3.2.1 Composição lignocelulósica e estrutura morfológica da biomassa	31
3.3 Compósitos poliméricos com reforço lignocelulósico.....	34
3.3.1 Compósitos Poliméricos: Conceitos Gerais	34
3.3.2 Interação matriz polimérica–partícula lignocelulósica	35
3.3.3 Relação entre características de resíduos lignocelulósicos e propriedades de compósitos.....	38
3.4 Andiroba como Matéria-Prima Alternativa	39
3.4.1 Contextualização da cadeia produtiva da andiroba	39
3.4.2 Fatores positivos do resíduo de extração do óleo de andiroba	40
3.4.3 Torta de andiroba: Resíduo agroindustrial desvalorizado	42
3.5 Pré-tratamentos Aplicados a Resíduos com fração lipídica.	43
3.5.1 Tratamento com água quente.....	44
3.5.2 Tratamento por lavagem com surfactante	45
3.5.3 Tratamento por extração com álcool.....	46
3.6 Resina poliuretana à base do óleo de mamona	47
3.6.1 Uso de poliuretana à base do óleo da mamona em compósitos	48
3.6.2 Influências das proporções NCO/OH em poliuretanos derivados de óleo vegetal	49
4 Materiais e Métodos	52
4.1 Materiais	52
4.2 Métodos.....	52
4.2.1 Tratamentos do resíduo de andiroba.	53

4.2.2 Caracterizações do resíduo	56
4.2.3 Fabricação dos Painéis	61
4.2.4 Caracterizações Físicas dos Painéis	65
4.2.5 Caracterização Mecânica dos Painéis	69
4.2.6 Caracterização Morfológica dos Painéis	71
5 Resultados Obtidos	72
5.1 Caracterizações dos Resíduos.....	72
5.1.1 Determinação do teor de óleo residual no resíduo de andiroba	72
5.1.2 Teor de umidade dos resíduos da extração do óleo de andiroba	75
5.1.3 Densidade aparente dos resíduos de andiroba.....	76
5.1.4 Distribuição granulométrica dos resíduos	77
5.1.5 Caracterização química dos resíduos.....	80
5.2 Caracterização dos Painéis.....	82
5.2.1 Teor de absorção de água e inchamento dos painéis.....	82
5.2.2 Caracterização Mecânica dos Painéis	85
5.2.3 Análise Morfológica	90
5.3 Outros Resultados Obtidos	95
6 Conclusão	96
Trabalhos futuros	98
Referências	99
Apêndice.....	114

1. Introdução

A crescente preocupação com os impactos ambientais associados à exploração intensiva de recursos naturais tem impulsionado o desenvolvimento de materiais sustentáveis, com destaque para a utilização de resíduos agroindustriais na produção de compósitos (Ortega *et al.*, 2022). Nesse contexto, a incorporação de resíduos lignocelulósicos em matrizes poliméricas surge como uma alternativa promissora para reduzir o consumo de matérias-primas convencionais, ao mesmo tempo em que promove o reaproveitamento de subprodutos industriais e a mitigação de passivos ambientais, em consonância com os princípios da economia circular (Ortega *et al.*, 2022).

Entre os resíduos agroindustriais disponíveis na região amazônica, destaca-se a torta de andiroba, um material resultante da extração do óleo das sementes de andiroba (*Carapa guianensis*). A andiroba é classificada como um Produto Florestal Não Madeireiro (PFNM), categoria que engloba bens florestais obtidos sem a necessidade de supressão da vegetação, desempenhando papel relevante na manutenção econômica, social e ambiental das populações amazônicas ((Ortega *et al.*, 2022)). O óleo extraído de suas sementes possui ampla aplicação nos setores cosmético, farmacêutico e de produtos naturais, constituindo importante fonte de renda para comunidades tradicionais, ribeirinhas e agroextrativistas da região amazônica (Mendonça; Ferreira, 2019; Dias *et al.*, 2023).

Além de sua importância socioeconômica, a cadeia produtiva da andiroba apresenta potencial estratégico para o fortalecimento da bioeconomia amazônica. A exploração sustentável desse recurso contribui para a valorização da floresta em pé, promovendo geração de renda sem a necessidade de desmatamento e favorecendo modelos de desenvolvimento baseados no uso sustentável dos recursos naturais (Rufino *et al.*, 2024). Embora a participação econômica dos PFNMs seja relativamente modesta em escala nacional, sua relevância para a subsistência e qualidade de vida das populações locais é amplamente reconhecida (Andreola *et al.*, 2022).

Durante o processo de extração do óleo, é gerada uma quantidade significativa de biomassa residual, conhecida como torta de andiroba, que representa aproximadamente 66 a 70% da massa processada do fruto (De Sousa *et al.*, 2022). Apesar de sua ampla disponibilidade, esse resíduo ainda apresenta reduzido aproveitamento em aplicações de maior valor agregado, sendo frequentemente destinado a usos de baixa complexidade tecnológica ou permanecendo sem aproveitamento adequado (Medeiros *et al.*, 2021). Nesse sentido, a valorização dessa biomassa residual representa uma oportunidade para ampliar a sustentabilidade da cadeia produtiva da andiroba e agregar valor a um subproduto abundante da agroindústria amazônica.

Estudos têm demonstrado que resíduos lignocelulósicos provenientes de diferentes cadeias produtivas podem ser empregados como reforço em matrizes poliméricas, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e de menor impacto ambiental (Silva *et al.*, 2013; (De Souza *et al.*, 2020a; Padrino *et al.*, 2018. Silva *et al.* (2023), por exemplo, investigaram o reaproveitamento do resíduo da extração do óleo de andiroba para produção de briquetes, evidenciando o potencial de valorização tecnológica dessa biomassa. Além disso, a presença de constituintes lignocelulósicos em sua composição torna a torta de andiroba um material promissor para aplicação em compósitos poliméricos (Padrino *et al.*, 2018).

Entretanto, a presença de óleo residual e de compostos extrativos na superfície das partículas de andiroba constitui um fator limitante para sua utilização em compósitos. Esses compostos podem atuar como barreira física ao contato entre a biomassa lignocelulósica e a matriz polimérica, reduzindo a molhabilidade superficial, dificultando a adesão interfacial e comprometendo a transferência de tensões entre as fases do material (Kabir *et al.*, 2012); Papadopoulos. (2021), Santos *et al.* (2022), Missio *et al.* (2017). Adicionalmente, a presença de lipídios pode dificultar a penetração dos ligantes na estrutura lignocelulósica, comprometendo a homogeneidade e a integridade mecânica dos painéis produzidos (Rodríguez-Fabià *et al.*, 2022).

Dessa forma, a remoção ou redução do teor de óleo residual torna-se uma etapa importante para melhorar a interação entre reforço e matriz, favorecendo a adesão interfacial e possibilitando a obtenção de compósitos com melhores

propriedades físicas e mecânicas (Tran *et al.*, 2019; Lam *et al.*, 2020). Estudos indicam que a redução de compostos lipídicos pode promover maior ancoragem da matriz polimérica na superfície das partículas lignocelulósicas, resultando em materiais com maior resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade (Lam *et al.*, 2020; Emmanuel; Kuqo; Mai, 2021).

No que se refere à matriz polimérica, as resinas poliuretânicas derivadas do óleo de mamona têm despertado crescente interesse devido à sua origem parcialmente renovável, boas propriedades mecânicas e elevada compatibilidade com materiais lignocelulósicos (Chakraborty; Chatterjee, 2020). Essas características tornam esse sistema adesivo uma alternativa promissora às resinas sintéticas tradicionalmente empregadas na fabricação de painéis particulados.

Entre os fatores que influenciam diretamente o desempenho dos compósitos produzidos com esse tipo de matriz, destaca-se a proporção entre poli-ol e pré-polímero, responsável por controlar a densidade de reticulação da rede poliuretânica, a rigidez da matriz e a eficiência da transferência de tensões entre matriz e reforço (Gama *et al.*, 2018). Alterações nessas razões podem modificar significativamente propriedades como absorção de água, estabilidade dimensional e resistência mecânica dos compósitos (Gama *et al.*, 2018).

Embora existam diversos estudos envolvendo resíduos lignocelulósicos e compósitos poliméricos, ainda são limitadas as investigações que associam o resíduo agroindustrial de andiroba a matrizes poliuretânicas derivadas do óleo de mamona, especialmente considerando simultaneamente os efeitos da remoção do óleo residual e da variação da razão poli-ol/pré-polímero sobre o desempenho físico e mecânico dos painéis produzidos. Essa lacuna evidencia a necessidade de estudos que aprofundem o entendimento das interações entre biomassa, matriz polimérica e parâmetros de processamento.

Parte-se da hipótese de que a redução do teor de óleo residual presente na biomassa de andiroba favorece a adesão entre partícula e matriz polimérica, contribuindo para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos (Tran *et al.*, 2019; Lam *et al.*, 2020). Adicionalmente, espera-se que a variação da razão poli-ol/pré-polímero influencie a estrutura da

matriz poliuretânica e, conseqüentemente, o desempenho final dos painéis (Gama *et al.*, 2018).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de tratamentos físico-químicos aplicados ao resíduo de andiroba (*Carapa guianensis*), visando à remoção do óleo residual, bem como investigar a influência da variação da proporção poliol/pré-polímero nas propriedades físicas, mecânicas e morfológicas de compósitos utilizados na produção de painéis aglomerados de média densidade (MDP) empregando resina poliuretânica derivada do óleo de mamona.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito de tratamento físico químico no resíduo de andiroba (*Carapa guianensis*), visando à remoção do óleo residual, sobre o desempenho físico-mecânico de compósitos poliméricos utilizados na produção de painéis aglomerados (MDP).

2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar diferentes tratamentos físico-químicos ao resíduo de andiroba (*Carapa guianensis*), visando à remoção de compostos lipídicos e extrativos superficiais presentes na biomassa;
- Quantificar o teor de óleo residual das biomassas tratadas e sem tratamento por meio da técnica de Ressonância Magnética Nuclear de Baixo Campo (TD-NMR);
- Comparar a eficiência dos tratamentos empregados quanto à remoção do óleo residual e selecionar a rota mais adequada para utilização na produção dos compósitos;
- Produzir painéis particulados utilizando resíduo de andiroba sem tratamento e resíduo submetido à rota de tratamento selecionada, empregando diferentes proporções entre poliol e pré-polímero na formulação da resina poliuretânica derivada de óleo de mamona;

- Determinar as propriedades físicas dos painéis produzidos, incluindo teor de umidade, densidade aparente, absorção de água e inchamento em espessura, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 14810:2018;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos painéis por meio dos ensaios de flexão estática, determinando o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE);
- Analisar a morfologia da interface entre a biomassa e a matriz polimérica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), correlacionando os aspectos microestruturais observados com o desempenho físico e mecânico dos compósitos produzidos.

3. Revisão da literatura

3.1 Painéis de Média Densidade (MDP): Mercado, Insumos e Impactos Ambientais

3.1.1 Conceito e Caracterização das Painéis de Média Densidade (MDP)

O painel de partículas de média densidade (MDP – *Medium Density Particleboard*) é um compósito de madeira reconstituída, obtido pela consolidação de partículas lignocelulósicas, predominantemente de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, por meio da aplicação de resinas sintéticas e prensagem a quente sob condições controladas de temperatura, pressão e tempo. Sua arquitetura interna multicamada, composta por núcleo de partículas mais grossas e camadas superficiais de partículas mais finas, confere ao material um gradiente de densidade ao longo da espessura, fator determinante para seu desempenho mecânico e estrutural (Cabral *et al.*, 2016; Natalli *et al.*, 2022).

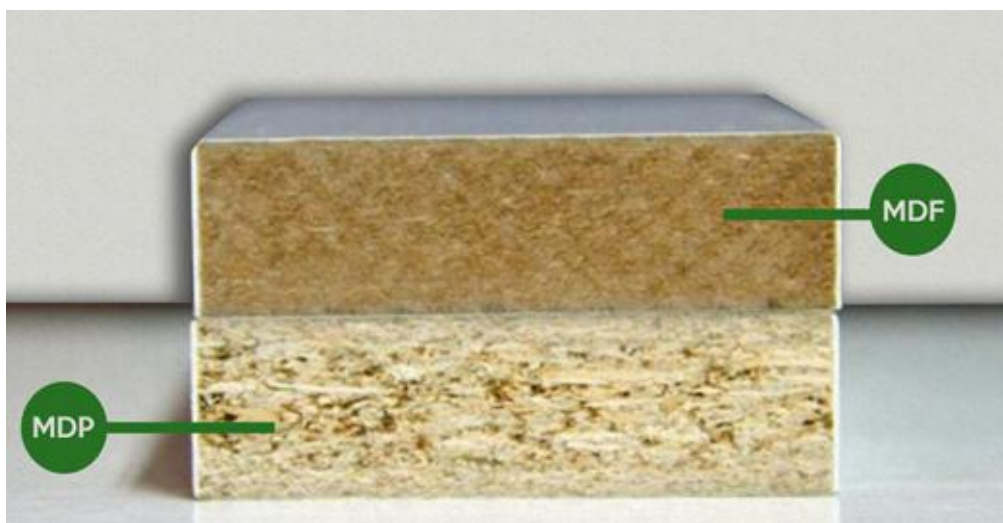
O MDF (*Medium Density Fiberboard*), por sua vez, é produzido a partir de fibras lignocelulósicas obtidas por desfibramento mecânico da madeira. Essas fibras são misturadas a resinas sintéticas e submetidas à prensagem a quente, formando um painel de estrutura homogênea e densidade média, normalmente entre 600 e 800 kg/m³, caracterizado por superfície lisa e elevada uniformidade interna (Womeldorf, 2023).

Embora ambos pertençam à categoria de painéis de média densidade e apresentem ampla aplicação na indústria moveleira, o MDP destaca-se quando o critério principal é desempenho estrutural e resistência mecânica. Sua

configuração em camadas promove maior eficiência na distribuição de tensões, melhor resistência à flexão e desempenho superior na fixação de parafusos, especialmente nas regiões superficiais de maior densidade. Além disso, o MDP tende a apresentar comportamento dimensional mais estável em aplicações que exigem suporte de carga distribuída, como prateleiras, laterais estruturais e componentes de mobiliário modular (Azambuja *et al.*, 2018).

Sob a perspectiva econômica e ambiental, o MDP também apresenta vantagens relevantes. De acordo com Rossi *et al.* (2025), o uso de partículas de madeira possibilita maior aproveitamento de resíduos lignocelulósicos e maior eficiência no uso da matéria-prima, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e economia circular. A Figura 1 apresenta uma comparação macroscópica entre os painéis MDP e MDF, evidenciando diferenças estruturais associadas à morfologia da matéria-prima empregada em sua fabricação.

Figura 1: Comparação macroscópica entre painéis MDF e MDP.



Fonte: ADVANCE (2025).

O MDP apresenta estrutura heterogênea, com partículas de maior dimensão visíveis a olho nu, especialmente no núcleo do painel. Essa característica está relacionada ao arranjo multicamada típico do MDP, no qual partículas mais grossas compõem a região central, enquanto partículas mais finas formam as camadas superficiais, resultando em gradiente de densidade ao longo da espessura (Rossi *et al.*, 2025; Weber; Iwakiri, 2015).

Em contraste, o MDF apresenta microestrutura mais homogênea e compacta, decorrente do uso de fibras lignocelulósicas individualizadas. Essa

configuração confere superfície mais lisa e uniforme, favorecendo processos de usinagem e acabamento superficial (Piekarski *et al.*, 2014). Do ponto de vista estrutural, as diferenças morfológicas observadas refletem diretamente no comportamento mecânico dos painéis, especialmente na resistência à flexão, na fixação de elementos de união e na estabilidade dimensional.

O MDP apresenta configuração tricamada, composta por uma camada interna formada por partículas de maior dimensão e duas camadas externas constituídas por partículas mais finas (Laskowska, 2024; Luo *et al.*, 2020). Essa organização confere ao painel um gradiente de densidade ao longo da espessura, com maior compactação superficial e núcleo relativamente menos denso (Benthien; Engehausen; Lüdtke, 2024). Essa organização confere ao painel um gradiente de densidade ao longo da espessura, com maior compactação superficial e núcleo relativamente menos denso, resultando de diferenças na pressão e temperatura aplicadas às camadas superficiais durante a prensagem a quente (Sci; Korai, 2021).

Tal arranjo otimiza a resistência à flexão estática, o módulo de elasticidade e a capacidade de retenção de parafusos, além de contribuir para melhor desempenho frente às solicitações mecânicas distribuídas. A densidade nominal do MDP situa-se, em geral, entre 551 e 750 kg/m³, enquadrando-se na faixa de painéis de média densidade amplamente empregados em aplicações estruturais leves e semiestruturais (ABNT, 2013).

No contexto industrial, o MDP é amplamente utilizado na fabricação de móveis residenciais e corporativos, especialmente em componentes estruturais como laterais de armários, prateleiras, tampos e gavetas. Na construção civil, sua aplicação ocorre em elementos internos não estruturais, como divisórias, portas e painéis de revestimento, onde são requeridas estabilidade dimensional, resistência moderada e viabilidade econômica (Weber; Iwakiri, 2015).

Dentre seus principais atributos, destacam-se a eficiência no aproveitamento de resíduos lignocelulósicos, a possibilidade de utilização de madeira proveniente de florestas plantadas e a contribuição para cadeias produtivas alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da economia circular (Pędzik *et al.*, 2022; Rossi *et al.*, 2025; Navarrete *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2013b).

Além disso, a produção de MDP com bagaço de cana-de-açúcar e outros resíduos agrícolas tem demonstrado viabilidade técnica e ambiental, reduzindo

a dependência de madeira virgem e promovendo a valorização de biomassas subutilizadas (Duram et al., 2023).

3.1.2 Panorama do Mercado Global e Nacional de MDP

O MDP é um tipo de material que revolucionou o setor moveleiro e da construção civil. Segundo Piekarski et al. (2014), esses painéis reconstituídos representam uma estratégia industrial para otimizar o aproveitamento da matéria-prima florestal, ampliar a escala produtiva e atender à crescente demanda global por mobiliário e soluções construtivas padronizadas.

No cenário internacional, o mercado de painéis de madeira ocupa posição estratégica na cadeia produtiva florestal. Países da Europa, América do Norte e Ásia investem fortemente em tecnologia de processamento, automação industrial e certificação ambiental (Garcia et al., 2024).

O uso de resíduos lignocelulósicos agrícolas e florestais como palhas, bagaço de cana, fibras alternativas e subprodutos de serrarias tem sido amplamente estudado, reforçando tendências alinhadas à economia circular (Lee et al., 2022; Rossi et al., 2025;). Paralelamente, cresce a busca por adesivos de menor impacto ambiental, substituindo gradativamente resinas convencionais à base de formaldeído por alternativas de origem vegetal ou com menor emissão de compostos voláteis (Cardoso; De Carvalho Balaban, 2013; Navarrete et al., 2010).

A Figura 2 ilustra a produção mundial de painéis de madeira no período de 2020 a 2022, discriminando os principais tipos de painéis: OSB (*Oriented Strand Board*), MDF (*Medium Density Fiberboard*) e PB (*Particleboard/MDP*). Observa-se, inicialmente, que a produção global apresentou crescimento entre 2020 e 2021, atingindo o pico em 2021, seguido de leve retração em 2022. Ainda assim, os volumes permanecem elevados, evidenciando a consolidação do setor no cenário internacional. A Ásia destaca-se como o principal polo produtivo, respondendo pela maior parcela da produção mundial, especialmente impulsionada pela China.

Figura 2 – Produção global e regional de PB, MDF e OSB entre os anos 2020 -2022.



Fonte: Garcia et al. (2024).

Nota-se predominância dos painéis MDF e PB na composição regional, enquanto o OSB representa fração menor do total. Esse desempenho reforça o papel estratégico do continente asiático tanto no abastecimento interno quanto nas exportações globais de painéis reconstituídos.

Na Europa, os volumes de produção mantiveram-se relativamente estáveis ao longo do triênio 2020-2022, com leve oscilação positiva em 2021 e discreta redução em 2022 (Garcia et al., 2024). A produção europeia também apresenta maior concentração em MDF e PB, com contribuição mais moderada de OSB. Países como Alemanha figuram entre os principais produtores do continente, demonstrando a relevância da indústria florestal europeia no mercado internacional (Piekarski et al., 2017).

A América do Norte, considerando especificamente Estados Unidos e Canadá, apresenta produção significativa, porém inferior à da Ásia e da Europa. Observa-se leve crescimento progressivo entre 2020 e 2022, com destaque para o OSB, que possui participação mais expressiva nessa região em comparação às demais, refletindo o perfil construtivo do mercado norte-americano (Garcia et al., 2024).

Na América do Sul, os volumes são menores em termos absolutos, mas mantêm estabilidade ao longo do período analisado. O Brasil aparece como principal representante regional, com produção concentrada em MDF e PB, alinhada à expansão das florestas plantadas de pinus e eucalipto (Maximo;

Hassegawa; Verkerk, 2022). Já o grupo “Outros” apresenta participação residual no cenário global.

De forma geral, a Figura 2 evidencia que MDF e PB continuam sendo os painéis de maior representatividade mundial, enquanto o OSB apresenta relevância regional mais acentuada na América do Norte. O comportamento observado entre 2020 e 2022 sugere resiliência do setor, mesmo diante de oscilações econômicas globais, reforçando a importância estratégica da indústria de painéis de madeira na cadeia produtiva florestal e no mercado da construção civil e moveleiro.

No Brasil, a indústria de painéis de madeira consolidou-se como um dos segmentos mais dinâmicos do setor florestal (Figura 3). Impulsionado pelo avanço das florestas plantadas de pinus e eucalipto, que totalizam aproximadamente 10,5 milhões de hectares, o país tornou-se referência na produção de painéis reconstituídos para abastecer o mercado interno e exportações (Maximo; Hassegawa; Verkerk, 2022; Teixeira *et al.*, 2025).

Figura 3 - Mercado de Painéis de Fibra de Média Densidade (MDF) - Produto Brasil, 2021-2033



Fonte: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/medium-density-fiberboard-market/brazil>

O crescimento acompanha a expansão do setor moveleiro e da construção civil, especialmente na fabricação de móveis planejados, revestimentos e componentes estruturais leves. A organização da cadeia produtiva florestal, aliada a investimentos tecnológicos, permitiu ganhos de

eficiência e aumento expressivo na produção e consumo ao longo das últimas décadas (Teixeira *et al.*, 2025).

Entretanto, os desafios permanecem. Apesar da predominância de florestas plantadas como fonte de matéria-prima, ainda existem preocupações relacionadas à rastreabilidade da madeira, à extração ilegal particularmente na região amazônica onde apenas 45% da exploração madeireira por satélite coincide com autorizações legais (Franca *et al.*, 2025) e aos impactos ambientais associados ao ciclo produtivo. A produção industrial de MDP envolve elevado consumo energético (4320 MJ/m³) e o uso de resinas sintéticas à base de ureia-formaldeído, o que demanda rigoroso controle ambiental e adequação às normas técnicas, como a ABNT NBR 14810, que regulamenta painéis de partículas no Brasil (Piekarski *et al.*, 2017).

Nesse contexto, iniciativas sustentáveis ganham relevância. O reaproveitamento de resíduos florestais e agroindustriais, como serragem, cavacos, bagaço de cana e biomassas amazônicas, desponta como alternativa promissora para reduzir impactos ambientais e agregar valor à subprodutos antes descartados. Além disso, pesquisas nacionais têm explorado o uso de resinas poliuretanas derivadas de óleo de mamona, buscando reduzir a dependência de adesivos petroquímicos e minimizar emissões de formaldeído (Moraes *et al.*, 2021).

Apesar dos avanços, ainda há lacunas importantes, sobretudo no que se refere ao aproveitamento de resíduos florestais amazônicos, como subprodutos da extração de óleos vegetais de andiroba e buriti em painéis MDP associados a resinas de base renovável. Essa perspectiva abre oportunidades estratégicas para a bioeconomia regional, alinhando inovação tecnológica, sustentabilidade ambiental e desenvolvimento socioeconômico (Maquiné *et al.*, 2025).

Assim, o panorama do MDP no Brasil e no mundo revela um setor tecnologicamente consolidado e economicamente relevante, mas que enfrenta o desafio de conciliar produtividade e responsabilidade ambiental. O futuro da indústria de painéis de madeira dependerá do fortalecimento da gestão sustentável das florestas, da adoção de tecnologias limpas, da inovação em adesivos ecológicos e da ampliação de modelos produtivos baseados na economia circular (Rossi *et al.*, 2025).

3.1.3 Principais insumos utilizados na fabricação de painéis MDP

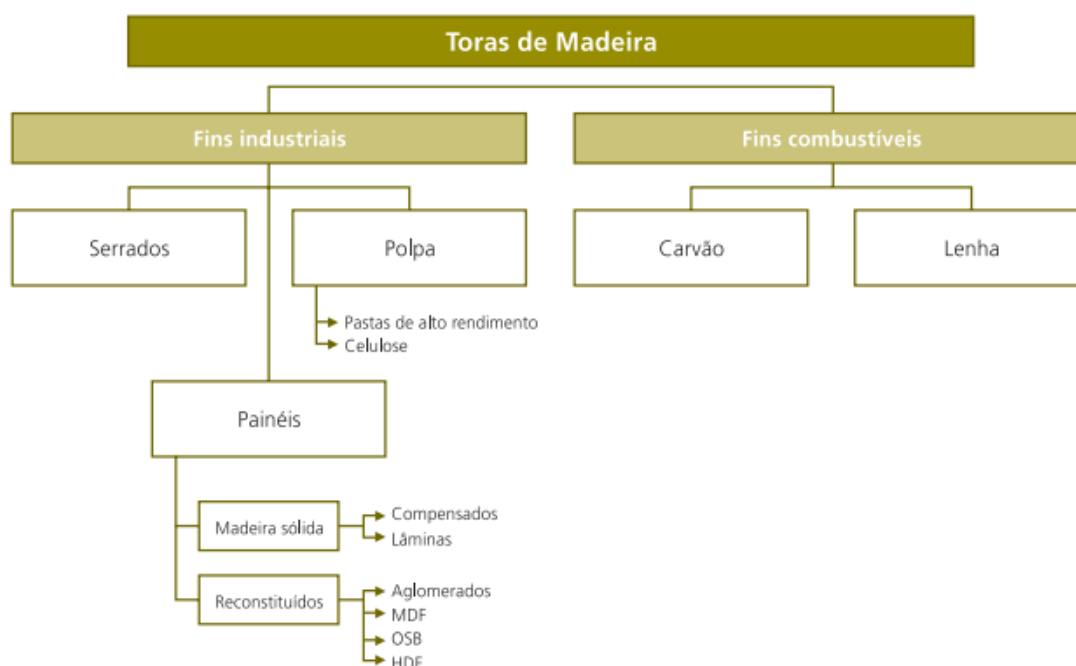
A fabricação de painéis MDP está diretamente inserida na cadeia produtiva do setor florestal, uma atividade econômica complexa e estratégica que integra a produção de matéria-prima, insumos industriais, tecnologia de processamento e aplicações nos setores moveleiro e da construção civil. Em escala global, o setor florestal desempenha papel fundamental como fornecedor de energia e de materiais estruturais (Natalli *et al.*, 2022). No Brasil, essa relevância é ainda mais expressiva, uma vez que o país está entre os maiores detentores de recursos florestais do mundo, combinando florestas nativas extensas com amplas áreas de florestas plantadas, especialmente de *Pinus* e *Eucalyptus*, que constituem a principal base lignocelulósica para a produção de painéis reconstituídos (Campos, 2022).

No contexto específico do MDP, os principais insumos utilizados na fabricação incluem partículas de madeira provenientes, majoritariamente, de florestas plantadas de rápido crescimento. Essas partículas podem derivar tanto do processamento primário da madeira quanto do aproveitamento de resíduos industriais, como cavacos, aparas e subprodutos do desdobro, o que contribui para maior eficiência no uso da matéria-prima e para a redução de desperdícios na cadeia produtiva.

A complexidade da cadeia produtiva do MDP também envolve fabricantes de equipamentos de prensagem, sistemas de secagem, refinadores, além de fornecedores de insumos químicos e projetos de engenharia industrial. Essa integração entre setor florestal, indústria química e engenharia de processos confere ao Brasil posição estratégica na produção de painéis de madeira reconstituída, consolidando o MDP como produto de elevado valor agregado, alinhado à sustentabilidade, ao uso racional de recursos florestais e à dinâmica da economia circular.

A Figura 4 demonstra como a madeira em tora pode ser direcionada tanto para aplicações industriais de maior valor agregado (como painéis reconstituídos, incluindo MDF e aglomerados) quanto para fins energéticos. O esquema contextualiza o MDP dentro da categoria de painéis reconstituídos, inserindo-o na lógica da transformação industrial da madeira e reforçando sua posição na cadeia produtiva florestal.

Figura 4: fluxograma do processo produtivo de painéis de madeira reconstituída.



Fonte: Ministério Do Desenvolvimento Indústria E Comércio (2012).

Além da fração lignocelulósica, a produção do MDP demanda insumos químicos essenciais, como resinas sintéticas termofixas, frequentemente à base de ureia-formaldeído, fenol-formaldeído ou sistemas híbridos, responsáveis pela coesão estrutural do painel. Também são empregados aditivos específicos, como agentes hidrorrepelentes (parafinas e emulsões de cera), catalisadores e, em alguns casos, aditivos retardantes de chama ou melhoradores de desempenho mecânico. Esses componentes são integrados às partículas antes da etapa de prensagem a quente, sob condições rigorosamente controladas de temperatura e pressão (Faria *et al.*, 2020).

3.1.4 Impactos ambientais de monoculturas de eucalipto e pinus na biodiversidade.

A expansão de monoculturas de eucalipto e pinus tem sido amplamente estudada, especialmente quanto aos seus efeitos sobre a fauna, flora, água e solo. A literatura científica de alto impacto mostra de forma consistente que a simplificação estrutural das paisagens leva à redução da diversidade biológica. Um dos estudos mais robustos e recentes é o de Iglesias-Carrasco *et al.* (2025), que compilaram dados globais e concluíram que plantações de eucalipto afetam

negativamente a riqueza e a abundância de espécies de vertebrados, invertebrados e microrganismos. Os autores destacam que tais ambientes oferecem menor heterogeneidade de nichos, o que compromete funções ecológicas essenciais.

Em escala regional, resultados semelhantes vêm sendo observados no Brasil. Inkotte *et al.* (2024) observaram que mudanças no uso da terra associadas a plantações de eucalipto afetam significativamente as comunidades da fauna do solo no Cerrado brasileiro, responsável pela decomposição, ciclagem de nutrientes e manutenção da estrutura edáfica, apresentando significativa redução de abundância e diversidade em áreas ocupadas por monoculturas. Essa perda funcional afeta diretamente a qualidade do solo e sua capacidade de sustentar processos ecológicos de longo prazo.

Mudanças no solo também têm sido observadas em níveis microbianos. Delvaux *et al.* (2021) analisaram o efeito da sazonalidade e da disponibilidade de recursos sobre comunidades microbianas em solos de florestas de eucalipto, afetam os ciclos de carbono e nitrogênio. Esses processos refletem diretamente no equilíbrio biogeoquímico, reforçando a tese de que substituições extensivas de vegetação nativa perturbam o funcionamento natural dos ecossistemas.

Em termos mais amplos, a substituição de vegetação nativa por monoculturas tem sido considerada uma das principais causas de erosão da biodiversidade tropical. Barlow *et al.* (2016), em um dos estudos mais citados da área publicados na revista *Nature*, demonstram que alterações antrópicas dessa magnitude comprometem múltiplas camadas da biodiversidade, desde plantas até vertebrados e invertebrados, alterando profundamente o equilíbrio ecológico.

Diante destas evidências, torna-se extremamente necessário repensar o uso intensivo de fibras de eucalipto e pinus como única base de carga lignocelulósica para a indústria de MDP, buscando alternativas que reduzam o impacto ambiental sobre os biomas e potencializem a sustentabilidade da cadeia produtiva a nível nacional e mundial.

3.2 Resíduos Agroindustriais como Alternativa Sustentável

A geração de resíduos agroindustriais constitui, simultaneamente, um passivo ambiental relevante e uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento de materiais sustentáveis. Processos agroindustriais produzem

grandes volumes de resíduos lignocelulósicos, como bagaço de cana-de-açúcar, serragem, cavacos e aparas de madeira, que muitas vezes são descartados inadequadamente ou destinados à queima. Essa prática contribui para a emissão de gases de efeito estufa, sobrecarga de aterros e contaminação do solo.

Na Região Amazônica, onde cadeias produtivas florestais convivem com desafios estruturais de fiscalização e manejo, a má gestão desses resíduos pode intensificar pressões sobre os recursos naturais, agravando problemas como desmatamento e exploração ilegal de madeira, especialmente em cadeias associadas à produção de painéis como o MDP (Brancalion *et al.*, 2018; Hiranobe *et al.*, 2024; Siqueira *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a valorização de resíduos agroindustriais emerge como alternativa alinhada aos princípios da economia circular. A incorporação desses materiais em painéis reconstituídos, como o MDP, permite transformar subprodutos de baixo valor agregado em insumos industriais estratégicos.

Os materiais lignocelulósicos são tradicionalmente utilizados para diversos fins, como a produção de fios, cordas, sacos, cobertores, carpetes e itens decorativos, reforços em compósitos. Inúmeros estudos têm sido conduzidos para explorar novas aplicações materiais lignocelulósicos, particularmente em compósitos poliméricos, onde sua incorporação pode substituir materiais sintéticos em diversas aplicações e devido à sua natureza ecológica, fácil disponibilidade, baixo custo e biodegradabilidade, tornando-as alternativas adequadas e ecologicamente corretas frente aos materiais sintéticos (Ho *et al.*, 2024).

Os usos multifacetados dos materiais lignocelulósicos estendem-se de itens decorativos ao reforço de matrizes em compósitos automotivos (Qasim *et al.*, 2020). As diversas estruturas que as fibras ou resíduos lignocelulósicos possuem fazem aumentar sua adesão em matrizes poliméricas, melhorando assim o desempenho em aplicações compósitas (Sun, 2019).

As diversas aplicações têxteis e não têxteis das fibras naturais fazem que esse tipo de material tenha destaque crescente no contexto da sustentabilidade ambiental (Dhir, 2022). Na linha de compósitos ecológicos, os materiais lignocelulósicos também oferecem uma opção leve, de baixo custo e renovável, e têm despertado, devido às preocupações com os impactos ambientais de alternativas sintéticas (Girijappa *et al.*, 2019).

O Brasil, conhecido por sua rica biodiversidade, é um produtor significativo de biomassa e fibras naturais (Nouri *et al.*, 2025). O país está bem-posicionado para explorar o potencial de materiais lignocelulósicos em compósitos em diversas regiões, alinhando-se às tendências globais de sustentabilidade. As vantagens do uso desses materiais em relação às opções sintéticas incluem seus aspectos renováveis, menores custos de produção e características atóxicas, tornando-as cada vez mais valiosas em design e engenharia de materiais (Xuechong, 2025).

Resíduos como serragem amazônica e bagaço de cana, quando devidamente secos e classificados granulometricamente, podem contribuir para a melhoria das propriedades físico-mecânicas dos painéis, promovendo melhor distribuição de tensões, maior estabilidade dimensional e desempenho adequado em aplicações moveleiras. Além disso, essa estratégia reduz a dependência de matéria-prima virgem proveniente de espécies tradicionais, ampliando a eficiência do uso dos recursos florestais plantados (Gonçalves; Dias, 2025).

Do ponto de vista econômico, a utilização de resíduos padronizados pode reduzir significativamente os custos de produção, com estimativas indicando economias entre 20% e 30% em comparação a painéis produzidos exclusivamente com partículas de madeira convencional. Ademais, há um ganho competitivo importante no mercado internacional, que cada vez mais exige rastreabilidade, certificação ambiental e redução da pegada de carbono. Painéis produzidos com conteúdo reciclado ou de reaproveitamento agregam valor ambiental ao produto final, fortalecendo sua aceitação em mercados orientados por critérios ESG (Borges; Martins; Basso, 2025).

Entretanto, desafios técnicos persistem. A variabilidade natural dos resíduos, especialmente quanto ao teor de umidade, densidade e composição química, pode comprometer a reprodutibilidade do processo industrial. Teores elevados de umidade podem aumentar a porosidade do painel, prejudicar a adesão em matrizes termorrígidas e comprometer o desempenho mecânico.

Contudo, estudos demonstram que pré-tratamentos adequados, como secagem controlada até teores entre 8% e 12% e otimização da granulometria, são capazes de mitigar esses problemas. Além disso, o emprego de resinas alternativas, como poliuretanas à base de óleo de mamona, tem se mostrado

promissor na redução de emissões de formaldeído, ampliando o caráter ambientalmente responsável do produto (Natalli *et al.*, 2022).

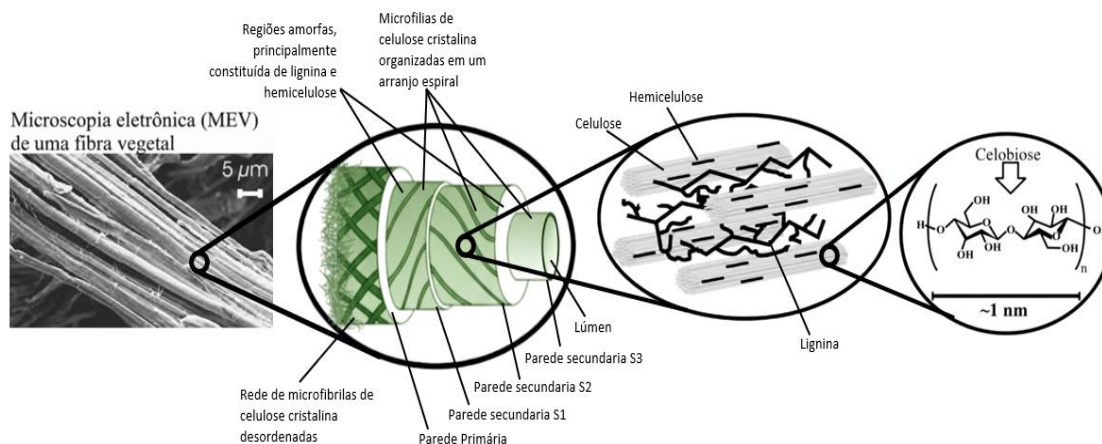
Sob uma perspectiva estratégica, deixar de aproveitar os resíduos agroindustriais significa desperdiçar o potencial da bioeconomia brasileira, especialmente no contexto amazônico, onde subprodutos ainda pouco explorados como resíduos de andiroba, apresentam elevado potencial de agregação de valor. A adoção de tecnologias limpas, adesivos ecológicos e modelos produtivos baseados na valorização de resíduos posiciona os painéis MDP como produtos de alto valor socioambiental, capazes de conciliar eficiência produtiva, geração de renda regional e conservação ambiental. Assim, a integração entre inovação tecnológica e reaproveitamento de resíduos não representa apenas uma alternativa técnica, mas uma necessidade estratégica para o desenvolvimento sustentável do setor florestal e agroindustrial (Louise *et al.*, 2026).

3.2.1 Composição lignocelulósica e estrutura morfológica da biomassa.

Os materiais lignocelulósicos são constituídos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, além de quantidades variáveis de extrativos e componentes minerais. A proporção desses constituintes depende da espécie vegetal, das condições de crescimento e do processo de obtenção da biomassa, influenciando diretamente suas propriedades físicas, químicas e mecânicas (Silva *et al.*, 2009).

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática da organização estrutural típica de materiais lignocelulósicos. Em nível microscópico, as células vegetais são formadas por uma parede primária delgada, depositada nas fases iniciais do crescimento celular, e por uma parede secundária mais desenvolvida, subdividida nas camadas S1, S2 e S3 (Silva *et al.*, 2009).

Figura 5 Esquema da estrutura lignocelulósica baseada da imagem MEV de fibra de eucalipto



Fonte: Adaptado de Silva et. al. (2009).

A parede secundária é composta predominantemente por microfibrilas de celulose envolvidas por uma matriz formada por hemicelulose e lignina. A camada S2 apresenta maior espessura em comparação às demais camadas e contém microfibrilas organizadas em arranjos helicoidais. Essas microfibrilas possuem diâmetro entre 10 e 30 nm e são formadas pelo agrupamento ordenado de cadeias de celulose. A orientação dessas estruturas e seu grau de cristalinidade influenciam significativamente as propriedades mecânicas dos materiais lignocelulósicos (Silva *et al.*, 2009).

A celulose é o principal componente estrutural da biomassa vegetal, sendo responsável por grande parte de sua resistência mecânica. Trata-se de um polímero natural de cadeia longa, com elevado grau de polimerização e organização molecular. Segundo Silva *et al.* (2012), a celulose exerce papel fundamental na integridade estrutural dos materiais vegetais, contribuindo para sua elevada resistência à tração. De acordo com Lee; Khalina; Lee, (2021), o grau de polimerização da celulose pode variar de aproximadamente 10.000 a mais de 15.000 unidades, podendo alcançar valores superiores em condições específicas.

A hemicelulose constitui uma fração amorfa da biomassa lignocelulósica, apresentando menor grau de polimerização, normalmente entre 50 e 200 unidades monoméricas. Sua principal função é atuar como elemento de ligação

entre as microfibrilas de celulose, contribuindo para a organização estrutural da parede celular. Já a lignina é um polímero aromático tridimensional responsável por conferir rigidez, estabilidade dimensional e resistência à degradação biológica aos tecidos vegetais (Lee; Khalina; Lee, 2021).

A coesão entre as células vegetais é promovida pela lamela média, uma região rica em lignina, hemicelulose e compostos pécicos. Essa estrutura desempenha papel fundamental na adesão intercelular e na integridade mecânica dos tecidos vegetais. Almeida *et al.*, (2018) destacam que a lignina presente nessa região atua como agente natural de ligação, contribuindo para a rigidez e estabilidade estrutural da biomassa.

Além dos componentes estruturais, as biomassas vegetais podem conter quantidades significativas de extrativos, incluindo óleos, ceras, resinas, taninos e outros compostos de baixa massa molecular. Esses constituintes podem exercer influência significativa sobre o comportamento da biomassa quando empregada na produção de compósitos, principalmente por alterarem a molhabilidade superficial e a adesão interfacial entre a biomassa e a matriz polimérica (Kabir *et al.*, 2012).

Barros *et al.*, (2013) investigaram a arquitetura das microfibrilas e demonstraram que o arranjo das regiões cristalinas e amorfas da celulose, associado à presença de lignina e hemicelulose, influencia não apenas as propriedades mecânicas dos materiais lignocelulósicos, mas também sua processabilidade e aplicabilidade em compósitos. De forma complementar, Baldo *et al.* (2013) verificaram que as características estruturais da região intercelular exercem influência significativa na adesão entre materiais lignocelulósicos e matrizes poliméricas, sendo determinantes para o desempenho mecânico dos compósitos.

Dessa forma, a composição química e a organização estrutural da biomassa lignocelulósica exercem influência direta sobre propriedades como absorção de água, estabilidade dimensional, resistência mecânica e adesão interfacial. O conhecimento desses aspectos é fundamental para compreender os efeitos dos tratamentos aplicados ao resíduo de andiroba e sua influência no desempenho dos compósitos produzidos neste estudo.

3.3 Compósitos poliméricos com reforço lignocelulósico

3.3.1 Compósitos Poliméricos: Conceitos Gerais

Os compósitos poliméricos são definidos como materiais formados pela combinação de uma matriz polimérica contínua com uma fase dispersa, como partículas, fibras ou cargas estruturais. O objetivo dessa combinação é melhorar as propriedades mecânicas, térmicas ou funcionais que o polímero isolado não possui.

A matriz polimérica serve como um aglutinante, mantendo a fase de reforço unida, enquanto a fase dispersa fornece resistência e outras propriedades aprimoradas. Essa sinergia permite que os compósitos poliméricos apresentem características superiores, como maior resistência, estabilidade térmica e funcionalidade, em comparação com os polímeros individuais isoladamente (Hsissou *et al.*, 2021).

A literatura descreve que os compósitos poliméricos como materiais em que a matriz polimérica une reforços (como fibras de vidro, carbono ou aramida) que melhoram o desempenho geral e a integridade estrutural do compósito (Greene, 2021; Rahman; Putra, 2019).

As cargas ou fibras dispersas também influenciam propriedades como resistência mecânica, resistência térmica, resistência ao desgaste e até mesmo reduzem a combustibilidade, dependendo dos materiais utilizados e de suas interações dentro do compósito. Essas propriedades resultam em interações físicas e, às vezes, químicas entre a matriz polimérica e a fase dispersa, que mantém suas características individuais enquanto cria um material combinado superior (Feng; Venna; Hopkinson, 2016; Jesson; Watts, 2012).

Em compósitos poliméricos, a matriz e a fase de reforço exercem funções complementares que determinam o desempenho final do material. A matriz atua como elemento contínuo responsável por unir as partículas ou fibras, garantir a coesão do sistema e distribuir as tensões aplicadas, além de proteger o reforço contra desgaste mecânico, abrasão e ataques químicos (Park; Seo, 2011).

Para que essa transferência de tensões seja eficiente, é essencial que exista boa adesão interfacial, evitando a formação de trincas e assegurando que o compósito suporte adequadamente as cargas de serviço. Já o reforço, constituído por partículas ou fibras lignocelulósicas, contribui para elevar a

rigidez, a resistência mecânica, o módulo de elasticidade e a estabilidade dimensional, propriedades geralmente limitadas na matriz isoladamente.

Dessa forma, a incorporação do reforço permite a obtenção de compósitos de maior desempenho estrutural e melhor relação custo-benefício, uma vez que reduz o volume de matriz necessário sem comprometer as propriedades funcionais do material.

Em sistemas à base de resíduos lignocelulósicos, a matriz polimérica costuma ser termoplástica ou termoendurecível, desempenhando papel essencial na formação de uma estrutura consistente e na garantia de integridade sob carregamentos externos. O desempenho final do compósito é fortemente influenciado pela compatibilidade química entre matriz e reforço, pela dispersão adequada das partículas e pela presença de ligações interfaciais suficientemente fortes para permitir a transferência eficiente de tensão.

3.3.2 Interação matriz polimérica–partícula lignocelulósica

A interação entre a matriz polimérica e as partículas lignocelulósicas é um determinante crítico das propriedades mecânicas e físicas dos compósitos. A estrutura química inerente dos materiais lignocelulósicos, caracterizada predominantemente por celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos, resulta em superfícies com muitos grupos hidroxila polares e hidrofílicos (Chun; Yeng; Hussiensyah, 2016).

Essa hidrofilicidade contrasta fortemente com a natureza hidrofóbica típica de muitas matrizes poliméricas, criando desafios para a obtenção de compatibilidade interfacial. Tais discrepâncias podem levar a falhas de adesão e descontinuidades, comprometendo, em última análise, a eficiência da transferência de carga no compósito (Arslan *et al.*, 2015).

A melhoria da ligação interfacial entre materiais lignocelulósicos e polímeros frequentemente exige modificações químicas, térmicas ou mecânicas das partículas. Por exemplo, a remoção de óleos residuais e tratamentos de superfície podem reduzir a energia superficial e aumentar a rugosidade, o que favorece uma melhor adesão (Hao *et al.*, 2018; Jin *et al.*, 2019).

A introdução de agentes compatibilizantes, como polímeros enxertados com anidrido maleico, demonstrou melhorar significativamente a aderência entre a matriz e as fibras, resultando em propriedades mecânicas aprimoradas dos

compósitos, facilitando a distribuição eficaz de tensões e reduzindo a absorção de água (Altun; Celebi; Ovali, 2022; Nyambo; Mohanty; Misra, 2011).

Em particular, estudos estabeleceram que uma interface bem reforçada permite um desempenho mecânico superior, otimizando a transferência de energia durante a aplicação de cargas (Gorgun; Ali; Islam, 2024; Rao; Zhou; Fan, 2018).

Além disso, para alcançar alto desempenho em compósitos, é crucial controlar meticulosamente as interações na interface matriz-partícula. Estratégias como o uso de agentes de acoplamento de silano têm demonstrado melhorar a adesão, comprovando sua importância no processamento e nas aplicações de compósitos (Nakamura *et al.*, 2020; Petrovic *et al.*, 2024).

Esses agentes não apenas garantem a compatibilidade, como também melhoram as propriedades térmicas e mecânicas do produto final (Wang *et al.*, 2017a). A melhoria da adesão interfacial resulta em maior resistência à tração e módulo de elasticidade, reforçando a importância do tratamento e preparo adequados das partículas lignocelulósicas antes de sua incorporação em matrizes poliméricas (Sapsrithong *et al.*, 2017).

A interface entre o reforço e a matriz polimérica exerce um papel crucial no desempenho de materiais compósitos, especialmente no que se refere à eficiente transferência de tensões mecânicas. Essa região de contato entre as fases é responsável por garantir que os esforços aplicados ao compósito sejam devidamente transmitidos da matriz para as fibras, otimizando seu comportamento estrutural (Marinucci, 2011).

A interação interfacial em materiais compósitos é crítica para seu desempenho, dependendo fortemente de vários mecanismos de adesão, como ligações químicas, forças eletrostáticas, adesão mecânica, bem como processos de umectação e adsorção. Dentre estes, a ligação química frequentemente surge como um dos mecanismos mais eficazes devido à sua capacidade de criar interações estáveis e duradouras entre os constituintes do compósito (Akindoyo *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2021).

Isso é particularmente facilitado pelo uso de agentes de acoplamento de dupla afinidade, que podem reagir simultaneamente com grupos funcionais tanto na matriz quanto na superfície da fibra, aumentando consideravelmente a força de adesão (Akindoyo *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2021).

A resistência mecânica dos compósitos é profundamente afetada pela baixa adesão interfacial, o que pode levar ao aumento da formação de vazios e à redução do desempenho mecânico (Akindoyo *et al.*, 2021). Estudos indicam que uma adesão interfacial eficaz é fundamental para inibir a absorção de água na interface, retardando assim a degradação das propriedades mecânicas ao longo do tempo (Han *et al.*, 2021).

A adesão interfacial aprimorada também promove a capacidade de nucleação, essencial para manter o desempenho em diversas condições ambientais, como o envelhecimento por UV (Han *et al.*, 2021). Além disso, a presença de agentes funcionalizados com catecol demonstrou aumentar significativamente as propriedades mecânicas por meio de melhor reticulação e ligação (Wang *et al.*, 2017b).

A incorporação de tratamentos mecânicos, como a rugosidade das superfícies antes da ligação, também pode melhorar o intertravamento mecânico, melhorando assim a resistência da adesão (Michelotti *et al.*, 2020).

As características interfaciais podem ser ainda mais otimizadas por meio de tratamentos e da seleção de adesivos apropriados, onde a compatibilidade química e o potencial de ligação influenciam significativamente o sucesso da adesão. A molhabilidade desempenha um papel crucial nesse contexto, pois afeta a capacidade do adesivo de permear a microestrutura da superfície e formar ligações eficazes (Tsujimoto *et al.*, 2016).

A natureza dinâmica das interações na interface impulsiona a necessidade de um projeto meticuloso em materiais compósitos, garantindo que cada componente interaja de forma otimizada com os outros para um desempenho aprimorado.

Além das interações químicas, mecanismos físicos também podem contribuir para a adesão, como o atrito decorrente da contração da matriz durante o processo de cura e a ancoragem mecânica em superfícies rugosas das fibras (Rodrigues, 2005). No entanto, tais interações físicas, embora relevantes, geralmente conferem menor resistência interfacial quando comparadas às ligações químicas (Zaldivar *et al.*, 2014).

A compatibilidade entre os componentes é essencial para uma adesão eficaz. Fatores como a molhabilidade da superfície da partícula, a compatibilidade dos parâmetros de solubilidade e a ausência de impurezas ou umidade são determinantes nesse processo (Pires, 2009).

Em compósitos reforçados com fibras naturais ou sintéticas, a modificação superficial das fibras tem sido amplamente empregada como estratégia para aprimorar a adesão interfacial e, conseqüentemente, melhorar as propriedades finais do material (Tran *et al.*, 2015).

Sob a perspectiva da micromecânica dos compósitos, o desempenho ideal requer a formação de uma zona interfacial delgada, porém rígida, capaz de transmitir tensões de forma eficiente, seja por meio de ligações químicas diretas ou de forças de fricção suficientemente intensas (Ojo, 2023).

Dessa forma, a compreensão aprofundada dos mecanismos que regem a formação e o comportamento da interface fibra/matriz é essencial para o desenvolvimento de compósitos com propriedades físicas, térmicas e mecânicas otimizadas, especialmente em aplicações de engenharia estrutural (Marinucci, 2011).

3.3.3 Relação entre características de resíduos lignocelulósicos e propriedades de compósitos

As propriedades de compósitos reforçados com resíduos lignocelulósicos são diretamente influenciadas por características físicas, químicas e morfológicas do material de reforço, como teor de umidade, granulometria, densidade das partículas, composição química e energia superficial. Esses fatores atuam de forma interdependente na definição da estrutura e do desempenho do compósito.

O teor de umidade é um parâmetro crítico, especialmente em processos com prensagem térmica, pois a presença de água pode gerar vapor, resultando na formação de vazios e defeitos estruturais que comprometem as propriedades mecânicas. Além disso, a umidade pode atuar como plastificante, reduzindo a rigidez das fibras e prejudicando a adesão interfacial (Marcuello *et al.*, 2019; Patsiaoura *et al.*, 2024).

A granulometria influencia diretamente a área superficial e o comportamento do sistema. Partículas menores aumentam a área de contato com a matriz, mas elevam a demanda por resina e a viscosidade da mistura. Por outro lado, partículas maiores favorecem a trabalhabilidade, porém reduzem a área interfacial disponível (Faludi *et al.*, 2014).

A densidade das partículas afeta a fração volumétrica e o empacotamento. Para uma mesma massa, materiais de menor densidade ocupam maior volume, influenciando a compactação e propriedades como resistência mecânica e estabilidade dimensional (Najahi *et al.*, 2023).

A composição química, especialmente o teor de extrativos, exerce papel fundamental. Compostos lipídicos, de natureza apolar, tendem a formar uma camada hidrofóbica na superfície das partículas, reduzindo a molhabilidade e dificultando o contato com a matriz. Essa camada atua como barreira à adesão, comprometendo a transferência de tensões e favorecendo falhas interfaciais (Colson *et al.*, 2018; Hung *et al.*, 2017).

Nesse contexto, a eficiência da adesão está diretamente relacionada à capacidade de ancoragem da matriz sobre a fase lignocelulósica rígida. Entretanto, elevados teores lipídicos comprometem esse mecanismo ao promover a formação de uma camada superficial de baixa rigidez, que impede o contato direto da resina com a estrutura resistente do material (Colson *et al.*, 2018; Hung *et al.*, 2017).

Essa condição reduz a ancoragem mecânica, favorece a formação de interfaces fracas e dificulta a transferência eficiente de tensões, aumentando a suscetibilidade a falhas prematuras no compósito (Hung *et al.*, 2017). Além disso, características como cristalinidade, morfologia e compatibilidade interfacial também influenciam o desempenho dos compósitos, sendo essenciais para otimizar a transferência de tensões e a estabilidade estrutural (Zhao *et al.*, 2024).

3.4 Andiroba como Matéria-Prima Alternativa

3.4.1 Contextualização da cadeia produtiva da andiroba

A andiroba (*Carapa guianensis*) é classificada como um Produto Florestal Não Madeireiro (PFNM), categoria que engloba todos os bens de origem florestal extraídos sem a necessidade de corte da árvore. Entre esses produtos incluem-se sementes, frutos, óleos, fibras, resinas e extratos vegetais, os quais desempenham papel estratégico na manutenção econômica, social e ambiental das populações da Amazônia (Rufino *et al.*, 2024).

No contexto amazônico, os PFNMs possuem importância singular. Embora sua participação no Produto Interno Bruto nacional seja relativamente modesta quando comparada aos setores madeireiro ou mineral, esses produtos

são fundamentais para a subsistência e geração de renda das populações tradicionais, ribeirinhas e agroextrativistas. No caso da andiroba, a extração das sementes para produção de óleo constitui uma atividade histórica, transmitida entre gerações, integrando saberes tradicionais e práticas sustentáveis de manejo (Mendonça; Ferreira, 2019).

Mesmo quando a renda obtida com a comercialização da andiroba é considerada baixa em termos macroeconômicos, ela desempenha função estratégica na conservação florestal. Ao gerar receita sem exigir desmatamento, a exploração de PFNMs fortalece modelos de desenvolvimento baseados na floresta em pé. Assim, a manutenção da cobertura vegetal deixa de ser obstáculo econômico e passa a ser ativo produtivo, promovendo equilíbrio entre uso e preservação (Rufino *et al.*, 2024).

Outro aspecto relevante é a contribuição dos PFNMs para a segurança alimentar e diversidade produtiva das comunidades locais. Além do óleo, partes da andiroba podem ser utilizadas para diferentes finalidades, integrando sistemas agroflorestais e fortalecendo economias de base familiar. Essa diversificação reduz vulnerabilidades econômicas e sociais, principalmente em regiões com limitado acesso a mercados formais (Mendonça; Ferreira, 2019).

Embora os PFNMs sejam pouco significativos no cenário econômico geral, são imprescindíveis para a sobrevivência das populações tradicionais. No caso da andiroba, observa-se claramente essa dualidade: baixo impacto nas estatísticas nacionais, mas elevado impacto na vida cotidiana das comunidades amazônicas (Andreola *et al.*, 2022).

3.4.2 Fatores positivos do resíduo de extração do óleo de andiroba

A necessidade de fontes alternativas de fibras e partículas tem impulsionado pesquisas sobre o uso de resíduos agroindustriais como substitutos sustentáveis de carga lignocelulósica oriundas de eucalipto e pinho. Silva *et al.* (2013) destacam o potencial das fibras lignocelulósicas como matérias-primas sustentáveis para a produção de polímeros e compósitos, demonstrando que resíduos lignocelulósicos provenientes de diferentes indústrias apresentam propriedades físico-químicas adequadas para uso em compósitos, podendo substituir fibras sintéticas convencionais com resultados equivalentes ou superiores.

A andiroba, pertencente à família *Meliaceae*, é representada principalmente pelas espécies *Carapa guianensis* e *Carapa procera*. Trata-se de uma árvore que pode atingir até 55 metros de altura. A *C. guianensis* possui tronco reto de 20 a 30 metros, enquanto a *C. procera* alcança até 15 metros (Ferraz; Camargo; Sampaio, 2002).

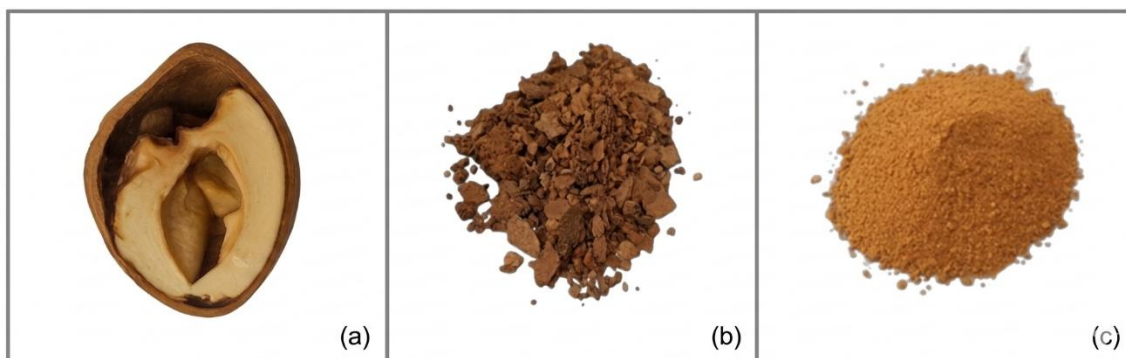
A principal distinção entre as espécies está no tamanho das sementes, sendo as de *C. guianensis* geralmente maiores. Os frutos apresentam formato globoso ou subgloboso, com quatro válvulas e de 4 a 16 sementes, cada uma pesando cerca de 21 g (Ferraz; Camargo; Sampaio, 2002).

Uma única árvore de *C. guianensis* pode produzir entre 700 e 4.000 sementes, das quais se extrai o óleo de andiroba. Este é um insumo de grande importância para os setores agroextrativista e cosmético. Em anos de alta frutificação, a produção pode ultrapassar 10 kg por árvore. Essa estimativa baseia-se no monitoramento de 146 árvores no estado de Roraima (Klimas *et al.*, 2021).

Além do óleo, o resíduo da extração é particularmente rico em lipídios, o que possibilita seu reaproveitamento. O óleo é amplamente utilizado em formulações voltadas para cuidados com a pele e cabelos, enquanto a casca e as folhas apresentam propriedades cicatrizantes e têm sido exploradas na fabricação de materiais como painéis compostas (Dias *et al.*, 2023).

Na Figura 6(a), observa-se a semente em corte. Já a Figura 6(b) exibe o resíduo do processo de extração de óleo de andiroba. Por fim, a Figura 6(c) apresenta o resíduo cominuído que servirá de objeto do estudo.

Figura 6 – Partes da planta *Carapa guianensis* (andiroba): (a) a semente em corte; (b) resíduo do processo de extração; (c) o resíduo cominuído.



Fonte: Autor (2025).

De acordo com o IBGE (2006), foram colhidas 878 toneladas de sementes de andiroba no Brasil, no ano de 2016. No contexto amazônico, o resíduo da extração do óleo de andiroba desponta como um dos materiais mais promissores, gerado em larga escala durante a extração do óleo de suas sementes, que representa aproximadamente 66-70% da biomassa do fruto (De Sousa *et al.*, 2022).

Apesar de sua abundância, esse resíduo é frequentemente subutilizado. No entanto, possui significativa composição lignocelulósica e alto teor de óleo, tornando-o potencialmente adequado para a fabricação de materiais compósitos (Padrino *et al.*, 2018).

O uso eficiente desse resíduo reforça a importância da implementação de estratégias que promovam a sustentabilidade na indústria agroflorestal. O óleo da andiroba tem uma longa história medicinal e fitoterápica, principalmente na América do Sul. Estima-se que o Brasil consuma cerca de 30 mil litros de óleo por ano e exporta anualmente, em média, 450 mil litros desse óleo (De Campos *et al.*, 2013).

Com base nesses dados e considerando o peso em sementes por litro podemos estimar uma produção anual de resíduos de entre 800 a 1240 toneladas/ano, sendo um volume interessante para atender as demandas de produção do mercado.

3.4.3 Torta de andiroba: Resíduo agroindustrial desvalorizado

A andiroba é uma árvore amazônica cujas sementes são utilizadas para extração de óleo por métodos tradicional e industrial. No processo tradicional, os frutos são coletados após a queda natural, as sementes são retiradas, cozidas e deixadas em repouso para uma leve fermentação; em seguida, são trituradas e moldadas manualmente, permitindo que o óleo escorra lentamente por gravidade, sem uso de prensas ou solventes.

Já no processo industrial, as sementes passam por secagem controlada, descascamento e moagem, sendo o óleo extraído por prensagem mecânica (a frio ou a quente) ou por solventes, com foco em maior rendimento e padronização, seguido de filtração e eventual purificação. O processamento da torta de andiroba consiste em transformar a massa residual da prensagem em subprodutos de valor agregado, evitando o desperdício desse material rico em compostos bioativos (Medeiros *et al.*, 2021).

A remoção do óleo de andiroba presente nos resíduos lignocelulósicos é essencial para facilitar sua utilização em aplicações tecnológicas, particularmente na produção de painéis aglomerados.

A presença de lipídios, como os encontrados no óleo de andiroba, pode prejudicar significativamente a adesão entre as fibras e a matriz polimérica, levando à redução da coesão interna e à diminuição das propriedades mecânicas do compósito final (Papadopoulos, 2021; Santos *et al.*, 2022). Isso é fundamental, visto que a adesão eficaz dentro do compósito é necessária para o desempenho mecânico ideal (Missio *et al.*, 2017).

Além disso, o óleo atua como um agente hidrofóbico, o que pode dificultar a penetração de ligantes na matriz lignocelulósica. Tal impedimento perturba a homogeneidade estrutural do painel resultante e compromete a integridade mecânica geral (Rodríguez-Fabià *et al.*, 2022). Estudos demonstraram que a adesão interfacial aprimorada, obtida por meio da remoção de lipídios, permite uma integração mais eficaz de ligantes nas fibras, melhorando assim a compatibilidade entre os constituintes do material (Tran *et al.*, 2019).

Consequentemente, a remoção eficiente de óleos residuais resulta em uma melhor ancoragem da matriz polimérica na rede de fibras, resultando em painéis que apresentam maior resistência, estabilidade dimensional e durabilidade (Lam *et al.*, 2020). Essas melhorias são vitais para expandir as potenciais aplicações de painéis de partículas feitos de resíduos lignocelulósicos, pois podem ser adaptados para usos mais rigorosos, mantendo o desempenho funcional em condições ambientais variadas (Emmanuel; Kuqo; Mai, 2021).

3.5 Pré-tratamentos Aplicados a Resíduos com fração lipídica.

A remoção do óleo de andiroba de resíduos lignocelulósicos é essencial para facilitar sua utilização em aplicações tecnológicas, particularmente na produção de painéis aglomerados. A presença de lipídios, como os encontrados no resíduo de andiroba, pode prejudicar significativamente a adesão entre as fibras e a matriz polimérica, levando à redução da coesão interna e à diminuição das propriedades mecânicas do compósito final. Isso é prejudicial, visto que a adesão eficaz dentro do compósito é necessária para o desempenho mecânico ideal (Missio *et al.*, 2017; Papadopoulos, 2021; Santos *et al.*, 2022).

Além disso, o óleo atua como um agente hidrofóbico, o que pode dificultar a penetração de ligantes na matriz lignocelulósica. Tal impedimento perturba a homogeneidade estrutural do painel resultante e compromete a integridade mecânica geral (Rodríguez-Fabià *et al.*, 2022).

Estudos demonstraram que a adesão interfacial aprimorada, obtida por meio da remoção de lipídios, permite uma integração mais eficaz de ligantes nas fibras, melhorando assim a compatibilidade entre os constituintes do material (Tran *et al.*, 2019).

Consequentemente, a remoção eficiente de óleos residuais resulta em uma melhor ancoragem da matriz polimérica na rede de fibras, resultando em painéis que apresentam maior resistência, estabilidade dimensional e durabilidade (Lam *et al.*, 2020).

Essas melhorias são vitais para expandir as potenciais aplicações de painéis de partículas feitos de resíduos lignocelulósicos, pois podem ser adaptados para usos mais rigorosos, mantendo o desempenho funcional em condições ambientais variadas (Emmanuel *et al.*, 2021).

Dentre os processos de extração de óleos residuais presentes em biomassas lignocelulósicas, pode-se destacar lavagem com água quente, o uso de surfactantes como detergentes (em diferentes concentrações) e a extração com solventes (álcool etílico).

3.5.1 Tratamento com água quente

Dentre essas técnicas, a lavagem com água quente é amplamente empregada devido à sua simplicidade e eficiência na remoção de extrativos hidrossolúveis e de parte dos lipídios superficiais da biomassa (Dias *et al.*, 2023). Esse tipo de tratamento promove a solubilização de hemiceluloses e modifica parcialmente a estrutura da lignina, facilitando a liberação de compostos indesejáveis. Além disso, o uso de água quente líquida é eficaz na dissolução de extrativos hidrossolúveis, sais inorgânicos e hemiceluloses, resultando em uma biomassa com maior qualidade para as etapas subsequentes de processamento (Gong *et al.*, 2025).

Segundo Dyartanti *et al.* (2019), o pré-tratamento com água quente também melhora significativamente a acessibilidade enzimática da celulose, ao promover a quebra parcial da estrutura recalcitrante da biomassa lignocelulósica.

Essa modificação estrutural permite que as enzimas atuem com maior eficácia sobre as fibras de celulose, favorecendo os processos de hidrólise e, conseqüentemente, a conversão de polissacarídeos em açúcares fermentáveis.

Contudo, é importante destacar que a lavagem repetida com água quente pode potencializar ainda mais a digestibilidade enzimática da biomassa. Isso ocorre pela remoção gradual de extrativos solúveis em água, os quais são conhecidos por interferirem negativamente na eficiência da hidrólise. Assim, o pré-tratamento com água quente se mostra não apenas uma etapa eficaz de desoleificação parcial, mas também um fator-chave para a melhoria da performance do resíduo (Frankó *et al.*, 2018; Matsunaga *et al.*, 2014).

A literatura aponta uma variedade de estudos voltados aos tratamentos aplicáveis aos resíduos de andiroba, com ênfase em seu potencial de aproveitamento em diferentes contextos. Em um desses estudos, Sá *et al.* (2025) abordam a utilização da biomassa residual de andiroba na produção de ramnolipídeos, compostos que possuem propriedades inseticidas e que promovem a sustentabilidade na obtenção de biossurfactantes.

Estudos que exploram as características fisiológicas da planta, como as trocas gasosas e a alocação de biomassa, destacando a versatilidade da andiroba em sistemas agroflorestais (De Oliveira; Marengo, 2019). Aplicações como a madeira de andiroba, são bastante reconhecidas por sua resistência e qualidade, sendo amplamente empregada na construção civil e na fabricação de móveis (De Souza Ferreira *et al.*, 2019).

Porém, para esse tipo de aplicação faz-se necessário a extração residual do óleo que muitas vezes, representa uma fração significativa com alto potencial de valorização e que pode ser inserida em cadeias de produção mais amplas, contribuindo para uma economia circular ao transformar resíduos em insumos ou produtos de valor agregado (De Souza *et al.*, 2020).

3.5.2 Tratamento por lavagem com surfactante

O uso de surfactantes, como detergentes neutros, juntamente com a lavagem com água quente é eficaz na remoção de óleos e ceras presentes na superfície da biomassa. Os surfactantes desempenham um papel fundamental na redução da tensão superficial, o que aumenta a solubilização de lipídios e facilita sua remoção durante o processo de lavagem (Yao *et al.*, 2024).

Embora a literatura específica sobre surfactantes na extração do óleo de resíduos lignocelulósicos seja limitada, estudos envolvendo outras biomassas indicam que a combinação de surfactantes com pré-tratamentos térmicos pode aumentar significativamente a eficiência da extração de compostos lipídicos.

Os surfactantes podem diminuir a tensão superficial entre as fases líquidas durante o pré-tratamento, extraíndo efetivamente os compostos de lignina e minimizando a redeposição nas superfícies da parede celular da biomassa melhorando a eficiência dos processos de hidrólise enzimática e extração (Cheng *et al.*, 2022).

Frederick *et al.* descreve que a lavagem com água quente combinada com surfactantes em biomassa de *Populus deltoides* L. produziram maximizou os rendimentos quanto a fermentação de etanol, indicando que a lavagem foi necessária para uma sacarificação eficiente e subsequente fermentação.

Embora o objetivo deste trabalho não tenha sido maximizar a recuperação de carboidratos, houve diferenças significativas nas concentrações de glicose e nos rendimentos de etanol no hidrolisado enzimático entre a biomassa pré-tratada lavada e não-lavada, indicando que, nas condições de pré-tratamento utilizadas neste trabalho, a lavagem foi necessária para uma sacarificação eficiente e subsequente fermentação.

Os surfactantes podem romper a estrutura lignocelulósica do material, reduzindo a cristalinidade das fibras e aumentando a porosidade, e essas alterações facilitam a extração de compostos lipofílicos (Yao *et al.*, 2024).

3.5.3 Tratamento por extração com álcool

A extração de óleos e extrativos de biomassa lignocelulósica utilizando solventes orgânicos, particularmente álcool etílico (etanol), é uma técnica bem estabelecida no processamento de biomassa. O etanol é considerado um "solvente verde" devido à sua baixa toxicidade e facilidade de recuperação, tornando-o uma opção ambientalmente correta para esse fim (Rodriguez *et al.*, 2020). O processo de extração é particularmente eficaz na solubilização de compostos lipofílicos, como óleos residuais, que podem comprometer as propriedades da biomassa dependendo do tipo de aplicação.

A eficiência da extração com etanol é influenciada por diversos fatores, incluindo a polaridade do solvente, a relação solvente/biomassa e as

características físico-químicas específicas dos compostos alvos da extração. Diferentes condições, como temperatura e tempo variáveis, podem afetar significativamente o rendimento da extração e a composição dos compostos extraídos. Nesse sentido, a otimização desses parâmetros pode aumentar a solubilização de lipídios, melhorando assim a qualidade geral e a utilidade da biomassa (Kooprasertying *et al.*, 2022; Zwirzitz *et al.*, 2021).

3.6 Resina poliuretana à base do óleo de mamona

A escolha da resina na fabricação de painéis e chapas de madeira é um fator imprescindível para a garantia da confecção de um produto de boa qualidade (Saldanha; Iwakiri, 2008).

Dentre as principais resinas disponíveis no mercado, a resina poliuretana possui destaque na indústria, por conta de suas vantagens, como alto desempenho mecânico, alta capacidade de isolamento térmico e/ou acústico e ampla disponibilidade. Ela vem sendo aplicada em diversos setores na produção de materiais a base de espuma, desde a indústria automobilística até indústria de colchões e estofados (Atiqah *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2022).

Essa versatilidade se deve à microestrutura, que é composta por células de ar que influenciam diretamente no seu desempenho. Quando estas células são abertas, o polímero produzido tende a ser mais flexível, ao passo que espumas com células fechadas garantem maior isolamento térmico, por conta do gás isolado no interior das células. Além disso, células fechadas permitem maior rigidez, por conta do grau de reticulação da estrutura (Chakraborty; Chatterjee, 2020; Ma *et al.*, 2022; Somarathna *et al.*, 2018).

Esse tipo de resina é produzido a partir da reação entre um isocianato e um segundo componente de baixo peso molecular munido de grupos hidroxilas. A aplicação comercial deste produto foi iniciada no século XX, a partir de reações de polimerização em etapas entre isocianatos com polióis (Gama *et al.*, 2018).

Uma das fontes mais viáveis para obtenção desse poliálcool são óleos vegetais como óleo de girassol, mamona, linhaça, oliva etc. No caso do óleo da mamona, este é um poliéster natural, derivado da *Ricinus communis L.*, uma planta de fácil cultivo e disponibilidade (Ciastowicz *et al.*, 2025).

Do ponto de vista industrial, o poli isocianato utilizado pode ser produto de uma mistura com outro monômero, o qual irá atuar como um aditivo específico,

seja ele catalisador, retardante de chama etc. (Gama; Ferreira; Barros-Timmons, 2019; Mutlu; Meier, 2010).

A concentração de cada componente dependerá do tipo de material desejado. As espumas flexíveis possuem mais da metade do peso constituinte de polióis, visto que este atua como o componente elastomérico (Prociak; Rojek; Pawlik, 2012; Kaikade; Sabnis, 2023). Já no caso das espumas mais rígidas, a maior proporção em peso da resina é constituída pelos poli-isocianatos. A concentração também pode afetar em outros fatores, desde propriedades e até o tempo de reação de polimerização da espuma (Kim; Kim, 2008).

3.6.1 Uso de poliuretana à base do óleo da mamona em compósitos

O uso de resina poliuretana à base do óleo da mamona pode ser uma alternativa eficaz para compósitos, visto que materiais lignocelulósicos geralmente possuem uma alta densidade de grupos hidroxilas e estes possuem alta reatividade com o grupo isocianato da poliuretana. Isso pode permitir uma boa interação entre matriz e reforço utilizado (Chakraborty; Chatterjee, 2020).

A aplicação na produção de compósitos poliméricos tem sido recorrente, por conta da boa adesão com materiais lignocelulósicos, por conta das vantagens econômicas e ambientais (Ma *et al.*, 2022).

Rodrigues *et al.* (2023) produziram painéis de partículas utilizando resíduos de *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, avaliando a substituição parcial da resina poliuretana derivada do óleo de mamona por resíduos de poliestireno como material ligante. Os autores observaram que a resina desempenha papel fundamental na resistência mecânica dos painéis, uma vez que o aumento da substituição por poliestireno resultou na redução dos valores de Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE).

Seibel *et al.* (2021) utilizaram a resina na produção de compósitos ecologicamente viáveis, contendo resíduo em pó de pneus de borracha e serragem de madeira, variando as proporções da resina. Com base nos resultados, o uso da resina se mostrou eficaz, de forma que o aumento do teor da resina propiciou a melhoria de propriedades físicas do compósito fabricado, como redução do inchamento e absorção de água e melhor estabilidade dimensional, por conta da interação mais forte entre resina e reforço.

Bertolini et al. (2019) utilizaram a resina na produção de compósitos contendo madeira tratada *Pinus* tratada. Os autores constataram que, ao aumentar a proporção da resina, foram observadas melhorias no compósito, como redução da absorção de água e aumento da resistência à tração.

Chen e Tai (2018) prepararam a resina usando poliol derivado do óleo da mamona e poliisocianato para produção de espumas de poliuretano reforçadas com bambu do tipo mossô (*Phyllostachys pubescens*) e pinhão chinês (*Unninghamia lanceolate*). Os autores concluíram que o compósito atingiu excelente estabilidade dimensional, performance mecânica e baixa densidade, sendo qualificado para uso como material de construção para interiores.

Varanda (2018) compararam o uso de resina poliuretana do óleo da mamona e resina melamínica (melamina formaldeído) na produção de painéis de madeira *Pinus elliottii* e *Avena sativa* e destacaram que, embora ambas as resinas tenham atingido desempenho satisfatório, o uso da resina poliuretana, em comparação à resina melamínica, teve influência mais positiva em relação às propriedades físicas do painel.

Fiorelli (2012) compararam o uso dessa resina com a resina ureia-formaldeído na produção de painéis com fibra de coco, e constataram que os painéis com a resina poliuretana obtiveram melhores resultados (como menor absorção de água e maior resistência à flexão). Os autores justificaram que houve maior penetração da resina do tipo poliuretana nas lacunas presentes entre as fibras, o que permitiu maior interação fibra e resina e, consequentemente, melhor rendimento das propriedades físico-mecânicas.

3.6.2 Influências das proporções NCO/OH em poliuretanos derivados de óleo vegetal

A proporção entre pré-polímero isocianato-terminado e poliol vegetal constitui um fator determinante nas propriedades físicas e mecânicas de painéis de média densidade produzidos com matriz poliuretânica derivada de óleos vegetais e reforçados com resíduos lignocelulósicos.

Essa relação, expressa como proporção pré-polímero:poliol (massa/massa) ou como razão molar NCO/OH, governa diretamente a densidade de reticulação da matriz polimérica, a qualidade da interface matriz-reforço e, consequentemente, o desempenho mecânico do compósito final.

A resistência à flexão e a resistência ao cisalhamento são propriedades críticas em painéis MDF, sendo fortemente influenciadas pela proporção entre pré-polímero e poliol. Nesse contexto, Cerchiari (2013) investigou cinco diferentes razões molares NCO/OH (0,6:1; 1,0:1; 1,4:1; 1,8:1 e 2,2:1) utilizando adesivo poliuretânico de mamona comercial na manufatura de Madeira Laminada Colada (MLC). Os resultados indicaram que a melhor resistência mecânica foi obtida na proporção de 1,8:1, evidenciando que o aumento da razão NCO/OH tende a incrementar a resistência mecânica até um ponto ótimo. Após esse limite, o excesso de grupos isocianato pode favorecer a formação de estruturas mais rígidas e suscetíveis à fragilidade do material.

Patel *et al.* (2009) demonstraram que a razão NCO/OH de 1,5:1 é ótima para adesivos de poliuretano à base de mamona, enquanto razões superiores a 2,0:1 aumentam excessivamente a densidade de reticulação, reduzindo a adesão devido à rigidez excessiva do polímero.

De forma complementar, Peres *et al.* (2023) desenvolveram adesivos poliuretânicos a partir de uma mistura simples de óleo de mamona e glicerina bruta em diferentes proporções (2:1, 3:1 e 4:1), reagindo com p-MDI em índice de isocianato constante de 1,3:1. Os resultados demonstraram que a proporção 2:1 promoveu a maior resistência ao cisalhamento em juntas madeira-madeira, provavelmente devido à maior formação de ligações de uretana entre os grupos hidroxila presentes na mistura de polióis e os grupos isocianato do p-MDI. O estudo evidenciou ainda a viabilidade de formulações simplificadas de poliuretano para aplicações em adesivos estruturais destinados à madeira.

A densidade de reticulação da matriz poliuretana, assim como suas propriedades térmicas e mecânicas, está diretamente modulada pela razão NCO/OH, afetando a rigidez, a estabilidade dimensional e a capacidade de deformação do material.

Hong *et al.* (2025), que otimizaram o desempenho mecânico de poliuretanos à base de TDI por meio de delineamento ortogonal e metodologia de superfície de resposta, variando a razão NCO/OH (R-value) em 1,0:1; 1,2:1; 1,4:1 e 1,6:1. Os autores verificaram que a tensão na ruptura aumenta com o incremento da razão NCO/OH, enquanto o alongamento na ruptura diminui, confirmando a influência direta da densidade de reticulação nas propriedades mecânicas do poliuretano. Além disso, análises espectroscópicas por FTIR e Raman demonstraram que a razão NCO/OH governa a extensão da reação entre

grupos isocianato e hidroxila, sendo um fator crucial na formação da rede polimérica e no desempenho final do material.

Resultados semelhantes foram reportados por Rathika e David (2016), que avaliaram o efeito do aumento da razão molar NCO/OH de 1,6:1 para 2,0:1 em pré-polímeros derivados de óleo de mamona e observaram que o incremento da razão elevou a resistência à tração de 1,49 MPa para 2,07 MPa, enquanto o alongamento na ruptura foi reduzido de 115% para 86%, evidenciando o compromisso existente entre rigidez e ductilidade. Esses resultados indicam que o aumento da densidade de reticulação tende a produzir matrizes mais resistentes, porém menos deformáveis, característica desejável em aplicações estruturais que exigem elevada rigidez.

Adicionalmente, Kong et al. (2011) caracterizaram adesivos poliuretanos derivados de óleo de canola, avaliando o efeito da razão NCO/OH e da temperatura de cura nas propriedades adesivas em madeira. Foram estudadas proporções de 1,2:1; 1,5:1 e 1,8:1, verificando-se que razões superiores a 1,5:1, associadas a temperaturas de cura de 100 °C, promoveram melhorias significativas nas propriedades de adesão da madeira, com resistência ao cisalhamento comparável ou superior à de adesivos comerciais. Esses resultados evidenciam que proporções mais elevadas de isocianato favorecem a formação de ligações covalentes adicionais na interface madeira-adesivo, aumentando a resistência mecânica do conjunto.

Dessa forma, entende-se que a variação da proporção entre pré-polímero e poliol representa um parâmetro fundamental no desenvolvimento de poliuretanos de origem vegetal aplicados em painéis compósitos, pois controla a densidade de reticulação da matriz, a interação química na interface fibra-matriz e as propriedades mecânicas e estruturais do material final.

4 Materiais e Métodos

4.1 Materiais

Os resíduos lignocelulósicos utilizados neste estudo foram obtidos a partir das sementes de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.), coletadas no município de Eirunepé, no estado do Amazonas, localizado a aproximadamente 1.159 km de Manaus. A coleta e o fornecimento do material foram viabilizados por meio de uma parceria com a Associação dos Trabalhadores Agroextrativistas de Eirunepé (ATAE).

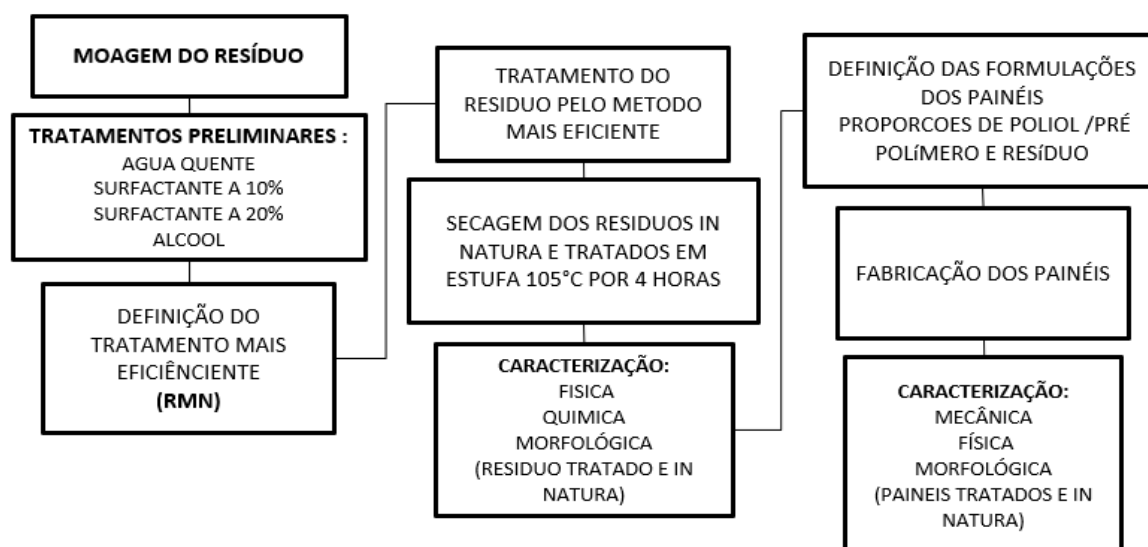
A resina polimérica utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa Imperveg Polímeros Indústria e Comércio Ltda., localizada em Aguaí-SP. O produto IMPERVEG AGT 1315 consiste em uma resina poliuretana de origem vegetal, derivada do óleo de mamona.

O material é disponibilizado na forma de sistema bicomponente, composto por um pré-polímero (componente A) e um polioli (componente B), cuja reação entre si promove a formação da matriz polimérica.

4.2 Métodos

A metodologia do estudo foi desenvolvida conforme apresentado de forma esquemática no fluxograma das etapas metodológicas (Figura 07).

Figura 7– Fluxograma das etapas metodológicas do estudo.



Fonte: Autor (2026).

Inicialmente, parte do resíduo lignocelulósico foi submetido a quatro rotas de tratamentos distintos, com o objetivo de identificar a técnica mais eficiente para remoção do óleo residual, visando melhorar aderência partícula-resina. A escolha do tratamento foi feita com base na comparação dos resultados de caracterizações dos resíduos tratados.

Com o tratamento devidamente escolhido, parte do resíduo foi tratado para uso na confecção dos painéis. Com isso, o resíduo foi separado em duas porções, sendo a primeira porção destinada à produção de cinco painéis de referência, utilizando o resíduo *in natura*, e a segunda porção sendo a que foi submetida ao tratamento selecionado, a qual também foi utilizada para a produção de cinco painéis.

Na etapa de produção dos painéis, estes foram confeccionados via prensagem térmica. Após o processo de cura, para os ensaios físicos-mecânicos, foram confeccionados os corpos de prova conforme os requisitos estabelecidos na norma ABNT NBR 14810-2:2018.

Os ensaios físicos designados foram a determinação do teor de umidade, inchamento em espessura e densidade aparente e a caracterização mecânica utilizada foi a flexão de três pontos. Essas caracterizações visaram comparar a performance do resíduo biomassa sem tratamento e tratado como reforços lignocelulósicos nos painéis, avaliando a eficácia do tratamento escolhido na melhoria da adesão partícula-resina e influência nas propriedades dos compósitos. Todos esses ensaios foram executados conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 14810-2:2018.

4.2.1 Tratamentos do resíduo de andiroba.

De acordo com Papadopoulos (2021), Santos *et al.* (2022), Missio *et al.* (2017), a presença de extrativos, especialmente compostos lipídicos, prejudica a adesão da resina na superfície das partículas do resíduo. Portanto, torna-se necessário reduzir ou eliminar essa concentração, uma vez que ela pode comprometer negativamente as propriedades mecânicas do compósito.

Com isso, com o intuito de reduzir o excesso de óleo presente nos resíduos de andiroba, foram avaliadas diferentes estratégias de tratamentos. Em primeiro momento, os resíduos foram submetidos a quatro rotas de tratamento,

visando a determinação da rota mais eficiente na redução do teor de óleo remanescente no resíduo: Lavagem com água quente, álcool e surfactante a 10 e 20%. Todas as amostras foram submetidas a secagem após seus respectivos tratamentos. A amostra de referência, denominada ST, corresponde ao resíduo *in natura*, mantido como controle.

Para a lavagem com água quente (AQ), 35 g de resíduo foram imersos em 350 g de água aquecida, sob agitação constante por 1 h, procedimento fundamentado na literatura que destaca o papel da água quente na solubilização parcial de hemiceluloses e na modificação da lignina, favorecendo a liberação de compostos oleosos (Khunchit *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2018).

No tratamento alcoólico (AL), 35 g de resíduo foram submersos em 250 mL de etanol, permanecendo em repouso por 48 h, permitindo a extração de compostos lipofílicos. Ao final, o sólido decantado foi separado, lavado com pequenas porções do próprio solvente e seco à temperatura ambiente. Em todos os tratamentos, os resíduos foram posteriormente filtrados e secos para padronização da matéria-prima utilizada nas etapas subsequentes.

Os tratamentos com surfactante (detergente neutro) foram realizados em duas concentrações. Na amostra AD-10, 35 g de resíduo foram lavados com 315 g de água quente contendo 10% de surfactante (m/m), mantidos sob agitação por 1 h. Para a amostra AD-20, utilizou-se 280 g de água quente com 20% de detergente. Em ambos os casos, após a lavagem, os resíduos foram enxaguados em água corrente, filtrados e secos. A presença de detergente nestes tratamentos visa potencializar a remoção de lipídios por meio de emulsificação e dispersão dos componentes hidrofóbicos (Almeida *et al.*, 2018).

A Tabela 1 descreve as amostras preparadas para investigação da estimativa do teor de óleo residual de andiroba.

Tabela 1 – Condições experimentais empregadas nos tratamentos aplicados aos resíduos de extração do óleo de andiroba, incluindo massa utilizada, composição das soluções e tempo de processamento.

Amostra	massa inicial (g)	Composição das soluções de lavagem	Tempo de Processamento
ST	35	Sem tratamento	-
AQ	35	350 g de água quente	1h (sob agitação constante)
AD-10	35	350 gramas de solução aquosa e surfactante a 10% (315 g/água + 35g/ detergente neutro)	1h (sob agitação constante)
AD-20	35	350 gramas de solução aquosa e surfactante a 20% (280 g/água + 70g detergente neutro)	1h (sob agitação constante)
AL	35	250 ml de álcool	48h em repouso (OBS: Procedimento foi repetido por três vezes).

Fonte: Autor (2026)

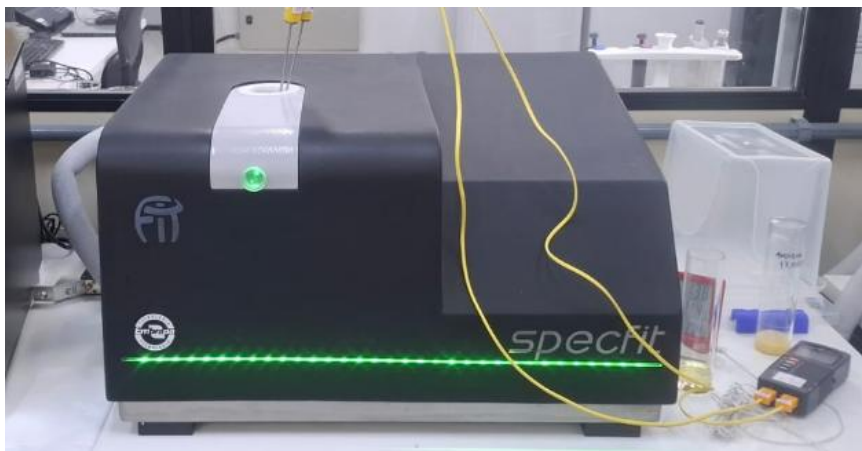
Após os tratamentos realizados nos resíduos, as amostras foram encaminhadas para serem analisadas por ressonância magnética nuclear de baixo campo (TD-NMR), com o intuito de quantificar o percentual de óleo de andiroba presente nos resíduos e verificar a efetividade do tratamento na remoção desse conteúdo lipídico residual, por meio da identificação de possíveis alterações na composição química superficial.

Vuković e Tišma (2024) revisaram as aplicações de RMN em biomassa lignocelulósica, destacando a TD-NMR de baixo campo como uma ferramenta poderosa para avaliar a composição e a mobilidade de lipídios e outros componentes em biomateriais complexos, apoiando seu uso para monitorar o óleo residual em resíduos agroindustriais.

Ribeiro et al. (2021) validaram a TD-NMR como um método rápido e confiável para quantificar diretamente o teor de óleo em castanhas-do-pará e na torta residual, demonstrando que frações lipídicas significativas podem permanecer em resíduos sólidos após a extração.

O experimento foi realizado em um espectrômetro SpecFIT (Fine Instrument Technology (FIT), equipado com um ímã permanente de 0,33 T e uma sonda de 40 mm de diâmetro, conforme mostra a Figura 8. Os dados foram adquiridos por sequência de pulsos spin-eco com 32 varreduras, comprimento de pulso de 90° de 14,0 μ s, tempo morto de 20,0 μ s, τ_1 de 54.65 μ s com tempo de aquisição iniciado em 1368.66 μ s. O ensaio foi realizado no laboratório NMRLab, da Central Analítica da UFAM.

Figura 8: Equipamento de RMN de baixo campo.



Fonte: Autor (2026)

4.2.2 Caracterizações do resíduo

4.2.2.1 Determinação do teor de Umidade

O teor de umidade foi determinado por meio de um analisador de umidade Ohaus, modelo MB 35, operando em modo automático, no Laboratório de Materiais Amazônicos e Compósitos (LAMAC) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). O equipamento utilizado apresenta precisão de leitura de duas casas decimais, o que corresponde a uma precisão de 0,01 % para o teor de umidade. A análise foi realizada em triplicata para as fibras tratadas e não tratadas.

4.2.2.2 Determinação da densidade aparente

A determinação dessa propriedade é essencial para o cálculo da densidade dos painéis compósitos, permitindo o ajuste do molde com volume de contenção igual ou próximo ao determinado, de modo a assegurar a adequada compactação da mistura resíduo-resina durante a fabricação.

A densidade aparente dos resíduos foi determinada pelo método volumétrico, utilizando-se uma proveta graduada de 1 L previamente tarada em balança de 5 kg com resolução de 10mg (0,1g). O resíduo em forma de pó foi adicionado até

o volume de 1 L, sem qualquer tipo de compactação, preservando sua condição natural de empacotamento, sendo então registrada a massa correspondente. O procedimento foi realizado para o resíduo biomassa sem tratamento e tratada, em condições idênticas, e a densidade aparente foi obtida pela razão entre massa e volume, expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 (Figura 9).

Figura 9 – Mensuração da densidade do resíduo.



Fonte: Autor (2026)

4.2.2.3 Distribuição granulométrica dos resíduos

Para a determinação da distribuição granulométrica do resíduo proveniente da extração do óleo de andiroba, foram utilizadas peneiras com aberturas de 20, 28, 48, 60, 80, 150 e 200 mesh (série Tyler), conforme ilustrado nas Figuras 10a e 10b.

Figura 10 – a) Peneiras granulométricas da série Tyler; b) Peneiramento manual dos resíduos.

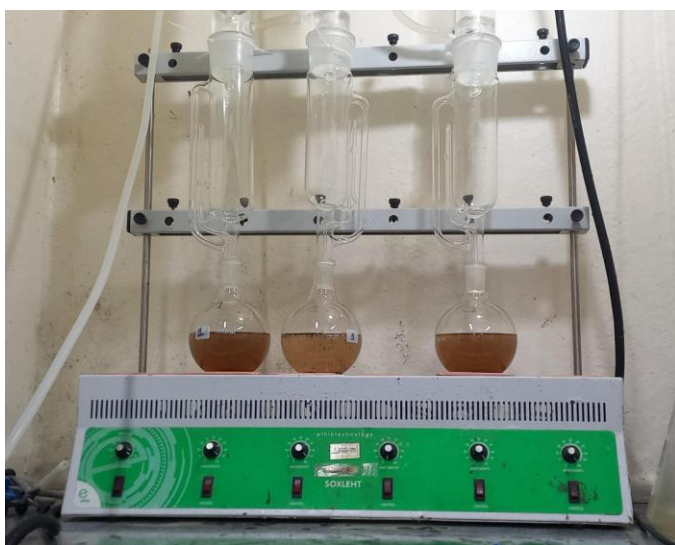


Fonte: Autor (2026)

4.2.2.4 Determinação do teor de extrativos dos resíduos

O ensaio de determinação de teor de extrativos dos resíduos biomassa sem tratamento e tratada com a técnica escolhida (Figura 11) foi aplicado para avaliar a eficácia do tratamento na retirada dos extrativos da superfície do material, como ceras, componentes lipídicos e demais componentes não-celulósicos. Esse ensaio foi executado com base nas diretrizes da TAPPI T204 cm-17.

Figura 11– Sistema de refluxo utilizado para determinação do teor de extrativos.



Fonte: Autor (2026)

Uma alíquota de 150 ml da solução foi transferida para um balão de fundo chato de 250 ml, o qual foi acoplado a um extrator do tipo Soxhlet. No interior do extrator, foi inserido um cartucho de papel contendo aproximadamente 8 g de amostra de material vegetal seco. O sistema foi submetido ao aquecimento, permanecendo em refluxo por 25 ciclos, conforme ilustrado na Figura 11.

Ao término da extração, o resíduo obtido foi transferido para estufa e mantido a 80 ± 5 °C por 24 horas. Posteriormente, a amostra foi acondicionada em dessecador por 30 minutos e, em seguida, pesada até atingir massa constante.

O ensaio foi realizado em triplicata e o teor de extrativo (%) calculado de acordo com a Equação 1.

$$D = \frac{m1 - m2}{m1} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

(%) T = Teor de extrativos

m1= massa da amostra seca antes da extração

m2= massa da amostra seca após a extração

4.2.2.5 Determinação do teor de lignina dos resíduos

O teor de lignina foi determinado com base na norma TAPPI T 222 om-02 (2002), com adaptações. Inicialmente, aproximadamente 1 g de amostra foi macerado em gral, ao qual se adicionaram 17 ml de ácido sulfúrico concentrado (72% m/m), promovendo a completa solubilização do material. Em seguida, a mistura permaneceu em repouso por um período de 2 horas.

Após essa etapa, a amostra foi transferida para um balão volumétrico de 1 L, sendo adicionados 600 ml de água destilada para promover a diluição do ácido. O sistema foi então submetido à hidrólise em banho fervente por 4 horas, contadas a partir do início da ebulição.

Concluída a hidrólise, o material foi filtrado em cadinho de vidro sinterizado previamente tarado, utilizando sistema de filtração a vácuo com kitassato. O resíduo retido foi lavado com água destilada até que o pH se aproximasse ao da água de lavagem.

Posteriormente, a amostra foi submetida à secagem em estufa a 80 ± 5 °C por 24 horas. Após esse período, foi acondicionada em dessecador e pesada até a obtenção de massa constante.

A análise foi realizada em triplicata e de acordo com a Equação 2.

$$\% \text{ lignina} = \frac{m1}{m1} \cdot 100 \quad (2)$$

Sendo:

% lignina = Teor de lignina;

m1 = massa (g) da lignina insolúvel seca;

m2 = massa (g) da amostra inicial.

4.2.2.6 Determinação do teor de holocelulose dos resíduos

O teor de holocelulose foi determinado com base na norma TAPPI T 19m-54, com adaptações. Inicialmente, foram adicionados 3 g de amostra previamente seca e livre de extrativos em um erlenmeyer de 500 ml, juntamente com 120 ml de água destilada, 1 ml de ácido acético glacial e 2,5 g de clorito de sódio. A mistura foi mantida em banho-maria a 70 °C.

Após 1 hora de reação, procedeu-se à adição de mais 1 ml de ácido acético glacial e 2,5 g de clorito de sódio, sendo essa etapa repetida em intervalos de 1 hora. Ao final de 3 horas, a amostra foi resfriada em banho de gelo até atingir aproximadamente 10 °C.

Em seguida, o material foi filtrado em cadinho de vidro sinterizado e lavado com água destilada até que o pH do filtrado se aproximasse ao da água utilizada. Posteriormente, realizou-se a lavagem com 20 ml de acetona. Por fim, a amostra foi seca em estufa a 105 ± 2 °C até a obtenção de massa constante.

A análise em triplicata e calculada de acordo com a Equação 3.

$$\% \text{ holocelulose} = \frac{m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (3)$$

Sendo:

% holocelulose = Teor de holocelulose;

Mf = Massa final da amostra seca em estufa;

Mi = Massa inicial da amostra do material vegetal.

4.2.2.7 Determinação do teor de α-celulose dos resíduos

O teor de α-celulose representa o percentual de celulose cristalina presente no interior do resíduo. Este ensaio foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Moraes et al. (2010).

Para esse ensaio, 1 g de holocelulose seca foi adicionada a almofariz e adicionado 15 ml de NaOH 17,5% (m/v). Após 2 minutos de espera a mistura foi triturada com auxílio de um pistilo por 8 minutos. Adicionou-se 40 ml de água destilada e o material foi transferido para o cadinho de vidro sinterizado e filtrado até pH igual

ao da água utilizada e colocado em estufa a 105 ± 5 °C por período de 24h, posteriormente em dessecador e pesado até massa constante.

O ensaio foi realizado em triplicata e determinado o teor de celulose de acordo com a Equação 4.

$$D = \frac{mFc - mf}{mAH} \cdot 100 \quad (4)$$

Sendo:

α -celulose (%) = Teor de alfacelulose;

mFc = Massa do cadinho seca + holocelulose;

mF = Massa do cadinho seco;

mAH = massa da amostra.

4.2.3 Fabricação dos Painéis

Com o objetivo de avaliar a influência da formulação da matriz polimérica no desempenho dos compósitos, associada ao efeito do tratamento da biomassa, foram estudadas cinco razões polioli/polímero (1:1,2; 1:1; 1,2:1; 1,4:1 e 1,6:1). Para cada formulação, foram produzidos painéis utilizando biomassa tratada e biomassa sem tratamento.

As proporções adotadas foram definidas com base nos estudos de Aparício *et al.* (2024), Cerchiari (2013) e Kong *et al.* (2011). A razão poliolié-polímero foi considerada uma variável do estudo por controlar a formação da rede poliuretânica e influenciar diretamente propriedades como grau de reticulação, rigidez e adesão entre matriz e reforço, em função da disponibilidade relativa de grupos NCO e OH (Carvalho, 2023).

As massas de polioli e pré-polímero correspondentes a cada formulação foram calculadas de modo a garantir o controle estequiométrico da reação, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Proporções de polioli (POL) e pré-polímero (PP) utilizadas na fabricação dos painéis, considerando tanto as formulações com resíduo tratado quanto sem tratamento.

Formula- ção	PP:POL	PP (g)	POL (g)	Resíduo (g)
1	1,0: 1,0	138,70	166,44	711,99
2	1,0: 1,2	152,57	152,57	711,99
3	1,2: 1,0	166,44	138,70	711,99
4	1,4: 1,0	178,00	127,14	711,99
5	1,6: 1,0	187,78	117,36	711,99

Fonte: Autor (2026)

A composição global dos compósitos foi mantida constante na proporção 70/30 (biomassa/resina). A adoção de 30% de resina foi definida com base em testes preliminares, nos quais formulações contendo 15% e 20% de resina não apresentaram resistência mecânica e estabilidade dimensional suficientes para permitir a obtenção dos corpos de prova dos painéis produzidos com biomassa sem tratamento. Ao todo, foram produzidos dez painéis experimentais, correspondentes às cinco razões poliál/polímero avaliadas para duas condições de biomassa: tratada e sem tratamento.

A Figura 12 apresenta as principais etapas do processo de fabricação dos painéis, incluindo a incorporação da resina à biomassa, a distribuição da mistura no molde, o nivelamento do material, o fechamento do molde, a prensagem, a desmoldagem e a obtenção do painel final.

Figura 12 – (a) Mistura da resina ao resíduo; (b) dispersão da mistura no molde; (c) nivelamento do material; (d) fechamento do molde; (e) prensagem; (f) extração da placa; (g) painel finalizado.



Fonte: Autor (2026)

Após a definição das massas correspondentes a cada formulação, os componentes da resina foram pesados e acondicionados em recipientes individuais. A biomassa utilizada na produção dos painéis foi previamente seca, apresentando teor de umidade entre 1,36% e 1,47%.

Inicialmente, realizou-se a homogeneização do poliol por aproximadamente 7,5 minutos. Em seguida, adicionou-se o pré-polímero, mantendo-se a mistura pelo mesmo período. Posteriormente, a biomassa foi incorporada ao sistema e homogeneizada até a obtenção de uma distribuição uniforme das partículas na matriz polimérica.

A mistura foi então transferida para um molde metálico e submetida à prensagem a quente a 100 °C, sob pressão de 5 MPa, durante 20 minutos.

Após a prensagem, os painéis permaneceram em repouso por 72 horas à temperatura ambiente, permitindo a cura completa da resina e a estabilização dimensional do material.

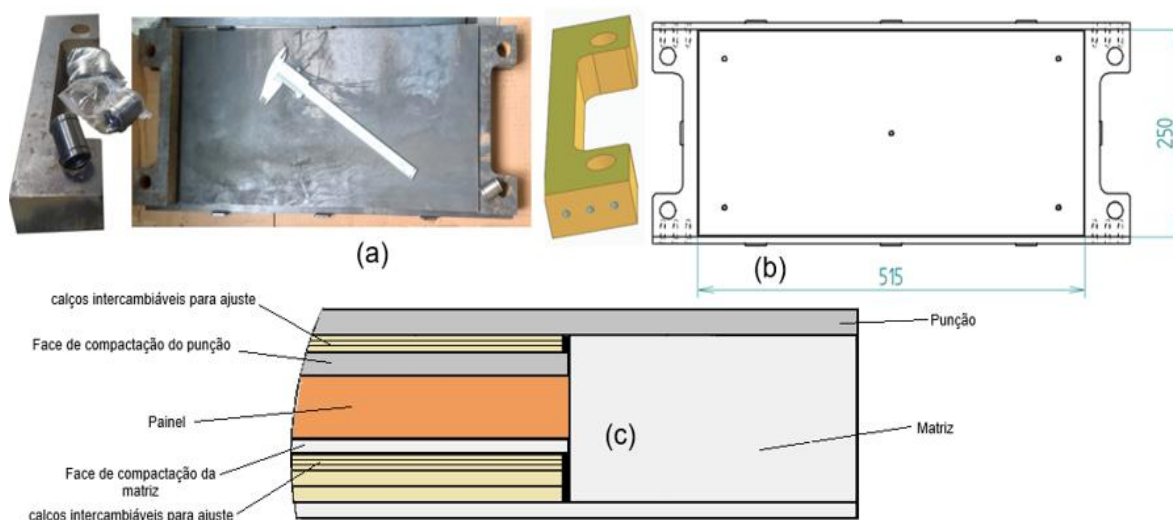
Concluída a etapa de cura, os painéis foram seccionados perpendicularmente ao seu comprimento para obtenção dos corpos de prova destinados aos ensaios de flexão, conforme as dimensões estabelecidas pela ABNT NBR 14810:2018. Cada painel forneceu nove corpos de prova, preservando-se a rastreabilidade entre formulação, condição da biomassa e identificação das amostras.

4.2.3.1 Taxa de compactação e molde utilizado

Para a confecção dos painéis, foi desenvolvido um molde em aço para produção de painéis nas dimensões de 250x515 com ajuste na espessura para controle da taxa de compactação (Figura 13), no qual a redistribuição de calços entre a matriz e o punção permite controlar o volume inicial do resíduo e a profundidade de compactação, possibilitando determinar a taxa de compactação necessária para atingir a densidade desejada dos painéis.

Para atingir uma densidade final compatível com os valores normativos, o molde foi ajustado de modo a promover uma razão de compactação de 1,44, valor inserido na faixa clássica recomendada na literatura. A razão de compactação constitui um parâmetro fundamental na produção de painéis aglomerados, estando diretamente relacionada ao grau de contato entre partículas e à eficiência da ligação interna. Estudos clássicos e contemporâneos indicam que valores na faixa de 1,3 a 1,6 são ideais para garantir adequada densificação e consolidação do painel (Kelly, 1977; Taquetti et al., 2023).

Figura 13 – (a) Molde em montagem, (b) Projeto e construção do ferramental, (c) Estrutura do molde



Fonte: Autor (2026)

De modo geral, observa-se que o aumento da razão de compactação tende a favorecer as propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), devido ao maior número de pontos de contato entre partículas (Pham Van et al., 2019), enquanto valores muito baixos comprometem a formação de ligações internas eficientes (Pham, 2023).

Valores elevados de compactação promovem a geração de tensões internas durante a prensagem, cuja liberação posterior pode resultar em recuperação elástica do material e instabilidade dimensional (Bavaneghi; Ghorbani, 2015). Conforme estudos da literatura, o aumento na taxa de compactação dos painéis de partículas elevou o valor de MOR (Módulo de Ruptura), sendo que aqueles produzidos com partículas de cana-de-açúcar atenderam aos padrões (Brito et al., 2020; Liao et al., 2016). Além disso, o aumento na taxa de compactação dos painéis de partículas influenciou os valores do Módulo de Elasticidade (Brito et al., 2020).

Nesse contexto, a escolha de uma razão de compactação de 1,44 mostra-se tecnicamente adequada, por situar-se dentro da faixa considerada ótima pela literatura clássica e atual, garantindo um equilíbrio entre densificação, estabilidade dimensional e desempenho mecânico dos painéis.

4.2.4 Caracterizações Físicas dos Painéis

4.2.4.1 Determinação da Densidade Aparente

A determinação da densidade aparente foi realizada conforme os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 14810. Para isso, 10 corpos de prova retirados de cada tipo de painel foram aferidos a espessura de 10 mm, com o auxílio de um micrometro digital Mitutoyo com resolução de 0,001mm e largura e comprimento de 50mm com o paquímetro digital da marca *Carbografite* e resolução de 0,01 mm (Figura 14), enquanto a massa foi obtida utilizando uma balança analítica de precisão (Figura 15).

Figura 14 – Paquímetro carbografite e micrometro mitutoyo.



Fonte: Autor (2026)

Figura 15 – Balança Analítica Shumadzu modelo AUX220.



Fonte: Autor (2026)

A densidade aparente foi calculada com base na razão entre a massa e o volume do corpo de prova, conforme expressa a Equação (5):

$$D = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot e} \quad (5)$$

onde D é densidade aparente (g/cm^3), m é a massa do corpo de prova (g), b_1 é comprimento (cm), b_2 é a largura (cm) e e é a espessura (cm). Os resultados foram

expressos na unidade adequada conforme a padronização do experimento, permitindo a comparação entre os diferentes compósitos avaliados.

4.2.4.2 Determinação do Teor de umidade

Para a determinação de umidade, foi aferido em balança a massa úmida dos corpos de prova em temperatura ambiente. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante (Figura 16a), assegurando a remoção completa da umidade residual. Após a secagem, foram resfriadas em dessecador (Figura 16b) e pesadas em balança analítica para determinação da massa seca inicial (M_i).

Figura 16 – Determinação do Teor de umidade (a) Estufa para secagem das amostras; (b) Dessecador para estabilização das amostras.



Fonte: Autor (2026)

Após pesagem os corpos de prova foram então completamente imersos em água destilada a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas. Após esse período, foram retiradas da água, secas superficialmente com papel absorvente (sem pressionar), e novamente pesadas para obtenção da massa úmida (M_f). A absorção de água foi calculada com base na Equação (6):

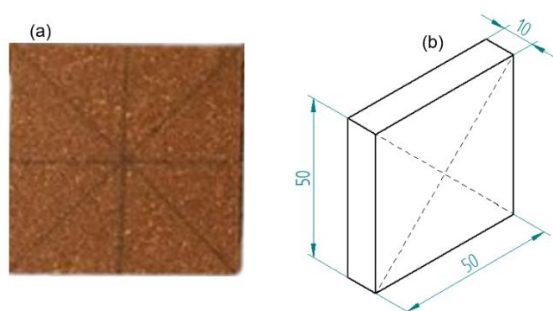
$$\text{Abs (\%)} = \left(\frac{M_f - M_i}{M_i} \right) \times 100 \quad (6)$$

onde, M_f é a massa final após imersão (g) e M_i é a massa seca inicial (g). Essas determinações foram fundamentais para avaliar a estabilidade dimensional e a resistência à umidade dos painéis produzidos.

4.2.4.3 Determinação do Teor de Inchamento em Espessura por 24 horas

A determinação do teor de inchamento (I) na espessura foi realizada utilizando corpos de prova com dimensões de 50x50x10 mm, conforme a norma ABNT NBR 14810-2. A espessura inicial (E_i) de cada amostra será medida em seu ponto central (Figura 17a e 17b).

Figura 17 – Corpo de prova com a marcação para aferição no ponto central e dimensões.



Fonte: Autor (2026)

Em seguida, as amostras foram totalmente imersas em água destilada a 20 ± 2 °C por um período de 24 horas (Figura 18). Após a imersão, as amostras foram retiradas, secas superficialmente com papel absorvente (sem aplicação de pressão), e a espessura final (E_f) foi então medida no mesmo ponto da medição inicial. O teor de inchamento na espessura foi calculado utilizando a Equação (7):

$$I(\%) = \left(\frac{E_f - E_i}{E_i} \right) \times 100 \quad (7)$$

onde, E_f é a espessura final após imersão (mm) e E_i é a espessura inicial (mm).

Figura 18 – Ensaio de absorção e inchamento em imersão por 24 horas.



Fonte: Autor (2026)

4.2.5 Caracterização Mecânica dos Painéis

A caracterização foi feita através do ensaio de flexão em três pontos. Os ensaios mecânicos foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio Mecânicos da Marca Oswaldo Filizola – AME-5kN, presente nas dependências do LaMAC – Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos. Os dados do ensaio foram coletados a partir do software DynaView ProM, a fim de determinar o Módulo de Flexão Estática e Módulo de Elasticidade dos painéis produzidos.

A confecção dos corpos de prova deu-se conforme os critérios estabelecidos pela norma NBR 14810-2:2018 (ABNT, 2018), que trata dos ensaios de flexão estática e do módulo de elasticidade em painéis de partículas. O comprimento dos corpos de prova foi calculado pela Equação (8):

$$\text{Comprimento} = 20 \times \text{Espessura} + 50 \text{ mm} \quad (8)$$

Com base na espessura final de 10 mm, o comprimento total foi de 290 mm. A largura será fixada em 50 mm, conforme especificado na norma. Dessa forma, foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 10 mm (espessura) × 50 mm (largura) × 259 mm (comprimento útil).

Foram preparados 10 corpos de prova para os ensaios mecânicos de cada tipo de painel, que foram seccionadas perpendicularmente ao seu comprimento, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Corpos de prova para ensaio mecânico (amostra T54 apresenta região fragilizada por falta de compactação).



Fonte: Autor (2026)

Inicialmente, foram selecionados corpos de prova provenientes dos painéis confeccionados com diferentes proporções entre polioli e pré-polímero. Para cada proporção, foram avaliados dois tipos de painéis considerando as seguintes nomenclaturas: T: painéis com resíduo tratado e ST: painéis com resíduo sem tratamento. Cada par de painel (T e ST) possui exatamente a mesma proporção entre polioli e pré-polímero, permitindo comparações diretas entre o efeito do tratamento no resíduo, mantendo constante a composição da resina.

Os corpos de provas foram posicionados na máquina de ensaio universal, submetidos ao carregamento em três pontos, e a curvas carga-deformação foram registradas automaticamente pelo sistema para cálculo do módulo de flexão estática. O ensaio é realizado conforme as normas ABNT NBR 14810, com adaptações específicas às dimensões dos corpos de prova utilizados conforme ilustra Figura 20.

Antes do experimento, foram medidas a espessura (e) e a largura (b) de cada corpo de prova. Posteriormente, os corpos de prova foram posicionados em uma máquina universal de ensaios, modelo AME-5KN, com capacidade de carga de até 500 kgf. O comprimento do vão (D) foi fixado em 290 mm, com o centro do corpo de prova devidamente alinhado ao ponto de aplicação da carga (P). O ensaio foi conduzido em velocidade constante, conforme parâmetros recomendados pela norma.

Figura 20 – Máquina Universal de Ensaios, para execução do ensaio de flexão



Fonte: Autor (2026)

Os valores de Resistência à Flexão Estática (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) são expressos em N/mm², calculados a partir das equações (9) e (10):

$$\text{MOR} = \frac{1,5 \times (P \times D)}{b \times e^2} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{MOE} = \frac{(P_1 \times D^3)}{4 \times b \times e^3 \times \text{def}} \times 100 \quad (10)$$

onde P é carga de ruptura (N), P_1 é a carga no limite proporcional (N), def é deflexão correspondente (mm), D é o vão entre os apoios (mm), b é a largura do corpo de prova (mm) e e é a espessura do corpo de prova (mm).

4.2.6 Caracterização Morfológica dos Painéis

A morfologia da superfície na fratura dos painéis foi avaliada por meio de micrografias obtidas via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As análises foram realizadas em microscópio eletrônico de alta resolução modelo JSM IT500-HR (JEOL). Para a preparação, as amostras foram fixadas em stubs utilizando fita de carbono e, posteriormente, submetidas à metalização. Os ensaios foram conduzidos no Centro Multiusuário para Análises de Fenômenos Biomédicos da Universidade do Estado do Amazonas (CMABio/UEA).

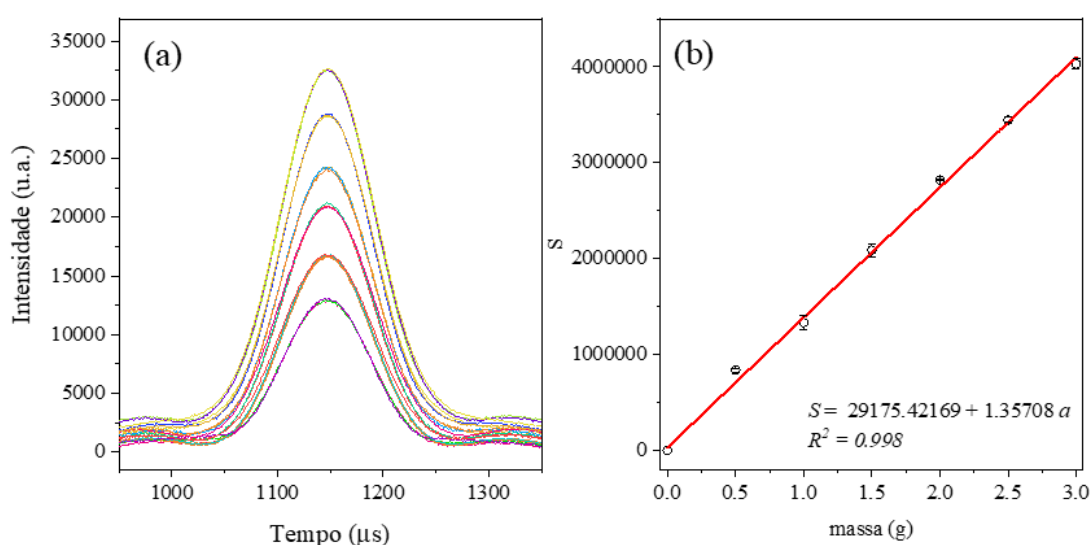
5 Resultados Obtidos

5.1 Caracterizações dos Resíduos

5.1.1 Determinação do teor de óleo residual no resíduo de andiroba

A partir dos espectros obtidos, foram geradas as curvas analíticas que permitiram determinar o teor de óleo remanescente (Figura 21).

Figura 21 – (a) Espectros RMN de baixo campo das amostras de óleo de andiroba. (b) Curva de calibração para a estimativa do percentual de massa de óleo de andiroba em resíduos tratados e não tratados.



Fonte: Autor (2026)

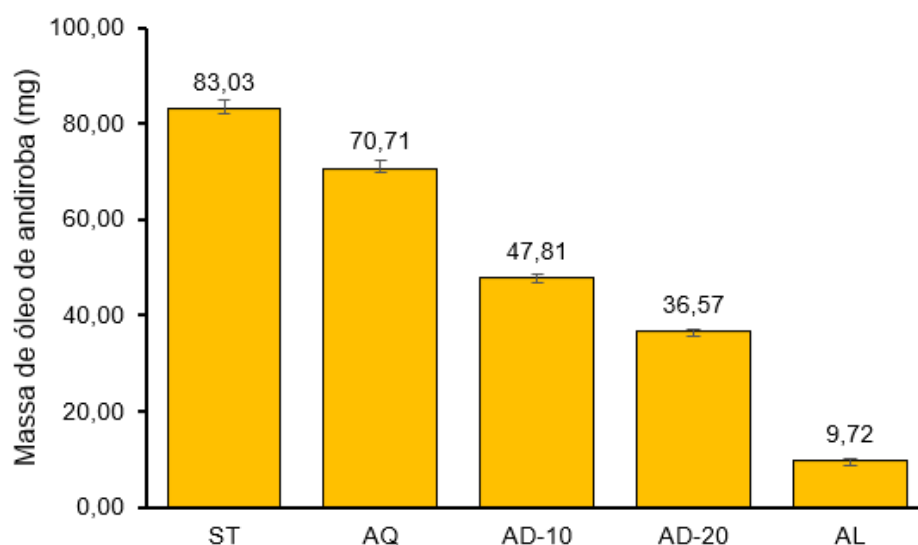
Conforme ilustrado na Figura 21(a), cada curva representa uma concentração de óleo baseada na área integrada dos sinais para cada massa conhecida de óleo. Cada ponto da curva corresponde à média de três réplicas independentes, tratadas individualmente na regressão linear, seguindo recomendações da literatura (Approach, 2021).

A Figura 21(b) apresenta a curva analítica utilizada para estimar o teor de óleo nos resíduos de andiroba, tanto tratados quanto *in natura*. Observa-se uma excelente correlação entre os valores experimentais e o modelo linear, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,998$.

A Figura 22 apresenta a estimativa da massa de óleo de andiroba presente em 15 g de cada resíduo, determinada por TD-NMR com base em uma curva de calibração. As barras de erro representam a média $\pm$ desvio-padrão obtida a partir de três réplicas.

Os resultados indicam o teor lipídico dos resíduos submetidos aos diferentes tratamentos: AQ (água quente), AD-10 (água + surfactante a 10%), AD-20 (água + surfactante a 20%) e AL (álcool). Observa-se que a amostra ST apresenta o maior teor de óleo, aproximadamente 83 mg (0,57% m/m), seguida da amostra AQ, com cerca de 70 mg (0,47% m/m). Os resíduos AD-10 e AD-20 apresentam valores intermediários, em torno de 48 mg e 36 mg, correspondendo a 0,32% e 0,24% m/m, respectivamente. Já a amostra AL apresenta o menor conteúdo lipídico, aproximadamente 10 mg, equivalente a 0,067% m/m.

Figura 22 – Estimativa da massa de óleo de andiroba (mg) presente em 15 g dos resíduos AD-10, AD-20, AQ, ST e AL, determinada por RMN de baixo campo.



Fonte: Autor (2026)

As barras de erro são reduzidas, sugerindo boa repetibilidade, e a diferença entre o maior e o menor valor é de aproximadamente oito vezes, evidenciando variação relevante entre os tipos de resíduo. Esses resultados mostram que os resíduos apresentam significativos valores de teores de óleo de andiroba, mesmo após extração.

Em termos percentuais, em relação à amostra ST, os tratamentos com surfactante AD-10 e AD-20 obtiveram uma redução de 42,42 e 55,95%,

respectivamente. Por outro lado, o tratamento por água quente obteve uma redução de apenas 14,83%. Já o tratamento por álcool apresentou o maior percentual de remoção, com uma redução de 88,3%.

Pode-se afirmar que os diferentes tratamentos aplicados ao resíduo de andiroba resultaram em variações significativas no teor residual de óleo. Embora o tratamento com álcool tenha apresentado a menor concentração de óleo residual, sua utilização foi descartada devido a limitações operacionais em escala laboratorial, uma vez que não seria viável tratar, de forma contínua e reproduzível em laboratório, a quantidade de resíduo necessária para a fabricação dos painéis. Essa limitação comprometeria a padronização do processo e a consistência dos resultados ao longo das etapas de produção. Dessa forma, ao considerar simultaneamente a eficiência de remoção e a viabilidade de execução prática, o tratamento com surfactante a 20% (AD-20) se mostra mais adequado, por apresentar baixa concentração residual de óleo e maior compatibilidade com a condução experimental em condições laboratoriais controladas.

Com isso, todas as caracterizações posteriores de resíduo tratado, bem como os painéis confeccionados com resíduo tratado nesse estudo e suas respectivas caracterizações, utilizaram apenas o tratamento com 20% de surfactante, para otimização do processo. Nesse sentido, estudos sobre o uso de fibras vegetais em compósitos poliméricos destacam a importância da remoção de impurezas superficiais e de extrativos, como ceras e óleos, presentes em materiais lignocelulósicos (Papadopoulos, 2021; Santos *et al.*, 2022). A presença desses compostos pode comprometer a molhabilidade e a adesão interfacial, influenciando negativamente as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.

No presente estudo, observou-se que o maior teor de óleo no resíduo, como verificado na amostra ST, pode atuar como uma barreira à adesão entre as partículas e a matriz, resultando em menores valores de módulo de elasticidade e resistência à flexão. Por outro lado, resíduos submetidos a tratamentos mais eficientes, com menor conteúdo lipídico, tendem a apresentar superfícies mais limpas e maior disponibilidade de grupos polares, favorecendo a interação interfacial. Esses efeitos contribuem para uma melhor transferência de tensões entre matriz e reforço, resultando em materiais mais rígidos e resistentes.

Além disso, os tratamentos promovem alterações na rugosidade superficial, o que também favorece o ancoramento mecânico e o desempenho global do compósito (Missio *et al.*, 2017; Tran *et al.*, 2019).

5.1.2 Teor de umidade dos resíduos da extração do óleo de andiroba

Antes da utilização na fabricação dos painéis compósitos, os resíduos de andiroba (ST e AD-20) foram submetidos a um processo de secagem. A material biomassa sem tratamento apresentou teor de umidade inicial de 10,67%, valor típico de biomateriais recém-coletados, ainda contendo umidade adsorvida. Após a secagem, ambos os materiais atingiram teores de umidade praticamente similares, em torno de 1,44%, sendo posteriormente acondicionados em recipientes hermeticamente fechados até o momento da produção dos painéis. Essa uniformização foi fundamental para garantir condições equivalentes na etapa de mistura com a resina poliuretana, minimizando interferências no processo de cura e nas propriedades finais dos compósitos.

Teores elevados de umidade favorecem a geração de vapor e o aumento da pressão interna durante a prensagem a quente, podendo comprometer a integridade do painel (Murayama *et al.*, 2021). Nesse contexto, a literatura indica que teores de umidade na faixa de aproximadamente 3–6% são adequados para a produção de painéis lignocelulósicos, pois contribuem para o equilíbrio entre processamento e desempenho do material (Zhao; Umemura, 2014). Assim, o valor obtido neste estudo (~1,44%) encontra-se significativamente abaixo desse intervalo, contribuindo para maior controle da pressão de vapor e redução da ocorrência de defeitos.

A presença de umidade é um fator crítico em sistemas à base de poliuretano, pois a água pode reagir com grupos isocianato, formando ligações ureia e liberando dióxido de carbono. Essa reação competitiva altera a estequiometria do sistema e pode resultar na formação de bolhas, poros ou defeitos estruturais, comprometendo a integridade do compósito. Nesse sentido, (Rolph *et al.*, 2016) destacam a elevada sensibilidade dos isocianatos à umidade, evidenciando que a presença de água pode interferir significativamente na formação da rede polimérica.

Além disso, em materiais lignocelulósicos, a umidade influencia diretamente propriedades interfaciais e estruturais. Variações no teor de água afetam a molhabilidade, a energia superficial e o comportamento reológico do sistema, podendo

impactar a adesão entre matriz e reforço (Mazzanti; Mollica; Kissi, 2015). Segundo Téraube *et al.*, (2025), a absorção de água por fibras ricas em grupos hidroxila aumenta sua polaridade e altera os ângulos de contato, modificando a interação com matrizes poliméricas. De forma complementar, (BOEY *et al.*, 2022) relatam que ciclos de sorção e dessorção promovem intumescimento e retração das fibras, podendo gerar microfissuras.

Dessa forma, o teor de umidade baixo pode ter sido um dos fatores que cooperaram com os resultados tanto no tratamento como no sem tratamento em decorrência variações do poliol e pré polímero.

5.1.3 Densidade aparente dos resíduos de andiroba

A mensuração da densidade aparente do resíduo utilizado como reforço no compósito foi avaliada na condição *biomassa sem tratamento* (ST) e na condição tratada (AD-20), após procedimento específico de preparação superficial descrito em metodologia. A densidade aparente de cada amostra foi determinada utilizando o método da proveta graduada, associado a uma balança de precisão para obtenção da massa do material introduzido no recipiente. Todas as medidas foram realizadas em tréplica, resultando nos seguintes valores médios dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Densidade aparente para os resíduos de andiroba.

Amostra	Densidade aparente (g/cm ³)
ST	0,51 ± 0,03
AD-20	0,45 ± 0,02

Fonte: Autor (2026).

A avaliação da densidade aparente dos resíduos de andiroba *biomassa sem tratamento* e tratado forneceu informações relevantes acerca da organização estrutural, do empacotamento das partículas e dos efeitos do tratamento químico na morfologia do material.

Os resultados indicam que o tratamento com 20% de surfactante promoveu modificações na morfologia do resíduo, evidenciadas tanto pela variação da densidade aparente quanto pelo deslocamento da distribuição granulométrica. Essas alterações refletem mudanças na organização física e na composição do material, influenciando diretamente seu comportamento no processamento e no desempenho final dos compósitos.

Na fabricação dos compósitos, com base nesses resultados, optou-se por manter constantes as massas de resíduo e de resina, independentemente das variações na densidade dos constituintes. Dessa forma, alterações na densidade do resíduo e eventuais variações na densidade da resina resultaram em mudanças no volume ocupado por cada componente, impactando diretamente na taxa de compactação do compósito.

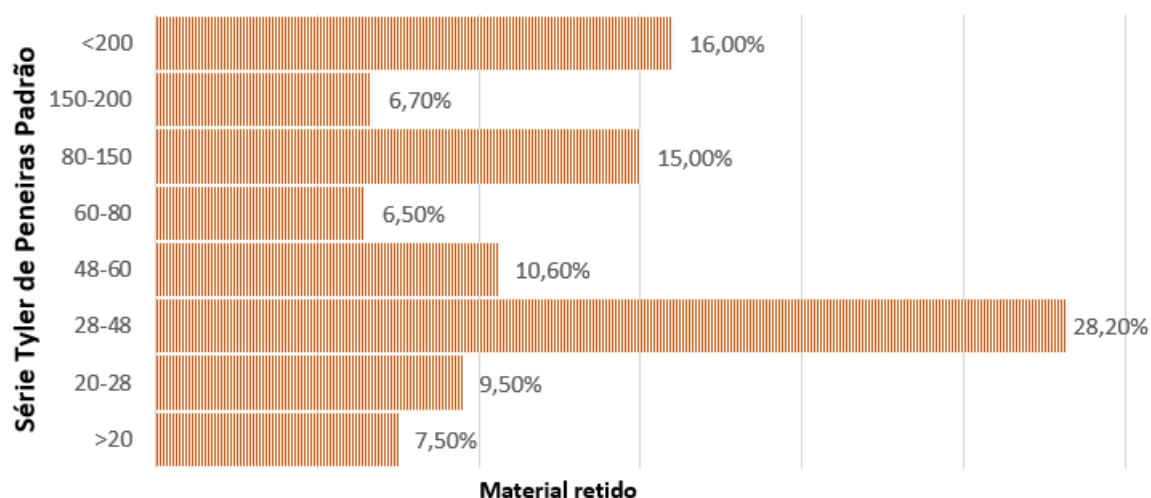
Portanto, a análise integrada dos parâmetros físicos demonstra que o tratamento não apenas altera a composição química do resíduo, mas também sua estrutura e comportamento no processamento, reforçando a importância de considerar, de forma conjunta, a densidade aparente, a granulometria e a proporção matriz/reforço na avaliação do desempenho de compósitos poliméricos reforçados com resíduos lignocelulósicos.

5.1.4 Distribuição granulométrica dos resíduos

A distribuição granulométrica dos resíduos de andiroba ST e AD-20 evidencia o impacto do tratamento superficial na organização física do material, com implicações diretas no processamento e no desempenho dos compósitos.

Conforme apresentado na Figura 23, o resíduo ST apresenta predominância de partículas na faixa de 28–48 mesh (~30%), associada a frações finas relevantes (80–150 mesh e <200 mesh, com cerca de 14–16%). Esse perfil caracteriza um material de granulometria intermediária com contribuição significativa de partículas finas, típico de resíduos lignocelulósicos heterogêneos e fibrosos, nos quais a combinação de fibras, fragmentos e material pulverulento resulta em ampla distribuição de tamanhos (Yang; Ching; Chuah, 2019).

Figura 23; Distribuição granulométrica do resíduo biomassa sem tratamento (ST) após peneiramento utilizando peneiras série Tyler.

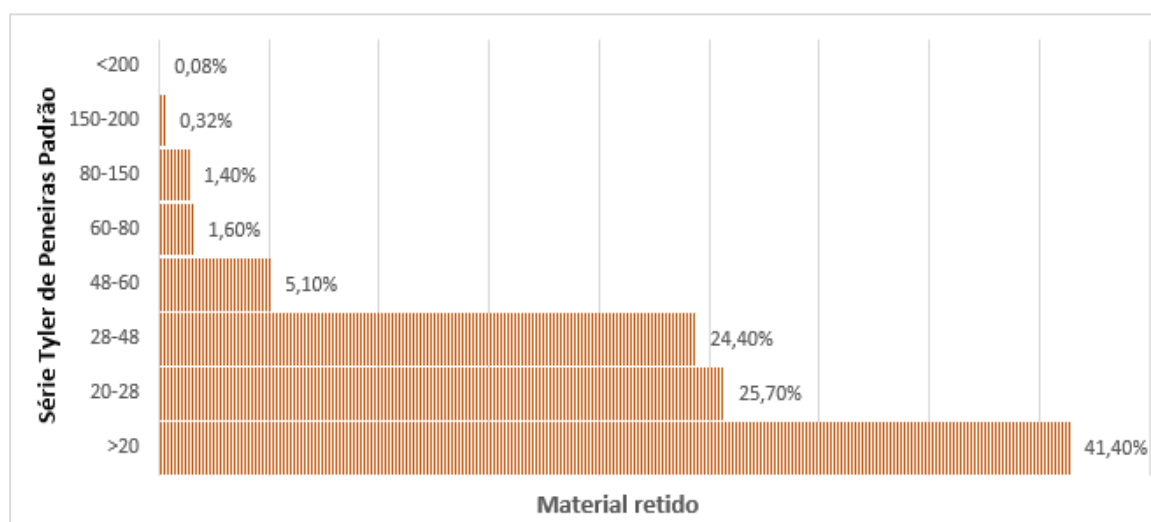


Fonte: Autor (2026).

A presença expressiva de partículas finas aumenta a área superficial específica, favorecendo a adesão interfacial e a transferência de tensões. No entanto, essa característica também eleva a viscosidade da mistura durante a homogeneização, dificulta o escoamento e aumenta a tendência à formação de aglomerados. Além disso, considerando uma quantidade fixa de resina, o aumento da área superficial reduz a disponibilidade de matriz por unidade de área, podendo comprometer o recobrimento adequado das partículas e a eficiência da interface resíduo–matriz (Hubbe; Grigsby, 2020).

Já na Figura 24, observa-se que o resíduo tratado AD-20 apresenta predominância de partículas grossas e intermediárias, com 41,40% acima de 20 mesh e frações expressivas nas faixas de 20–28 mesh e 28–48 mesh. As frações finas tornam-se residuais, inferiores a 2% em cada classe. Esse deslocamento da distribuição granulométrica sugere que o tratamento promove alterações morfológicas e estruturais, possivelmente associadas à redução do fracionamento em partículas finas e à remoção de extrativos.

Figura 24; Distribuição granulométrica do resíduo tratado (AD-20) que foi passado pela série Tyler de peneiras padrão.



Fonte: Autor (2026).

Do ponto de vista do processamento, a predominância de partículas maiores contribui para a redução da viscosidade do sistema, facilitando a homogeneização com a resina poliuretana. A menor área superficial específica aumenta a disponibilidade de matriz por unidade de área, favorecendo o recobrimento das partículas e a molhabilidade, o que pode resultar em melhor eficiência de adesão interfacial e transferência de tensões, em concordância com o comportamento descrito por Hubbe; Grigsby, (2020).

Dessa forma, observa-se um equilíbrio entre área superficial e disponibilidade de matriz: partículas finas ampliam o potencial de interação interfacial, mas exigem maior quantidade de resina e dificultam o processamento, enquanto partículas mais grossas favorecem a trabalhabilidade e o recobrimento, embora reduzam a área de contato.

Esse comportamento é consistente com a literatura. Em espumas rígidas de poliuretano reforçadas com farinha de madeira, Bradai et al. (2022) observaram que partículas mais finas aumentam significativamente a viscosidade da mistura, interferindo na reação poli-ol-isocianato e na expansão da espuma, enquanto partículas de maior tamanho resultam em melhor controle reológico e desempenho do material.

Assim, as modificações granulométricas apresentadas nas Figuras 24 e 25 influenciam o empacotamento das partículas, o comportamento reológico do sistema e a qualidade da interface resíduo–matriz, podendo refletir diretamente nas

propriedades mecânicas, na absorção de água e na morfologia interna dos compósitos.

5.1.5 Caracterização química dos resíduos

Os valores de lignina apresentados na Tabela 4 estão em conformidade com dados reportados na literatura para diferentes biomassas lignocelulósicas. Ferreira *et al.*, (2024) analisaram a composição química de biomassas vegetais e reportaram valores semelhantes para o bagaço de cana-de-açúcar, com 24,90% de extrativos e 27,31% de lignina. De forma semelhante, a casca de *Protium tenuifolium* apresentou teor de lignina de 35,3% (Dos santos *et al.*, 2023), enquanto Scatolino *et al.* (2022) observaram 36% em fibras de açaí. Souza *et al.* (2025) também reportaram 24,02% para a casca de tatajuba (*Bagassa guianensis*). Esses resultados corroboram os valores obtidos neste estudo, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Composição Majoritária do Resíduo de andiroba biomassa sem tratamento (ST) e tratado (AD-20).

Componente	ST (%)	AD-20 (%)
Extrativos	31,29 ± 0,0049	5,9997 ± 0,0081
Lignina	36,94 ± 0,0157	50,5997 ± 0,0067
Hemicelulose	6,56 ± 0,0426	12,4185 ± 0,0634
Alfacelulose	17,95 ± 0,0345	36,4202 ± 0,0178

Fonte: Autor (2026).

Por outro lado, os teores de extrativos e alfa-celulose do resíduo sem tratamento (ST) apresentam maior discrepância em relação a outras biomassas vegetais, o que pode estar associado à presença de compostos lipídicos residuais na superfície das partículas. Biomassas com elevado teor de extrativos tendem a apresentar menor fração relativa de celulose, como observado por Tessera *et al.* (2023), que relataram 9,44% de celulose na casca de café. Além disso, a composição química de biomassas lignocelulósicas pode variar em função de fatores biológicos e ambientais, como condições climáticas, tipo de solo e estágio de desenvolvimento da espécie (Bhatia *et al.*, 2020).

Ao comparar os resíduos ST e AD-20, observa-se uma redução expressiva no teor de extrativos após o tratamento com surfactante, com diminuição de aproximadamente 80,83% em relação ao material in natura. Os extrativos correspondem a compostos não estruturais, como óleos, resinas, ceras, pigmentos e açúcares solúveis (Sampaio *et al.*, 2025), que, devido à sua baixa massa molar, são mais facilmente removidos por processos de extração química (Muñoz *et al.*, 2022; Samant; Kaliappan, 2025).

Em compósitos poliméricos, elevados teores de extrativos podem prejudicar a adesão entre partícula e matriz, uma vez que esses compostos tendem a se concentrar na superfície, formando uma barreira que reduz a molhabilidade e os pontos de ancoragem. Como consequência, ocorre redução da interação interfacial, o que pode comprometer as propriedades mecânicas e aumentar a suscetibilidade à absorção de umidade (Shadhin *et al.*, 2026). Nesse contexto, a redução observada para o resíduo AD-20 tende a favorecer o desempenho físico-mecânico dos compósitos.

Em relação à lignina, os dados indicam ausência de redução após o tratamento. De forma semelhante, os teores de hemicelulose e alfa-celulose apresentaram aumento relativo. Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito de concentração decorrente da remoção dos extrativos, ou seja, não representa aumento absoluto desses constituintes, mas sim maior participação percentual na composição global do material. Além disso, a remoção de compostos superficiais pode facilitar a exposição e quantificação dos componentes estruturais durante a análise química (Yoo *et al.*, 2020).

O aumento relativo da alfa-celulose pode ser considerado positivo, uma vez que esse componente está associado à fração mais cristalina da celulose, responsável pela resistência mecânica da biomassa quando utilizada como reforço lignocelulósico (Venkatarajan *et al.*, 2021). Por sua vez, o elevado teor de lignina pode ser vantajoso devido ao seu caráter hidrofóbico, favorecendo a compatibilidade com matrizes poliméricas hidrofóbicas, como o poliuretano (Lisý *et al.*, 2022).

Entretanto, teores elevados de lignina podem exigir maior controle da interface no compósito, pois sua natureza amorfa e rígida pode reduzir a homogeneidade do

material e comprometer a eficiência da transferência de tensões, especialmente em sistemas menos densificados (Li *et al.*, 2007).

5.2 Caracterização dos Painéis

5.2.1 Teor de absorção de água e inchamento dos painéis

A Figura 25 apresenta o teor de absorção de água (%) dos corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba sem tratamento (ST) e tratado (T) para as cinco formulações avaliadas. Observa-se que o comportamento entre ST e T é sistematicamente distinto, evidenciando a influência do tratamento prévio do resíduo na higroscopicidade do compósito.

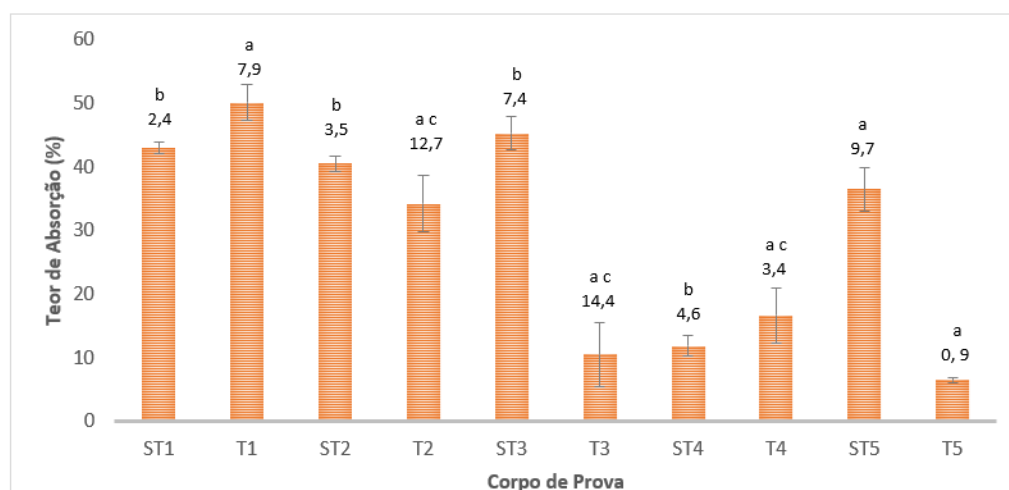
Para a formulação 1, o corpo de prova ST1 apresenta absorção em torno de 43%, enquanto T1 exibe valor superior, aproximadamente 50%, sugerindo que, nesta composição, o tratamento químico não reduziu a permeabilidade à água.

Na formulação 2, ocorre o inverso: ST2 apresenta absorção mais elevada ($\approx 42\%$) em comparação ao corpo tratado T2 ($\approx 33\%$), indicando que o tratamento reduziu significativamente a captação de umidade.

A formulação 3 mantém essa tendência: ST3 apresenta absorção de aproximadamente 46%, enquanto T3 reduz drasticamente para cerca de 10%, demonstrando que o tratamento foi altamente eficaz em minimizar a absorção de água nesta composição.

Nas formulações 4 e 5, a diferença entre ST e T continua evidente. ST4 exibe absorção moderada ($\approx 12\%$), superior ao valor observado para T4 ($\approx 10\%$). Na formulação 5, ST5 apresenta uma absorção elevada ($\approx 35\%$), enquanto T5 atinge o menor valor de todo o conjunto ($\approx 6\%$).

Figura 25 – Teor de absorção de água (%) dos corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba sem tratamento (ST) e tratado (T) nas cinco formulações avaliadas.



Fonte: Autor (2026).

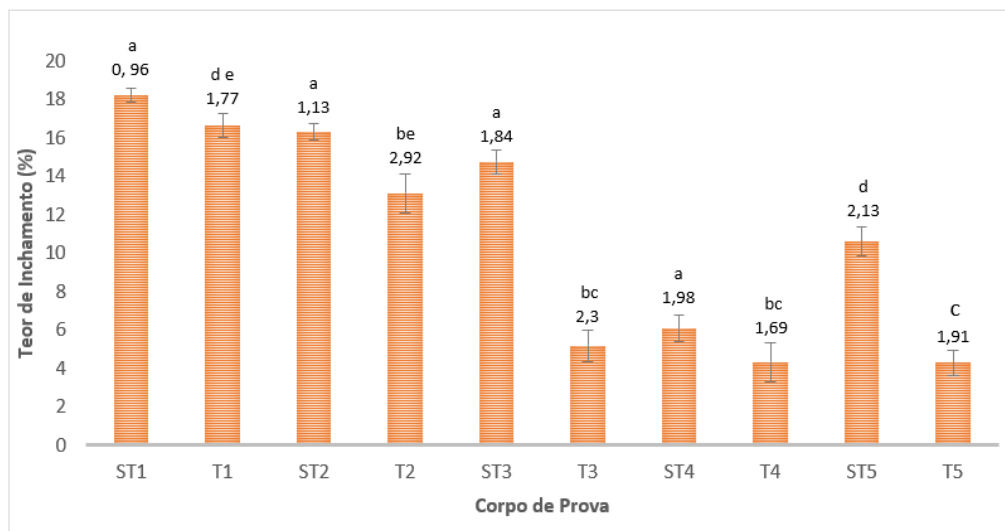
De forma geral, os resultados demonstram que os corpos de prova com resíduo ST tendem a apresentar maiores valores de absorção de água, refletindo maior porosidade e maior presença de grupos hidrofílicos disponíveis.

Para os corpos de prova confeccionados com o resíduo T, especialmente nas formulações 3, 4 e 5, observou-se uma redução significativa da higroscopicidade, sugerindo a remoção de óleos residuais, associada a um bom recobrimento das fibras e à maior compactação do material, o que culmina em maior impermeabilidade.

. Assim, observa-se que o tratamento químico desempenhar papel essencial na redução da absorção de água e, conseqüentemente, na melhoria da estabilidade dimensional dos compósitos.

A Figura 26 apresenta o teor de inchamento (%) dos corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba sem tratamento (ST) e tratado (T) nas cinco formulações avaliadas. O inchamento representa o percentual de expansão dimensional dos compósitos após a imersão em água, e está diretamente associado ao comportamento higroscópico do material.

Figura 26 – Teor de inchamento (%) dos corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba sem tratamento (ST) e tratado (T) para as cinco formulações avaliadas.



Fonte: Autor (2026).

Para a formulação 1, observa-se que ST1 apresenta o maior valor de inchamento ($\approx 18\%$), enquanto T1 apresenta valor ligeiramente inferior ($\approx 17\%$). Esse comportamento semelhante sugere que, em formulações com menor proporção de pré-polímero, a adesão entre matriz e partículas é limitada, o que favorece a maior penetração e difusão de moléculas de água no interior do compósito, contribuindo para maior instabilidade dimensional.

Na formulação 2, o comportamento é semelhante, com ST2 apresentando inchamento próximo de 16%, reduzido para aproximadamente 13% em T2. Nesse caso, observa-se uma melhora mais perceptível associada ao tratamento do resíduo, possivelmente relacionada à menor presença de compostos hidrofílicos superficiais e à redução de sítios ativos disponíveis para interação com moléculas de água.

A formulação 3 apresenta diferença mais pronunciada entre ST3 e T3. Enquanto ST3 exibe inchamento em torno de 15%, T3 reduz drasticamente para aproximadamente 5%, indicando que, nessa condição, o tratamento do resíduo foi altamente eficaz na redução da absorção de água e na limitação da difusão no interior do material.

Nas formulações 4 e 5, os corpos de prova sem tratamento (ST4 e ST5) mantêm inchamento mais elevado ($\approx 7\%$ e $\approx 11\%$, respectivamente), enquanto os corpos tratados (T4 e T5) apresentam valores significativamente menores ($\approx 4\%$ em T4 e $\approx 4\text{--}5\%$ em T5). Esses resultados indicam que formulações com maior proporção de resina tendem a apresentar melhor estabilidade dimensional, efeito que é potencializado pelo tratamento do resíduo.

De maneira geral, o inchamento observado nos corpos de prova está diretamente relacionado ao processo de difusão de moléculas de água no interior do compósito, o qual pode ser descrito pela Lei de Fick. Inicialmente, a penetração da água ocorre por gradiente de concentração, sendo favorecida pela presença de poros e microcavidades na matriz polimérica. Em seguida, as moléculas de água interagem com grupos polares presentes tanto na celulose e hemicelulose das fibras quanto na própria matriz, promovendo ligações por pontes de hidrogênio, o que intensifica a retenção de água e contribui para a expansão volumétrica.

Além disso, a mobilidade das moléculas de água no interior do compósito é influenciada pela densidade de reticulação da matriz e pela eficiência da adesão fibra–resina. Sistemas com melhor recobrimento e maior compactação apresentam menor conectividade de poros, dificultando a difusão e reduzindo a taxa de absorção. Nesse contexto, a redução de grupos hidrofílicos após o tratamento do resíduo contribui para diminuir os sítios de interação com a água, limitando sua difusão e, conseqüentemente, o inchamento.

Em síntese, os corpos de prova confeccionados com resíduo sem tratamento (ST) apresentam maior tendência ao inchamento devido à maior disponibilidade de grupos hidrofílicos e maior permeabilidade estrutural. Em contrapartida, os corpos produzidos com resíduo tratado (T), especialmente nas formulações 3 a 5, apresentam maior estabilidade dimensional, evidenciando menor difusão de água, melhor interação matriz–partícula e maior resistência à expansão volumétrica.

5.2.2 Caracterização Mecânica dos Painéis

A Tabela 5 apresenta os valores calculados para o Módulo de Flexão Estática (MOR) e o Módulo de Elasticidade (MOE), referentes ao ensaio de flexão dos painéis.

A análise dos resultados mecânicos considera dois fatores simultâneos: (i) o efeito do tratamento do resíduo com surfactante (comparando pares ST/T com mesma proporção polioli/pré-polímero) e (ii) o efeito da variação da proporção polioli/pré-polímero (analisando a sequência ST1→ST5 e T1→T5).

Tabela 5: MOR e MOE calculado para os diferentes tipos de painéis produzidos.

Compósito	Módulo de Flexão Estática (Mpa)		Módulo Elástico (Mpa)		Densidade
ST1 (1,0:1,2)	3,78 ±	0,50 ^a	340,97 ±	52,76 ^a	0,781 ± 5 ^a
ST2 (1,0:1,0)	3,72 ±	0,66 ^a	313,20 ±	55,44 ^a	0,773 ± 2 ^a
ST3 (1,2:1,0)	6,10 ±	3,11 ^{ab}	565,85 ±	289,96 ^{ab}	0,786 ± 6 ^a
ST4 (1,4:1,0)	3,74 ±	1,22 ^a	348,99 ±	114,45 ^a	0,774 ± 4 ^a
ST5 (1,6:1,0)	5,49 ±	1,42 ^{ab}	559,43 ±	136,53 ^{ab}	0,787 ± 5 ^a
T1 (1,0:1,2)	12,00 ±	3,61 ^{cd}	846,00 ±	281,37 ^{bc}	0,785 ± 5 ^a
T2 (1,0:1,0)	15,85 ±	5,76 ^d	1120,27 ±	350,20 ^c	0,789 ± 6 ^a
T3 (1,2:1,0)	13,23 ±	3,26 ^{cd}	1035,78 ±	227,33 ^c	0,773 ± 4 ^a
T4 (1,4:1,0)	14,59 ±	4,05 ^{cd}	1124,81 ±	302,72 ^c	0,766 ± 5 ^a
T5 (1,6:1,0)	10,33 ±	4,14 ^{bc}	909,01 ±	307,67 ^{bc}	0,760 ± 5 ^a
ABNT NBR 14810	11 (mínimo)		1800 (mínimo)		551 – 750

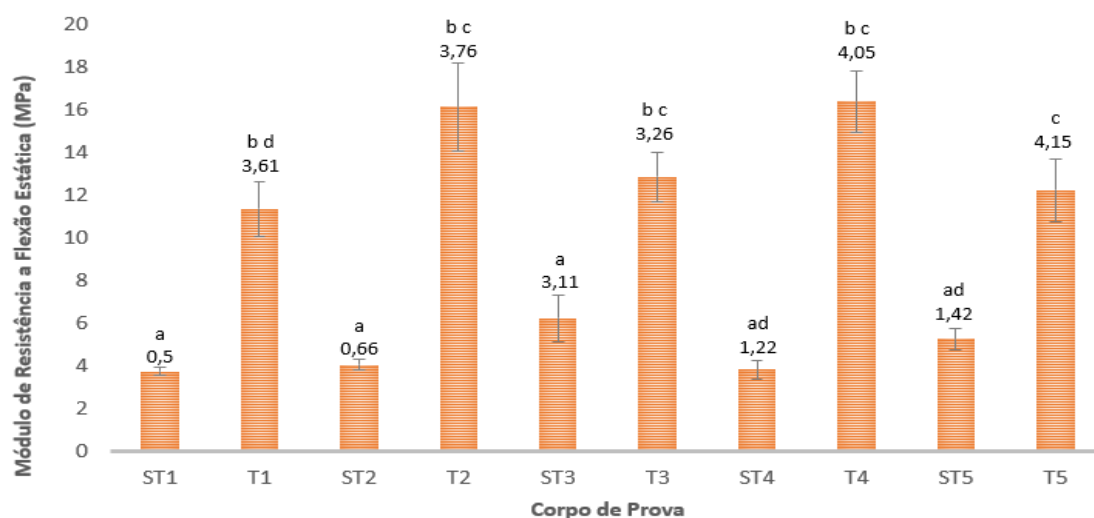
Médias seguidas da mesma letra não apresentam variação estatística significativa para o teste de tukey (p<0,05).

5.2.2.1 Efeito do Tratamento com Surfactante de 20%

A Figura 27 apresenta o Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR) dos corpos de prova referentes a todas as formulações de painéis produzidos.

Observa-se uma tendência consistente em todos os pares analisados: as amostras tratadas apresentam valores de módulo substancialmente superiores aos das amostras sem tratamento. Nos corpos de prova ST1–T1, ST2–T2, ST3–T3, ST4–T4 e ST5–T5, os valores de módulo para as amostras ST situam-se entre aproximadamente 3,5 e 6,1 MPa, enquanto para as amostras T os valores aumentam significativamente, variando entre 10,33 e 15,85 MPa. Esse aumento expressivo indica que o tratamento com surfactante aplicado ao resíduo melhora de forma marcante a resistência do compósito ao carregamento fletor.

Figura 27; Módulo de ruptura (MOR) dos painéis produzidos com resíduo de andiroba tratado (T) e não tratado (ST), obtido por ensaio de flexão em três pontos.



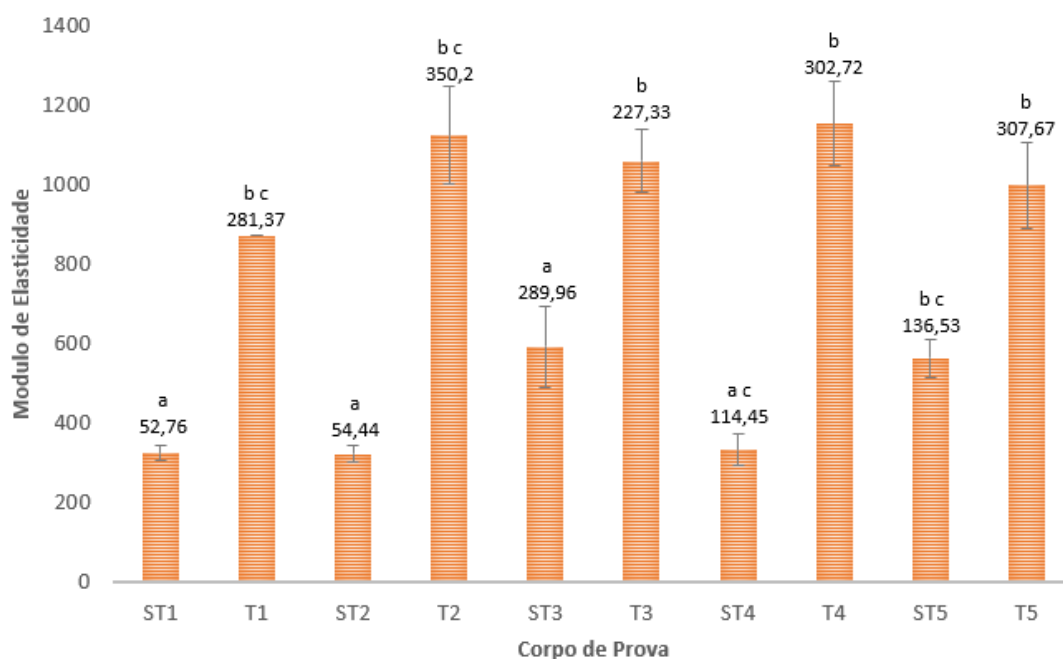
Fonte: Autor (2026).

A Figura 28 apresenta os valores do Módulo de Elasticidade (MOE) dos corpos de prova de cada tipo de painel produzido.

Assim como observado nos demais ensaios mecânicos, a tendência é consistente: todos os corpos de prova com resíduo tratado exibem módulos de elasticidade muito superiores aos correspondentes corpos de prova produzidos com resíduo sem tratamento. Os valores das amostras ST variam aproximadamente entre 250 e 600 MPa, dependendo da formulação, enquanto as amostras T alcançam valores significativamente maiores, variando entre 850 e 1.200 MPa. Esse aumento expressivo indica que o tratamento com surfactante do resíduo melhora de forma substancial a rigidez do compósito, tornando os painéis mais resistentes à deformação elástica.

O tratamento com surfactante removeu óleos residuais e extrativos do resíduo de andiroba, melhorando a adesão interfacial entre a matriz poliuretana e as partículas lignocelulósicas. Esse efeito foi particularmente pronunciado nas proporções (1,0:1,0) e (1,4:1,0), onde o ganho de MOR superou 250%.

Figura 28; Módulo de elasticidade dos corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba tratado (T) e não tratado (ST), com valores de 250–600 MPa para ST e 850–1.200 MPa para T).



Fonte: Autor (2026).

5.2.2.2 Efeito da Variação da Proporção Polioli/Pré-polímero

Resíduo Não Tratado (ST1–ST5) apresentou baixa sensibilidade à variação da proporção. Os melhores resultados nas placas com resíduo sem tratamento ocorreram em ST3 (1,2:1,0; MOR 6,10 MPa) e ST5 (1,6:1,0; MOR 5,49 MPa), embora sem diferença estatística significativa em relação às demais formulações. A maior quantidade de pré polímero (1,2:1,0 e 1,6:1,0) parece compensar parcialmente a baixa adesão causada pelos extrativos, possivelmente por aumentar as ligações com as hidroxilas. O aumento relativo do pré-polímero (1,0:1,0 e 1,4:1,0) não gerou melhorias proporcionais, sugerindo que, na presença de óleos residuais, a maior disponibilidade de isocianato pode não resultar em aumento efetivo da reticulação (Dusek, Karel; Spirkova, 1990)(Yilgör; Yilgör; Wilkes, 2015)(Kim; Kim; Ho, 2008).

De forma geral, os painéis produzidos com resíduo tratado (T1–T5) apresentaram desempenho mecânico significativamente superior. Além disso, esse grupo exibiu maior sensibilidade à variação da proporção polioli/pré-polímero, onde o equilíbrio entre polioli e pré-polímero (1,0:1,0; T2) produziu o maior MOR (15,85 MPa) e MOE (1120,27 MPa), seguido de perto por T4 (1,4:1,0; MOR 14,59 MPa, MOE

1124,81 MPa). Curiosamente, o excesso de polioliol (T3: 1,2:1,0) ou de pré-polímero (T5: 1,6:1,0) resultou em propriedades inferiores. Esse comportamento ótimo em 1,0:1,0 e 1,4:1,0 indica que, com interface limpa, a estequiometria aproximada entre hidroxilas (polioliol) e isocianatos (pré-polímero) favorece a formação de uma rede polimérica mais coesa, sem ligações cruzadas excessivas que possam fragilizar o material.

A análise conjunta dos resultados evidencia que o tratamento com surfactante do resíduo é o principal fator responsável pela melhoria do desempenho mecânico dos compósitos. Mesmo a formulação tratada com menor desempenho (T5: 10,33 MPa) apresentou resistência superior à melhor formulação sem tratamento (ST3: 6,10 MPa), representando um ganho de aproximadamente 69%.

Além disso, a otimização da proporção polioliol/pré-polímero potencializa os efeitos do tratamento. A formulação T2 (1,0:1,0) apresentou módulo de ruptura (MOR) 53% superior ao da formulação T5 (1,6:1,0), embora ambas utilizem resíduo tratado, evidenciando que o equilíbrio entre os componentes da matriz é determinante para o desempenho mecânico.

Em termos normativos, os resultados de MOR mostram que as formulações T2 (15,85 MPa), T3 (13,23 MPa) e T4 (14,59 MPa) superaram o valor mínimo de 11 MPa estabelecido pela ABNT NBR 14810, demonstrando a viabilidade técnica do material quando há a combinação entre resíduo tratado e proporção adequada de polioliol/pré-polímero.

Por outro lado, nenhuma das formulações atingiu o valor mínimo de módulo de elasticidade (MOE) de 1800 MPa exigido pela norma, embora o módulo de ruptura (MOR) tenha sido superior ao padrão normativo. Esse comportamento pode estar associado à distribuição da resina em função da menor área superficial efetiva das partículas do resíduo tratado, cujas maiores dimensões podem ter contribuído para a redução da área superficial específica e, conseqüentemente, para o aumento da disponibilidade de resina na interface matriz-partícula.

De acordo com Sideridis et al.(2015) e Devireddy; Biswas, (2014), o aumento da fração de matriz polimérica tende a reduzir o módulo de elasticidade do compósito, uma vez que a matriz apresenta menor rigidez em comparação ao reforço fibroso.

Adicionalmente, fatores como a menor área superficial específica associada a partículas de maior dimensão podem influenciar a eficiência de recobrimento pela matriz, alterando a relação entre volume de resina disponível e área de interface partícula–matriz.

Possíveis variações nas propriedades mecânicas também podem estar relacionadas a heterogeneidades pontuais durante a etapa de compactação da mistura ainda não curada, comportamento comum em compósitos obtidos por prensagem a partir de biomassas residuais. No entanto, tais variações não parecem comprometer o desempenho global no ensaio de flexão, sendo características inerentes ao processo de fabricação.

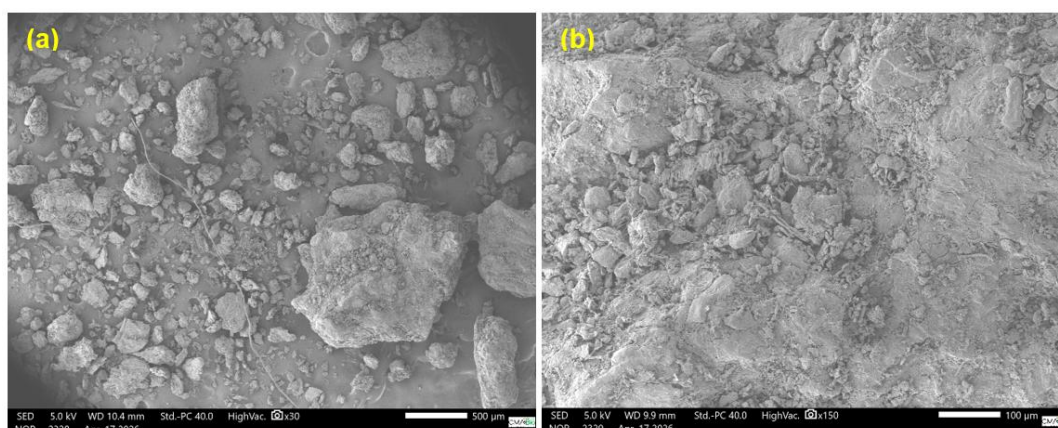
Por fim, o conjunto de corpos de prova, obtido a partir de dois painéis com formulações tratadas (T) e não tratadas (ST), conforme a ABNT NBR 14810-2, mostrou-se adequado para a produção de amostras com qualidade geométrica e superficial compatível com a realização dos ensaios mecânicos de flexão.

5.2.3 Análise Morfológica

5.2.3.4 Resíduo tratado e *in natura*.

As micrografias de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciam diferenças significativas na morfologia e granulometria do resíduo de andiroba em função do tratamento, nas Figuras 29a e 29b (resíduo *in natura*), observa-se a predominância de partículas finas. Em maior ampliação, apresenta aspecto mais homogêneo e parcialmente recoberto, sugerindo a presença de extrativos.

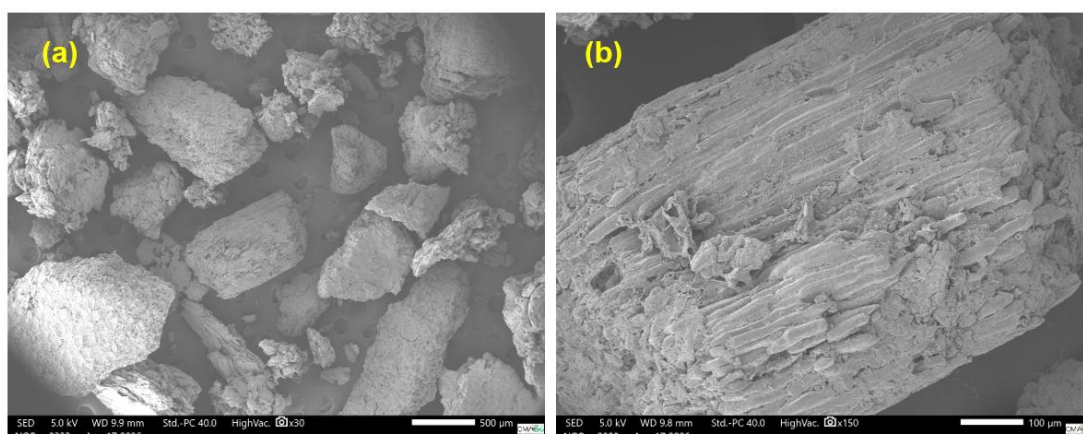
Figura 29-MEV do resíduo de andiroba In Natura. a) 30x; b)150x



Fonte: Autor (2026).

Por outro lado, as Figuras 30a e 30b (resíduo tratado) evidenciam partículas de morfologia irregular e aparentemente maiores que o observado no resíduo não tratado, evidenciando menor presença de partículas com dimensões inferiores.

Figura 30-MEV do resíduo de andiroba tratado. a) 30x; b)150x



Fonte: Autor (2026).

A superfície apresenta maior rugosidade, com estruturas lamelares e fibrilas expostas, indicando a remoção de extrativos e maior exposição da estrutura lignocelulósica. De modo geral, as análises de MEV indicam que a remoção de extrativos promove a exposição da estrutura fibrosa e o aumento da rugosidade superficial, resultando em maior área de contato e favorecendo a ancoragem mecânica entre partícula e matriz (Shadhin et al., 2026; Lee; Khalina; Lee, 2021).

As modificações morfológicas promovidas pelos tratamentos refletem-se diretamente nas propriedades mecânicas dos compósitos. Observou-se um aumento

da resistência à flexão nos materiais produzidos com biomassa tratada em comparação aos compósitos contendo biomassa *in natura*. Esse comportamento pode ser atribuído à remoção parcial dos extrativos lipídicos presentes na superfície do resíduo, favorecendo a adesão interfacial entre a biomassa e a matriz polimérica. Em contrapartida, a presença desses extrativos no material não tratado atua como uma barreira física à interação entre as fases, limitando a transferência de tensões e comprometendo o desempenho mecânico do compósito. (Benini et al., 2017; Singha; Thakur, 2009).

5.2.3.5 Painéis com resíduo tratado e *in natura*.

A análise das micrografias dos painéis produzidos com resíduo tratado evidencia uma forte correlação entre a morfologia, superfície tratada e o desempenho mecânico obtido. A amostra **T24** (Placa tratada com formulação 2 e amostra 4), que apresentou os melhores resultados mecânicos globais (MOR de 24,5 MPa e MOE de 1611,82 MPa), exibe uma estrutura mais homogênea, com melhor empacotamento das partículas e claramente fibras rompidas, além de menor presença de vazios e evidenciando melhor adesão a da resina como observamos nas Figuras 32a e 32b.

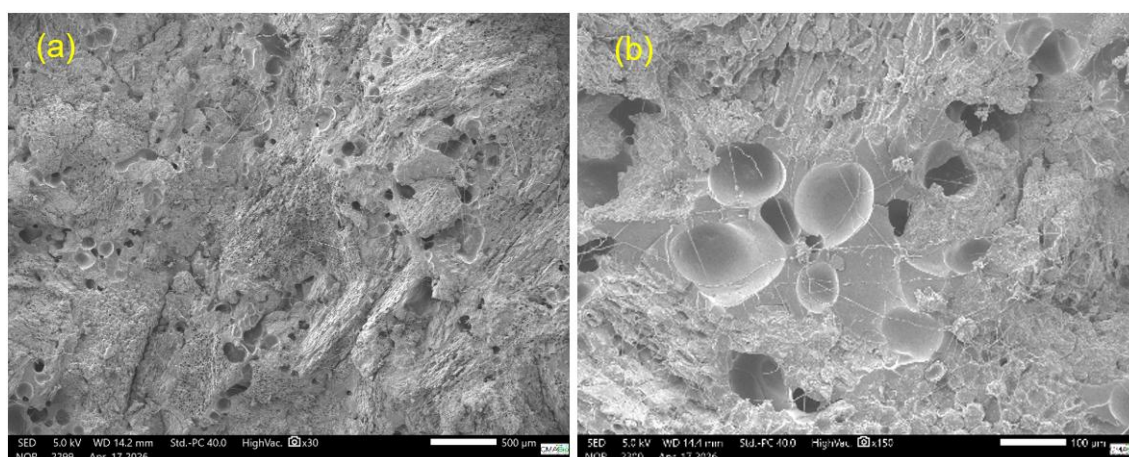


Figura 31-Amostra T24. a) 30x; b)150x

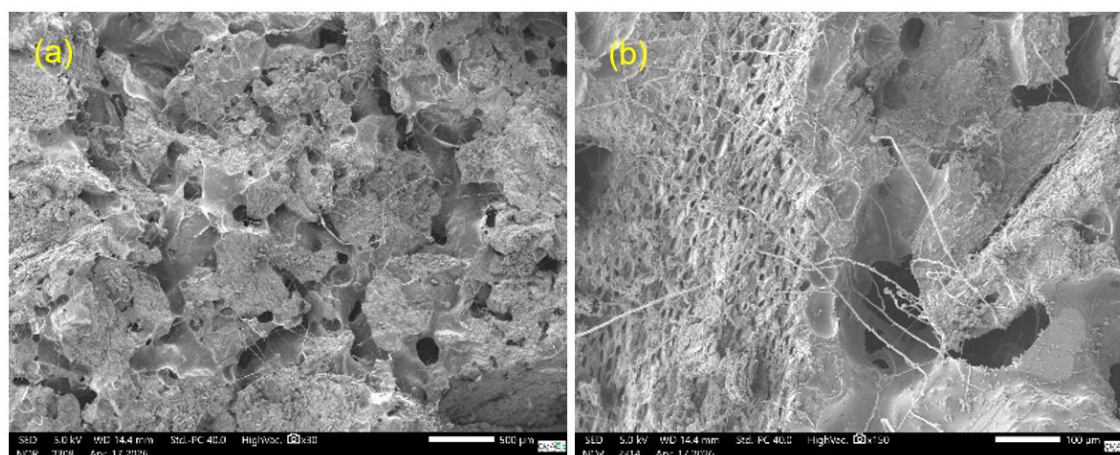


Figura 32-Amostra ST34 a) 30x; b)150x

Por outro lado, a amostra ST34 (amostra 4, painel com formulação 3 resíduo sem tratamento), em comparação com o resultado global das demais amostras produzidas com resíduo não tratado, apresentou melhores propriedades mecânicas (MOR de 11,46 MPa e MOE de 1000,92 MPa), melhor grau de compactação e menor quantidade de vazios. No entanto, mesmo nessa condição, a adesão interfacial permanece limitada devido ao elevado teor de extrativos na superfície das partículas. Apesar de apresentar o melhor resultado global entre os painéis produzidos com resíduo não tratado, a presença desses extrativos reduz a molhabilidade pela matriz polimérica e dificulta a formação de uma interface eficiente. (Shadhin *et al.*, 2026 ; Benini *et al.*, 2017).

Outro fato observado foi a predominância de partículas extremamente pequenas que, ao aumentar a área superficial específica, também reduzem a disponibilidade de matriz por unidade de área, podendo comprometer o recobrimento adequado das partículas e a eficiência da interface resíduo–matriz (Hubbe; Grigsby, 2020) como pode ser observado nas Figuras 33a e 33b. Em contrapartida, a amostra T54 (Figuras 34a e 34b), que apresentou desempenho mecânico inferior entre as amostras com resíduo tratado (MOR de 3,4 MPa e MOE de 357,4 MPa), apresentou áreas de baixa adesão em função da baixa compactação pontual devido à falha no nivelamento, conforme observado na Figura 19, comprometendo significativamente as propriedades mecânicas do compósito. (Singha; Thakur, 2009). Embora tenham sido observadas regiões com aderência entre matriz e reforço, a heterogeneidade estrutural limitou o desempenho da amostra.

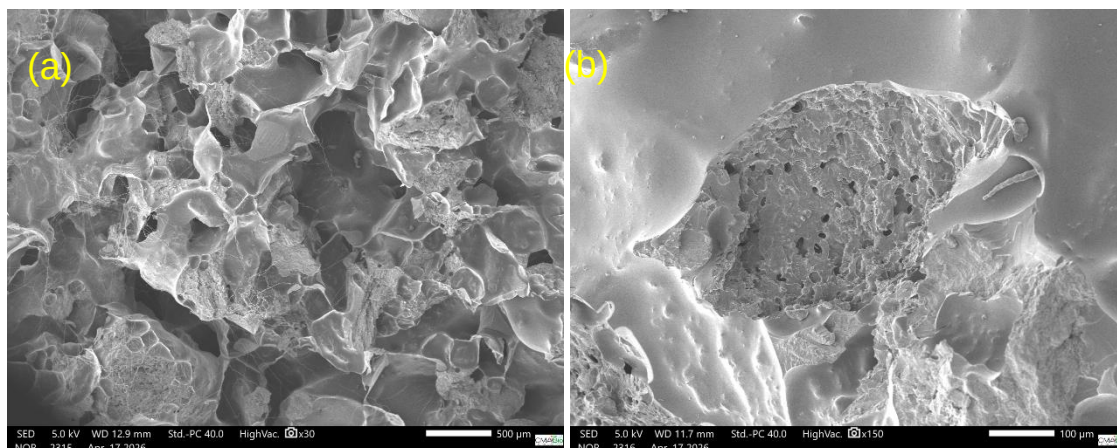


Figura 33- Amostra T54 a) 30x; b)150x

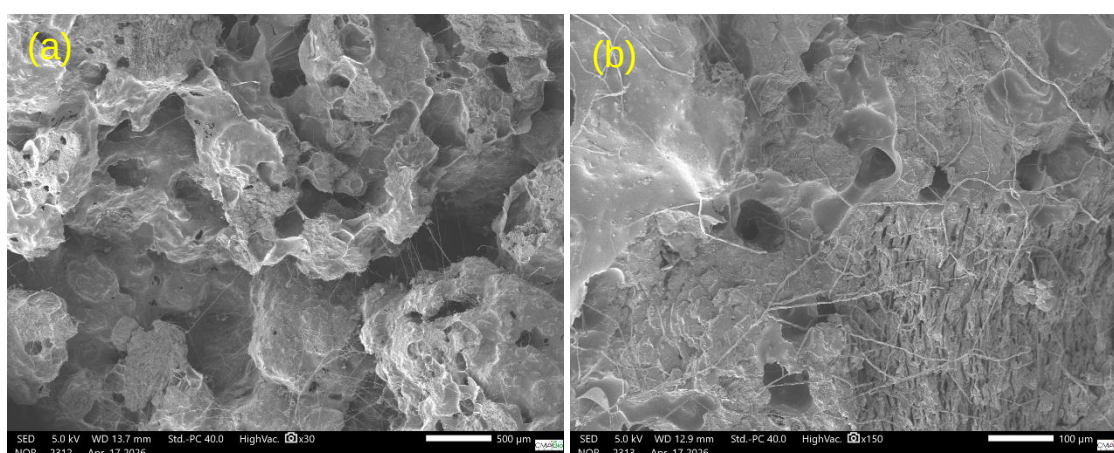


Figura 34 Amostra ST48 a) 30x; b)150x

Dessa forma, verifica-se que, mesmo com o uso de material tratado, o desempenho mecânico depende diretamente do grau de compactação, da distribuição das partículas e da minimização de defeitos estruturais.

Nos painéis produzidos com resíduo in natura, a influência da morfologia sobre as propriedades mecânicas também é evidente, porém com limitações adicionais associadas à presença de extrativos. A amostra ST48 (Figuras 35a e 35b), que apresentou os piores resultados mecânicos (MOR de 2,136 MPa e MOE de 256,36 MPa), evidencia elevada deficiência na adesão interfacial. Essa condição compromete a estabilidade estrutural do compósito quando submetido a solicitações mecânicas, uma vez que as regiões com adesão deficiente atuam como vazios e pontos de concentração de tensões, facilitando a falha do material. (Singha; Thakur, 2009).

De modo geral, os painéis produzidos com biomassa sem tratamento apresentaram desempenho inferior aos painéis contendo biomassa tratada, o que pode ser atribuído à combinação de fatores como a elevada presença de extrativos, a maior tendência à aglomeração das partículas e a menor eficiência da adesão interfacial entre a biomassa e a matriz polimérica. (Lee; Khalina; Lee, 2021).

5.3 Outros Resultados Obtidos

A Figura 32 apresenta conjuntos de corpos de prova obtidos a partir dos painéis produzidos com resíduos de andiroba ST e T. Observa-se que, após 10 dias do ensaio de absorção de água e inchamento, alguns corpos de prova exibem crescimento visível de fungos, caracterizado por manchas esbranquiçadas distribuídas na superfície. Esse comportamento pode estar associado à maior absorção de umidade, possivelmente decorrente de um recobrimento menos eficiente das partículas pela matriz polimérica. A ausência desse fenômeno nos corpos tratados (T) pode sugerir que o tratamento pode ter contribuído para a redução da disponibilidade de compostos orgânicos e para a diminuição da retenção de umidade, fatores que podem favorecerem

o crescimento microbiano, além de favorecer melhor interação entre o resíduo e a matriz, aumentando a estabilidade do material frente à deterioração biológica.



Figura 35:Corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba tratado e não tratado após armazenamento.

Em contraste, os corpos de prova produzidos com resíduo de andiroba tratado (T) apresentam aparência homogênea e ausência de sinais visíveis de contaminação fúngica. Esse comportamento sugere que o tratamento aplicado ao resíduo foi eficaz na remoção de componentes que favoreciam o desenvolvimento microbiano, além de promover melhor recobrimento das partículas pela matriz polimérica, resultando em painéis mais estáveis e menos suscetíveis à biodeterioração.

6 Conclusão

O presente estudo investigou o efeito do tratamento com surfactante sobre o resíduo lignocelulósico proveniente da extração do óleo de andiroba, avaliando seu desempenho como carga em painéis poliméricos.

Os resultados demonstram que o tratamento prévio do resíduo se configura como o principal fator responsável pela obtenção de compósitos com propriedades físico-mecânicas superiores, maior estabilidade dimensional e maior resistência à deterioração biológica.

Do ponto de vista físico, os corpos de prova produzidos com resíduo tratado apresentaram menor higroscopicidade e maior estabilidade dimensional, refletidas nos menores valores de absorção de água e inchamento em espessura. Em termos mecânicos, as amostras tratadas apresentaram desempenho significativamente superior, com maiores valores de módulo de elasticidade, módulo de ruptura e resistência à flexão, evidenciando uma interação interfacial mais eficiente e melhor adesão entre a matriz polimérica e o reforço lignocelulósico.

Esses resultados estão diretamente associados à remoção de extrativos, especialmente compostos lipídicos, cuja presença atua como barreira física à adesão entre partícula e matriz. A análise por Ressonância Magnética Nuclear confirmou a redução significativa do teor de óleo residual nos materiais tratados, contribuindo para a melhoria da interface e da integridade estrutural dos compósitos.

Adicionalmente, observou-se que as variações na proporção poliol/pré-polímero não se mostraram determinantes para o desempenho dos painéis. Embora alguns resultados tenham indicado discretas melhorias nas formulações com maior proporção de pré-polímero, tanto nos painéis produzidos com resíduo tratado quanto naqueles produzidos com resíduo sem tratamento, tais diferenças não foram suficientemente expressivas para caracterizar essa variável como o principal fator responsável pelos resultados obtidos. Em contraste, o tratamento do resíduo mostrou-se consistentemente responsável pelos ganhos observados, independentemente da formulação empregada.

A padronização do teor de umidade contribuiu para a confiabilidade dos resultados experimentais. Embora os valores obtidos tenham sido inferiores aos normalmente reportados na literatura, não foram observados efeitos deletérios sobre as propriedades dos compósitos. Além disso, fatores como granulometria e densidade aparente do resíduo influenciaram o processamento e a trabalhabilidade do material, devendo ser considerados na formulação de futuros compósitos. No que se refere à durabilidade, apenas as amostras produzidas com resíduo sem tratamento apresentaram crescimento fúngico, evidenciando a contribuição do tratamento para a estabilidade biológica do material.

Dessa forma, conclui-se que o tratamento do resíduo de andiroba promove melhorias significativas nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos

compósitos, destacando-se como etapa essencial para sua aplicação tecnológica. Os resultados reforçam o potencial desse resíduo como carga lignocelulósica em matrizes poliméricas e evidenciam sua viabilidade para aplicação em processos industriais, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis de maior valor agregado e para o aproveitamento eficiente de resíduos agroindustriais da cadeia produtiva da andiroba.

Trabalhos futuros

Visando a otimização do uso de resíduos lignocelulósicos em compósitos, bem como a redução do consumo de resina sem prejuízo das propriedades mecânicas, tem-se como proposta para trabalhos futuros:

- Desenvolver um modelo matemático para estimar o teor de resina em função do diâmetro médio das partículas de acordo com o padrão granulométricos de resíduos lignocelulósicos, considerando a área superficial específica e sua influência na molhabilidade do reforço.
- Investigar o intervalo ótimo de taxa de compactação, avaliando diferentes níveis de densificação e sua influência nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.
- Avaliar a influência da distribuição granulométrica na demanda de resina, buscando estabelecer relações entre intervalos de tamanho de partículas e o consumo ideal de matriz polimérica.

Referências

1. ABNT. **NBR 14810-1:2013 – Chapas de partículas de média densidade – MDF – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro. 2013.
2. ABNT. **NBR 14810-2:2018 – Chapas de madeira aglomerada – Parte 2: Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro. 2018.
3. ADVANCE. **Quais são as diferenças entre MDF e MDP?**
4. AKINDOYO, J. O.; BEG, M. D. H.; GHAZALI, S.; HEIM, H. P.; FELDMANN, M.; MARIATTI, M. Synergized high-load bearing bone replacement composite from poly(lactic acid) reinforced with hydroxyapatite/glass fiber hybrid filler—Mechanical and dynamic mechanical properties. **Polymer Composites**, v. 42, n. 1, p. 57–69, 2021.
5. ALMEIDA, F. C. G.; CAVALCANTI, M. H. C.; MAGALHÃES, V. M.; RUFINO, R. D.; LUNA, J. M.; SARRUBO, L. A. Atividade surfactante do extrato de *Artocarpus heterophyllu* e aplicação na remoção de óleo em superfície sólida. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 5, p. 3482–3485, 2018.
6. ALTUN, M.; CELEBI, M.; OVALI, S. Preparation of the pistachio shell reinforced PLA biocomposites: Effect of filler treatment and PLA maleation. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 35, n. 9, p. 1342–1357, 2022.
7. ANDREOLA, J. F.; TOMÉ, K. H. A.; LOPES, L. R.; JUNGES, I. Estudo da cadeia produtiva da andiroba na perspectiva de um arranjo produtivo sustentável, responsável, inclusivo e viável economicamente. In: *Ecosistema anima*, 2022, [...]. 2022.
8. APPROACH, L. B. Development of a TD-NMR Method to Monitor Brazil Nuts Oil Content: A Green and Low-Cost Based Approach. v. 32, n. 7, p. 1405–1412, 2021.
9. ARSLAN, B.; JU, X.; ZHANG, X.; ABU-LAIL, N. I. Heterogeneity and Specificity of Nanoscale Adhesion Forces Measured between Self-Assembled Monolayers and Lignocellulosic Substrates: A Chemical Force Microscopy Study. **Langmuir**, v. 31, n. 37, p. 10233–10245, 2015.
10. ATIQA, M. T.; MASTURA, B. A.; ALI, A.; AND, M. J.; SAPUAN, S. M. A Review on Polyurethane and its Polymer Composites. v. Volume 14, p. Page: [233-248], 2017. Disponível em: <<https://www.benthamscience.com/article/78094>>.
11. AZAMBUJA, R. da R.; DE CASTRO, V. G.; TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S. Utilization of construction and demolition waste for particleboard production. **Journal of Building Engineering**, v. 20, n. July, p. 488–492, 2018.
12. BALDO, C.; BAGGIO, L. M.; MORENO, T. G.; MAGRI, A.; MARCELO RODRIGUES DE MELO; GASPARIN, F. G. M.; CELLIGOI, M. A. P. C. Estudo da Produção de Lipase por Bactérias Isoladas de Efluente de Abatedouro Avícola. **Biochemistry and Biotechnology Reports**, v. 2, n. 3, 2013.
13. BARLOW, J.; LENNOX, G. D.; FERREIRA, J.; BERENGUER, E.; LEES, A. C.; NALLY, R. Mac; THOMSON, J. R.; FROSINI, S.; FERRAZ, D. B.; LOUZADA, J.; HUGO, V.; OLIVEIRA, F.; PARRY, L.; RIBEIRO, R.; SOLAR, D. C.; VIEIRA, I. C. G.; ARAGÃO, L. E. O. C.; BEGOTTI, R.

- A.; BRAGA, R. F. double biodiversity loss from deforestation. **Nature**, v. 535, n. 7610, p. 144–147, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nature18326>>.
14. BARROS, M.; MASSI, J.; GASPARIN, F.; CELLIGOI, M. A. Bioprospecção de Bactérias para Biorremediação de Ambientes Poluídos com Resíduos Lipídicos. **Biochemistry and Biotechnology Reports**, v. 2, n. 3, 2013.
 15. BAVANEGHI, F.; GHORBANI, M. Mechanical behavior and springback of acetylated particleboard made in different press times. **Wood Material Science & Engineering**, v. 11, n. 1, p. 56–61, 2015. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17480272.2015.1006249>>.
 16. BENINI, K. C. C. de C.; BROCKS, T.; MONTORO, S. R.; CIOFFI, M. O. H.; VOORWALD, H. J. C. Effect of fiber chemical treatment of nonwoven coconut fiber/epoxy composites adhesion obtained by RTM process. **Polymer Composites**, v. 38, n. 10, p. 2518–2527, 2017. Disponível em: <<https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pc.23842>>.
 17. BENTHIEN, J. T.; ENGEHAUSEN, N.; LÜDTKE, J. Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Single-Layer Particleboards. **Fibers**, 2024.
 18. BERTOLINI, M. S. Particleboards from CCB-Treated Pinus sp. Wastes and Castor Oil Resin: Morphology Analyses and Physical–Mechanical Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 11, p. 5019003, 2019.
 19. BHATIA, S. K.; JAGTAP, S. S.; BEDEKAR, A. A.; BHATIA, R. K.; PATEL, A. K.; PANT, D.; RAJESH BANU, J.; RAO, C. V.; KIM, Y. G.; YANG, Y. H. Recent developments in pretreatment technologies on lignocellulosic biomass: Effect of key parameters, technological improvements, and challenges. **Bioresource Technology**, v. 300, n. January, p. 122724, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122724>>.
 20. BOEY, J. Y.; YUSOFF, S. B.; TAY, G. S.; I, I. A review on the enhancement of composite's interface properties through biological treatment of natural fibre/lignocellulosic material. **Polymers and Polymer Composites**, v. 30, 2022.
 21. BORGES, A. M.; MARTINS, C. C. dos S.; BASSO, M. C. A. Sustainable management and reuse of agro-industrial waste: An approach from the perspective of the circular economy and agribusiness management. **Applied and Social Sciences**, v. 3, 2025.
 22. BRADAI, H.; KOUBAA, A.; BOUAFIF, H.; LANGLOIS, A.; SAMET, B. Synthesis and Characterization of Wood Rigid Polyurethane Composites. **Materials**, v. 15, n. 4316, 2022.
 23. BRANCALION, P. H. S.; ALMEIDA, D. R. A. De; VIDAL, E.; MOLIN, P. G.; SONTAG, V. E.; SOUZA, S. E. X. F.; SCHULZE, M. D. Fake legal logging in the Brazilian Amazon. **Science Advances**, v. 4, n. eaat1192, p. 1–7, 2018.
 24. BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **Cadeia Produtiva de Madeira**. [s.l: s.n.]v. 62010–2012 p.
 25. BRITO, F. M. S.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; PAES, J. B.; BELINI, U. L.; TOMAZELLO-FILHO, M. Technological characterization of particleboards made with sugarcane bagasse and bamboo culm particles. **Construction and Building Materials**, v. 262, 2020.
 26. CABRAL, C. P. T.; PEREIRA, B. L. C.; DE CARVALHO, D. M.; OLIVEIRA, A. C.; VITAL, B. R.; GOMES, C. M.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito do tipo de chapa de partículas nas propriedades

- físicas e mecânicas. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 118–123, 2016.
27. CAMPOS, A. C. **Planted forests in Brazil covered 9.5 mi hectares in 2021**.
 28. CARVALHO, E. J. M. **Painéis particulados fabricados com casca de mamona e poliuretano à base de óleo de mamona**. 2023. Universidade de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-16052023-112317/publico/Eduardo_Junio_Menezes_Carvalho-versao_revisada.pdf>.
 29. CERCHIARI, A. M. F. **Aline Maria Faria Cerchiari Engenheira Química Aprimoramento do poliuretano a base de óleo de mamona na manufatura de Madeira Laminada Colada (MLC) de *Cupressus lusitanica*, *Corymbia maculata* e *Hevea brasiliensis***. [s.l: s.n.].
 30. CHAKRABORTY, I.; CHATTERJEE, K. Polymers and Composites Derived from Castor Oil as Sustainable Materials and Degradable Biomaterials: Current Status and Emerging Trends. **Biomacromolecules**, v. 21, n. 12, p. 4639–4662, dez. 2020.
 31. CHEN, Y.; TAI, W. Castor Oil-Based Polyurethane Resin for Low-Density Composites with Bamboo Charcoal. **Polymers**, v. 10, n. 10, p. 1100, 2018.
 32. CHENG, X.; LUO, Y.; GAO, Y.; LI, S.; XU, C.; TANG, S.; YANG, Y.; ZHANG, Z.; JIANG, H.; XU, H.; SHI, S.; YAN, Q. Surfactant-assisted alkaline pretreatment and enzymatic hydrolysis of *Miscanthus sinensis* for enhancing sugar recovery with a reduced enzyme loading. **Front Bioeng Biotechnol**, v. 10, 2022.
 33. CHUN, K. S.; YENG, C. M.; HUSSIENSYAH, S. Green Coupling Agent for Agro-Waste Based Thermoplastic Composites. **Polymer Composites**, 2016.
 34. CIASTOWICZ, Ż.; PAMUŁA, R.; BOBAK, Ł.; BIAŁOWIEC, A. Characterization of Vegetable Oils for Direct Use in Polyurethane-Based Adhesives: Physicochemical and Compatibility Assessment. 2025.
 35. COLSON, J.; PETTERSSON, T.; BERGLUND, L. Adhesion properties of regenerated lignocellulosic materials. **Composites Science and Technology**, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979718309470?via%3Dihub>>.
 36. DE CAMPOS, T.; DA CUNHA, M. O.; DE SOUSA, A. C. B.; TEIXEIRA, R. B.; RAPOSO, A.; SEBBENN, A. M.; WADT, L. H. O. Parâmetros do sistema reprodutivo em uma população de alta densidade de andirobas na Floresta Amazônica. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 48, n. 5, p. 504–509, 2013.
 37. DE OLIVEIRA, M. F.; MARENCO, R. A. Gas exchange, biomass allocation and water-use efficiency in response to elevated CO₂ and drought in andiroba (*Carapa surinamensis*, Meliaceae). **IForest**, v. 12, n. 1, p. 61–68, 2019.
 38. DE SOUSA, R. L.; SILVA, S. G.; COSTA, J. M.; DA COSTA, W. A.; MAIA, A. A. B.; DE OLIVEIRA, M. S.; ANDRADE, E. H. de A. Chemical profile of manually extracted andiroba oil (*Carapa guianensis* Aubl., Meliaceae) from Mamangal community, located in Igarapé-Miri, Pará, Brazil. **Scientia Plena**, v. 17, n. 12, p. 1–8, 2022.
 39. DE SOUZA FERREIRA, D. N.; CAMARGO, J. L. C.; FERRAZ, I. D. K. Do polyembryonic seeds of *carapa surinamensis* (Meliaceae) have advantages for seedling development? **Acta Amazonica**, v. 49, n. 2, p. 97–104, 2019.
 40. DE SOUZA, S. F.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C.; DA SILVA, L. F.; DUDECKI, L.

- EFFICIENCY OF ANDIROBA, COPAIBA AND JATROPHA OILS TO IMPROVE THE RESISTANCE OF *Pinus elliottii* WOOD TO WOOD-DECAY FUNGI. **Revista Arvore**, v. 44, p. 1–10, 2020a.
41. DE SOUZA, S. F.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C.; DA SILVA, L. F.; DUDECKI, L. Efficiency of andiroba, copaiba and jatropa oils to improve the resistance of *pinus elliottii* wood to wood-decay fungi. **Revista Arvore**, v. 44, p. 1–10, 2020b.
 42. DELVAUX, J. C.; MIGUEL, P. S. B.; OLIVEIRA, MARCELO NAGEM; VALÉRIO DEFRANCO, M. H. R.; BORGES; CAMARGO, R. de; CHAER, A. Efeito da sazonalidade e disponibilidade de recursos sobre comunidades microbianas em solo de floresta de eucalipto. v. 49, n. 130, p. 1–13, 2021.
 43. DEVIREDDY, S. B. R.; BISWAS, S. Effect of Fiber Geometry and Representative Volume Element on Elastic and Thermal Properties of Unidirectional Fiber-Reinforced Composites. **Journal of Composites**, v. 2014, p. 1–12, 2014.
 44. DHIR, Y. J. Natural Fibers: The Sustainable Alternatives for Textile and Non-Textile Applications. In: HAN-YONG-JEON. **Natural Fiber**. [s.l: s.n.]p. 208.
 45. DIAS, K. K. B.; CARDOSO, A. L.; DA COSTA, A. A. F.; PASSOS, M. F.; COSTA, C. E. F. da; ROCHA FILHO, G. N. da; ANDRADE, E. H. de A.; LUQUE, R.; NASCIMENTO, L. A. S. do; NORONHA, R. C. R. Biological activities from andiroba (*Carapa guianensis* Aublet.) and its biotechnological applications: A systematic review. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 16, n. 4, 2023.
 46. DOS SANTOS, L. de J.; ARAUJO, E. da S.; LORENÇO, M. S.; ROSÁRIO, B. B.; VIEIRA, S. B.; SALES, A.; SIVIERO, M. A.; MELO, L. E. de L.; MOTA, G. da S.; CAMPOLINA, G. A.; MORI, F. A. Characterization of the bark of *Protium tenuifolium* Engl. from the Amazonian biome as a source of natural antioxidants. **Holzforschung**, v. 78, n. 1, 2023. Disponível em: <<https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/hf-2023-0039/html>>.
 47. DURAM, J. A.; JÚNIOR, W. E. L.; PAVESI, M.; FIORELLI, J. Avaliação de painéis de média densidade de bagaço de cana-de-açúcar Assessment of medium density panels of sugarcane bagasse. p. 1–16, 2023.
 48. DUSEK, KAREL; SPIRKOVA, M. Reticulação e formação de redes em sistemas de poliuretano com excesso de isocianato. **Cellular Polymers**, v. 9, n. 2, p. 103–118, 1990. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/026248939000900201>>.
 49. DYARTANTI, E. R.; LESTARI, I. P.; PUTRA, M. I.; PRATIWI, U. I. Pretreatment Ethanol From Cellulosic. **EQUILIBRIUM Volume 3 No.1 July 2019**, v. 3, n. 1, 2019.
 50. EMMANUEL, O. U.; KUQO, A.; MAI, C. Non-Conventional Mineral Binder-Bonded Lignocellulosic Composite Materials: A Review. **BioResources**, v. 16, n. 2, p. 4606–4648, 2021.
 51. FALUDI, G.; DORA, G.; BALOGH, A.; OUTROS, O. PLA/lignocellulosic fiber composites: particle characteristics and performance. **Composites Part B**, 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.39902>>.
 52. FARIA, D. L.; GUIMARÃES, I. L.; SOUSA, T. B.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; MENDES, L. M.; JUNIOR, J. B. G. Technological properties of medium density particleboard produced with soybean pod husk and *Eucalyptus* wood. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 48, n. 126,

- p. 1–14, 2020.
53. FENG, J.; VENNA, S. R.; HOPKINSON, D. P. Interactions at the interface of polymer matrix-filler particle composites. **Polymer**, v. 103, n. 26, p. 189–195, 2016.
 54. FERRAZ, I. D. K.; CAMARGO, J. L. C.; SAMPAIO, P. de T. B. Sementes e plântulas de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl. e *Carapa procera* D. C.): Aspectos botânicos, ecológicos e tecnológicos. **Acta Amazonica**, v. 32, n. 4, p. 647–661, 2002.
 55. FERREIRA, S. de O. P. M.; FERREIRA JÚNIOR, J. A. M.; BRAZ, R. L.; O, O. Energy characterization of agricultural and forestry biomasses in the state of Pernambuco. **Ciencia Florestal**, v. 34, n. 3, p. 1–23, 2024.
 56. FIORELLI, J. Particulate Composite Based on Coconut Fiber and Castor Oil Polyurethane Adhesive: An Eco-Efficient Product. **Industrial Crops and Products**, v. 40, p. 69–75, 2012.
 57. FRANCA, C. S. S.; PERSSON, U. M.; DALTON, R. R.; CARDOSO, S.; DAMASCENO, C.; WARD, R. S.; SOUZA, C. M. Article Mapping the limits to timber traceability at origin : The case of Para II Mapping the limits to timber traceability ´ , Brazil at origin : The case of Para. **One Earth**, v. 8, n. 12, p. 101447, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101447>>.
 58. FRANKÓ, B.; CARLQVIST, K.; GALBE, M.; LIDÉN, G.; WALLBERG, O. Removal of Water-Soluble Extractives Improves the Enzymatic Digestibility of Steam-Pretreated Softwood Barks. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 184, n. 2, p. 599–615, 2018.
 59. GAMA, N.; FERREIRA, A.; BARROS-TIMMONS, A. Cure and Performance of Castor Oil Polyurethane Adhesive. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 95, p. 102413, 2019.
 60. GAMA, N. V.; FERREIRA, A.; BARROS-TIMMONS, A.; OUTRO, A. Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. 2018.
 61. GARCIA, R.; CALVEZ, I.; KOUBAA, A.; LANDRY, V.; CLOUTIER, A. Sustainability , Circularity , and Innovation in Wood - based Panel Manufacturing in the 2020s : Opportunities and Challenges. **Current Forestry Reports**, p. 420–441, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40725-024-00229-1>>.
 62. GIRIJAPPA, Y. G. T.; SANJAY MAVINKERE RANGAPPA; PARAMESWARANPILLAI, J.; SIENGCHIN, S. Natural Fibers as Sustainable and Renewable Resource for Development of Eco-Friendly Composites: A Comprehensive Review. **Front. Mater**, v. 6, 2019.
 63. GONÇALVES, G. G.; DIAS, L. D. Circular Economy of Medium Density Fiberboard (MDF) and Medium Density Particleboard (MDP): Challenges and Advances in Sustainability and Production Processes. **Fronteiras: Journal of Social, Techonological and Environmental Science**, v. 14, n. 3, p. 1–6, 2025.
 64. GONG, Z.; WU, xianggang W. D.; LEI, Z.; YANG, Q.; SHUAI, L. Recombination of agricultural residues into moldable composites. **Science Advances**, v. 11, n. 17, 2025.
 65. GORGUN, E.; ALI, A.; ISLAM, M. S. Biocomposites of Poly(Lactic Acid) and Microcrystalline Cellulose: Influence of the Coupling Agent on Thermomechanical and Absorption Characteristics. **ACS Omega**, v. 9, n. 10, p. 11523–11533, 2024.
 66. GREENE, J. P. Polymer Composites. In: **Automotive Plastics and Composites - Materials**

- and Processing.** [s.l: s.n.]p. 191–222.
67. HAN, H. C.; GONG, X. L.; ZHOU, M.; LI, C.; YANG, H. Bin. A study about silane modification and interfacial ultraviolet aging of hemp fiber reinforced polypropylene composites. **Polymer Composites**, v. 42, n. 5, p. 2544–2555, 2021.
 68. HAO, M.; WU, H.; QIU, F.; WANG, X. Interface bond improvement of sisal fibre reinforced polylactide composites with added epoxy oligomer. **Materials**, v. 11, n. 3, 2018.
 69. HIRANOBE, C. T.; GOMES, A. S.; PAIVA, F. F. G.; TOLOSA, G. R.; PAIM, L. L.; DOGNANI, G.; CARDIM, G. P.; CARDIM, H. P.; SANTOS, R. J. Sugarcane Bagasse : Challenges and Opportunities for Waste Recycling. **Clean Technologies**, v. 6, p. 662–699, 2024.
 70. HO, M. G. de C.; NASSIF, B. D.; SILVA, A. de M. da; BUENO, C. O. R.; GUEDES, V. S.; COUTO, C.; NUNES, E. H. M.; ALMEIDA, M. L. B. Plant Fiber Reinforced Polymeric Composites for Engineering Applications: A Review. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. e05116, 2024.
 71. HONG, T.; KANG, Y.; TIAN, P.; XUAN, F. Optimization of the mechanical performance of TDI-based polyurethanes via orthogonal design and response surface methodology. p. 22023–22034, 2025.
 72. HSISSOU, R.; SEGHIRI, R.; BENZEKRI, Z.; HILALI, M.; RAFIK, M.; ELHARFI, A. Polymer composite materials: A comprehensive review. **Composite Structures**, v. 262, p. 113640, 2021.
 73. HUBBE, M. A.; GRIGSBY, W. From nanocellulose to wood particles: A review of particle size vs. the properties of plastic composites reinforced with cellulose-based entities. **BioResources**, v. 15, n. 1, p. 2030–2081, 2020.
 74. HUNG, K.-C.; YEY, H.; YANG, T. C.; WU, T.-L.; XUE, J.-W.; JYH-HORNG WU. Characterization of wood–plastic composites made with agricultural residues. **Construction and Building Materials**, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/9/12/726>>.
 75. IGLESIAS-CARRASCO, M.; TORRES, J.; CRUZ-DUBON, A.; CANDOLIN, U.; WONG, B. B. M.; VELO-ANT, G. Global impacts of exotic eucalypt plantations on wildlife. v. 1743, p. 1734–1753, 2025.
 76. INKOTTE, J.; BOMFIM, B.; BRUNO, M.; VALAD, X.; GATTO, A.; SANTOS, J. A.; PEREIRA, R. S. Changes in Land Use through Eucalyptus Plantations Impact Soil Fauna Communities in Brazilian Savannas. p. 1–14, 2024.
 77. JESSON, D. A.; WATTS, J. F. The Interface and Interphase in Polymer Matrix Composites: Effect on Mechanical Properties and Methods for Identification. **Polymer Reviews**, v. 52, n. 3, p. 321–354, 2012.
 78. JIN, X.; ZHANG, X.; XU, C.; NIE, S. Effect of bamboo fibers with different coupling agents on the properties of poly(hydroxybutyrate-co-valerate) biocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 20, p. 1–8, 2019.
 79. KABIR, M. M.; WANG, H.; LAU, K. T.; CARDONA, F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 7, p. 2883–2892, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>>.

80. KAIKADE, D. S.; SABNIS, A. S. Polyurethane foams from vegetable oil - based polyols : a review. **Polymer Bulletin**, v. 80, n. 3, p. 2239–2261, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00289-022-04155-9>>.
81. KELLY, M. W. **Critical Literature Review of Relationships Between Processing Parameters and Physical Properties of Particleboard**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fplgtr10.pdf>>.
82. KHUNCHIT, K.; NITAYAVARDHANA, S.; RAMARAJ, R.; PONNUSAMY, V. K.; UNPAPROM, Y. Liquid hot water extraction as a chemical-free pretreatment approach for biobutanol production from *Cassia fistula* pods. **Fuel**, v. 279, n. March, 2020.
83. KIM, S. H.; KIM, B. K.; HO, L. Effect of Isocyanate Index on the Properties of Rigid Polyurethane Foams Blown by HFC 365mfc. v. 16, n. 5, p. 467–472, 2008.
84. KLIMAS, C. A.; DE OLIVEIRA WADT, L. H.; DE CASTILHO, C. V.; LIRA-GUEDES, A. C.; DA COSTA, P.; DA FONSECA, F. L. Variation in Seed Harvest Potential of *Carapa guianensis* Aublet in the Brazilian Amazon: A Multi-Year, Multi-Region Study of Determinants of Mast Seeding and Seed Quantity. **Forests**, v. 12, n. 6, 2021.
85. KONG, X.; LIU, G.; CURTIS, J. M.; CVB, H.; GHJJ.TYHTH. International Journal of Adhesion & Adhesives Characterization of canola oil based polyurethane wood adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, n. 6, p. 559–564, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.05.004>>.
86. LAM, M. Q.; OATES, N. C.; THEVARAJOO, S.; TOKIMAN, L.; GOH, K. M.; MCQUEEN-MASON, S. J.; BRUCE, N. C.; CHONG, C. S. Genomic analysis of a lignocellulose degrading strain from the underexplored genus *Meridianimaribacter*. **Genomics**, v. 112, n. 1, p. 952–960, 2020.
87. LASKOWSKA, A. Characteristics of the Pressing Process and Density Profile of MUPF-Bonded Particleboards Produced from Waste Plywood. **mdpi**, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/17/22/3082>>.
88. LEE, C. H.; KHALINA, A.; LEE, S. H. Importance of interfacial adhesion condition on characterization of plant-fiber-reinforced polymer composites: A review. **Polymers**, v. 13, n. 3, p. 1–22, 2021.
89. LEE, H. S.; CHEN, L. W.; ANTOV, P.; KRISTAK, L.; TAHIR, P. Engineering Wood Products from *Eucalyptus* spp . v. 2022, 2022.
90. LI, X.; TABIL, Æ. L. G.; PANIGRAHI, Æ. S.; ADR, A. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites : A Review. p. 25–33, 2007.
91. LISÝ, A.; HÁZ, A.; NADÁNYI, R.; JABLONSKÝ, M.; ŠURINA, I. About Hydrophobicity of Lignin: A Review of Selected Chemical Methods for Lignin Valorisation in Biopolymer Production. **Energies**, v. 15, n. 17, 2022.
92. LOUISE, B.; DECKER, A.; FONTELES, V.; FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Sustainable Food Technology Green extraction technologies for valorising Brazilian agri-food waste. **Sustainable Food Technology**, v. 4, p. 62–88, 2026.
93. LUO, S.; GAO, L.; GUO, W.; FU. EFFECT OF FACE LAYER MANIPULATION ON THE DENSITY PROFILE AND PROPERTIES OF LOW DENSITY. v. 65, n. 1, p. 125–134, 2020.

94. MA, Y.; R, W.; Q, L.; M, L.; C, L.; P, J. Castor oil as a platform for preparing bio-based chemicals and polymer materials. **Green Materials**, v. 10 No. 3 p, 2022. Disponível em: <<https://www.emerald.com/jgrma/article-abstract/10/3/99/441130/Castor-oil-as-a-platform-for-preparing-bio-based?redirectedFrom=fulltext>>.
95. MAQUINÉ, A. B.; SANTOS, G. M. dos; GIACON, V. M.; FERREIRA, J. C. E. Wood sawdust residues from the Amazon: a sustainable alternative for panel production. **Ambiente Construído**, v. 25, p. 1–13, 2025.
96. MARCUELLO, C.; FOULON, L.; OTHERS, O.; OTHOERS, I. Atomic force microscopy reveals how relative humidity impacts lignocellulosic materials. **Scientific Reports**, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813019363032?via%3Dihub>>.
97. MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos: fundamentos, tecnologia e aplicações**. [s.l: s.n.]
98. MAXIMO, Y. I.; HASSEGAWA, M.; VERKERK, P. J. Forest Bioeconomy in Brazil : Potential Innovative Products from the Forest Sector. **Land**, 2022.
99. MAZZANTI, V.; MOLLICA, F.; KISSI, N. El. Rheological and Mechanical Characterization of Polypropylene-Based Wood Plastic Composites. **Polymer Composites**, 2015.
100. MEDEIROS, P. A. de; SANTOS, R. B. dos; NASCIMENTO, M. Q. do; GONÇALVES, L. U.; AFFONSO, E. G. Composição Proximal E Tempo De Prateleira Da Torta De Andiroba Carapa Guianensis Em Diferentes Condições De Armazenamento. **I Workshop Nacional sobre Tecnologia de Bioflocos na Amazônia**, p. 89908, 2021.
101. MENDONÇA, M. C. de; FERREIRA, L. M. M. Aspectos econômicos da cadeia produtiva da extração artesanal e comercialização do óleo de andiroba (*Carapa guianensis*) em comunidade rural no estado do Amazonas. **Anais da XV Jornada de Iniciação Científica da Embrapa Amazônia Ocidental**, p. 130, 2019.
102. MICHELOTTI, G.; NIEDZWIECKI, M.; BIDJAN, D.; DIECKMANN, P.; DEARI, S.; ATTIN, T.; TAUBÖCK, T. T. Silane effect of universal adhesive on the composite-composite repair bond strength after different surface pretreatments. **Polymers**, v. 12, n. 4, p. 1–11, 2020.
103. MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; CADEMARTORI, P. H. G. de; BERGER, C.; MAGALHÃES, W. L. E.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; PETUTSCHNIGG, A.; TOND, G. Impact of Tannin as Sustainable Compatibilizer for Wood-Polypropylene Composites. **Polymers and Polymer Composites**, v. 16, n. 2, 2017.
104. MORAIS, W. W. C.; BRITO, J. O.; LANA, A. Q.; DIAS, A. F.; MORAIS, J. B. F. Investigating waste generated from logging in the Amazon for energy use. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 49, n. 132, p. 1–13, 2021.
105. MUÑOZ, S. S.; ROCHA BALBINO, T.; MIER ALBA, E.; GONÇALVES BARBOSA, F.; TONET DE PIER, F.; LAZUROS MOURA DE ALMEIDA, A.; HELENA BALAN ZILLA, A.; ANTONIO FERNANDES ANTUNES, F.; TERÁN HILARES, R.; BALAGURUSAMY, N.; CÉSAR DOS SANTOS, J.; SILVÉRIO DA SILVA, S. Surfactants in biorefineries: Role, challenges & perspectives. **Bioresource Technology**, v. 345, n. October 2021, 2022.
106. MURAYAMA, K.; KUKITA, K.; KOBORI, H.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S.; MIYAMOTO, K. Effect of face-layer moisture content and face–core–face ratio of mats on the temperature and vapor pressure behavior during hot-pressing of wood-based panel manufacturing. **Journal of Wood**

- Science**, v. 67, n. 1, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s10086-021-01974-8>>.
107. MUTLU, H.; MEIER, M. A. R. Castor Oil as a Renewable Resource for the Chemical Industry. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 112, n. 1, p. 10–30, 2010.
108. NAJAH, A.; AGUADO, R. J.; QUIM TARRÉS; BOUFI, S.; DELGADO-AGUILAR, M. Harvesting value from agricultural waste: dimensional stability and performance. **Journal of Cleaner Production**, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669023011019?via%3Dihub>>.
109. NAKAMURA, T.; TABUCHI, H.; HIRAI, T.; FUJII, S.; NAKAMURA, Y. Effects of silane coupling agent hydrophobicity and loading method on water absorption and mechanical strength of silica particle-filled epoxy resin. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 17, p. 1–11, 2020.
110. NATALLI, L. H.; HILLIG, E.; DE SOUZA, J. B.; DE SOUSA VIDAL, C. M.; SALDANHA, L. K. By-Products of the Timber Industries as Raw-Material for the Production of MDP (Medium Density Particleboard). **Floresta e Ambiente**, v. 29, n. 3, 2022.
111. NAVARRETE, P.; MANSOURI, HR, P.; A., T.-L.; S., B.-M.; B., PASCH, H., & RIGOLET, S. Adesivos para painéis de madeira a partir de lignina e tanino de baixa massa molecular sem resinas sintéticas. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 24 (8–10), p. 1597–1610., 2010. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/permissions/10.1163/016942410X500972?scroll=top>>.
112. NOURI, L.; AZZEDINE, B.; NADIR, D.; MELOUKI AZZEDINE; YAKOUT, A. Study of the mechanical Behavior of a composite material reinforced with stipa tenacissima fibers. **International Journal of Professional Business Reviews**, v. 10, n. 2, p. e05316, 2025.
113. NYAMBO, C.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Effect of maleated compatibilizer on performance of PLA/wheat straw-based green composites. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 296, n. 8, p. 710–718, 2011.
114. OJO, A. O. An Overview of Lignocellulose and Its Biotechnological Importance in High-Value Product Production. 2023.
115. ORTEGA, F.; VERSINO, F.; LÓPEZ, O. V.; GARCÍA, M. A. **Biobased composites from agro-industrial wastes and by-products**. [s.l.] Springer International Publishing, 2022. v. 5873–921 p.
116. PADRINO, B.; LARA-SERRANO, M.; MORALES-DELAROSA, S.; CAMPOS-MARTÍN, J. M.; GARCÍA FIERRO, J. L.; MARTÍNEZ, F.; MELERO, J. A.; PUYOL, D. Resource recovery potential from lignocellulosic feedstock upon lysis with ionic liquids. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 6, n. SEP, p. 1–13, 2018. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2018.00119/full>>.
117. PAPADOPOULOS, A. N. Advances in wood composites iii. **Polymers**, v. 13, n. 1, p. 1–3, 2021.
118. PARK, S.-J.; SEO, M.-K. Types of Composites. In: ELSEVIER. **Interface Science and Technology**. [s.l.: s.n.]p. 501–629.
119. PATEL, M. R.; SHUKLAB, J. M.; PATELB, N. K.; PATEL, K. H. Biomaterial Based Novel Polyurethane Adhesives for Wood to Wood and Metal to Metal Bonding. v. 12, n. 4, p. 385–393, 2009.

120. PERES, T. L. C.; ARAMBURU, A. B.; PEREIRA ACOSTA, A.; MISSIO, A. L. M.; MAHBUBE, S.; RAFAEL DE AVILA, D. Polyurethane Adhesives for Wood Based on a Simple Mixture of Castor Oil and Crude Glycerin. 2023.
121. PETROVIC, M. V.; CRACIUN, F.; CORDERO, F.; MERCADELLI, E.; ILIC, N.; DESPOTOVIC, Z.; BOBIC, J.; DZUNUZOVIC, A.; GALASSI, C.; STAGNARO, P.; CANU, G.; BUSCAGLIA, M. T.; BRUNENGO, E. Advantages and limitations of active phase silanization in PVDF composites: Focus on electrical properties and energy harvesting potential. **Polymer Composites**, v. 45, n. 5, p. 4428–4446, 2024.
122. PHAM, Q. Investigation of the effects of raw material density on particleboard properties. <https://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/14437>, 2023. Disponível em: <<https://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/14437>>.
123. PHAM VAN, T.; SCHÖPPER, C.; KLÜPPEL, A.; MAI, C. Effect of wood and panel density on the properties of particleboard. **Wood Material Science & Engineering**, v. 16, n. 4, p. 237–245, 2019. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17480272.2019.1705906>>.
124. PIEKARSKI, C. M.; CARLOS, A.; FRANCISCO, D.; MENDES, L.; LUIZ, J.; APARECIDO, D.; SILVA, L. Science of the Total Environment Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. **Science of the Total Environment**, The, v. 575, p. 103–111, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.007>>.
125. PIEKARSKI, C. M.; FRANCISCO, A. C. De; MENDES, L.; ALVARENGA, H. D. P.; VITORIA, J.; BITTENCOURT, M. Description of production process and system boundary Data collection , data quality analysis and calculations procedures. **CERNE**, v. v. 20 n. 3, p. 409–418, 2014.
126. PIRES, E. N. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. 2009. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
127. PROCIAK, A.; ROJEK, P.; PAWLIK, H. Flexible Polyurethane Foams Modified with Natural Oil-Based Polyols. **Journal of Cellular Plastics**, v. 48, n. 6, p. 489–499, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0021955X12446210>>.
128. QASIM, U.; ALI, M.; ALI, T.; IQBAL, R.; JAMIL, F. Biomass derived Fibers as a Substitute to Synthetic Fibers in Polymer Composites. **ChemBioEng Reviews**, v. 7, n. 6, p. 193–215, 2020.
129. RABELO APARÍCIO, R.; MACHADO DOS SANTOS, G.; SIQUEIRA MAGALHÃES REBELO, V.; MANSANARES GIACON, V.; GOMES DA SILVA, C. Performance of castor oil polyurethane resin in composite with the piassava fibers residue from the Amazon. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 1–13, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-024-54000-4>>.
130. RAHMAN, R.; PUTRA, S. Z. F. S. Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites. In: PUBLISHING, W. **Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites**. [s.l: s.n.]p. 81–102.
131. RAO, J.; ZHOU, Y.; FAN, M. Revealing the interface structure and bonding mechanism of coupling agent treated WPC. **Polymers**, v. 10, n. 3, p. 1–13, 2018.
132. RATHIKA, K.; DAVID, S. B. Effect of increasing NCO/OH molar ratio on the chemical and mechanical properties of isocyanate terminated polyurethane prepolymer derived from bio-

- mass. **Green Chemistry & Technology Letters**, v. 2, n. 2, p. 78–82, 2016. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2025/ra/d5ra02295a>>.
133. RIBEIRO, Ú. A.; QUEIROZ, L. C.; MARASSI, A. G.; CARVALHO, A. S.; BARROS, G. A.; CONSALTER, D. M.; BEZERRA, J. A.; SANTOS, A. D. C.; COLNAGOD, L. A.; MACHADO, M. B. Development of a TD-NMR Method to Monitor Brazil Nuts Oil Content: A Green and Low-Cost Based Approach. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 32, n. 7, p. 1405–141, 2021.
 134. 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**, v. 26, p. e20220594, 2023.
 135. RODRIGUES, J. M. E. **Preparação de poliuretana à base de óleo de mamona**. 2005. Universidade Federal do Rio de Grande do Norte, 2005.
 136. RODRÍGUEZ-FABIÀ, S.; TORSTENSEN, J.; JOHANSSON, L.; SYVERUD, K. **Hydrophobization of lignocellulosic materials part II: chemical modification**. [s.l.] Springer Netherlands, 2022. v. 298957–8995 p.
 137. RODRIGUEZ, L. M.; FERNÁNDEZ, M. B.; PÉREZ, E. E.; CRAPISTE, G. H. Performance of Green Solvents in the Extraction of Sunflower Oil from Enzyme-Treated Collets. **European Journal of Lipid Science and Technology**, 2020.
 138. ROLPH, M. S.; MARKOWSK, A. L. J.; WARRINER, C. N.; O'REILLY, R. K. Blocked isocyanates: from analytical and experimental considerations to non-polyurethane applications. **Polymer Chemistry**, v. 7, p. 7351–7364, 2016.
 139. ROSSI, L.; MICCIO, L. A.; CIANNAMEA, E. M.; STEFANI, P. M. From Agricultural Residues to Sustainable Boards: Complex Network Analysis of Binderless Composites. **Polymers**, v. 17, n. 22, p. 1–30, 2025.
 140. RUFINO, J. P. F.; CARNEIRO, S. B.; CHAVES, F. A. de L.; MENDONÇA, M. A. de F.; SILVA JUNIOR, J. L. da; COSTA NETO, P. de Q. **Diagnóstico produtivo e econômico da cadeia produtiva do óleo de andiroba no Amazonas** Observatório De La Economía Latinoamericana 2024.
 141. SALDANHA, S.; IWAKIRI, L. . Influência da densidade e do tipo de resina nas propriedades tecnológicas de painéis OBS. n. 2000, p. 571–576, 2008. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/15356/10315>>.
 142. SAMANT, B. S.; KALIAPPAN, R. The use of surfactants in the extraction of active ingredients from natural resources: a comprehensive review. **RSC Advances**, v. 15, n. 29, p. 23569–23587, 2025.
 143. SAMPAIO, T. Q. S.; LIMA, S. B.; PIRES, C. A. M.; L, K. Influence of extractives on the composition of bio-oil from biomass pyrolysis – A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 186, n. October 2024, p. 106919, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106919>>.
 144. SANTOS, E. B. C.; MORENO, C. G.; BARROS, J. J. P.; DE MOURA, D. A.; DE CARVALHO FIM, F.; RIES, A.; WELLEN, R. M. R.; DA SILVA, L. B. Effect of alkaline and hot water treatments on the structure and morphology of piassava fibers. **Materials Research**, v. 21, n.

- 2, p. 1–11, 2018.
145. SANTOS, J.; PEREIRA, J.; ESCOBAR-AVELLO, D.; FERREIRA, I.; VIEIRA, C.; MAGALHÃES, F. D.; MARTINS, J. M.; CARVALHO, L. H. Grape Canes (*Vitis vinifera* L.) Applications on Packaging and Particleboard Industry: New Bioadhesive Based on Grape Extracts and Citric Acid. **Polymers**, v. 14, n. 6, 2022.
 146. SAPSRITHONG, P.; PUKSATTEE, K.; SAEWJAIDEE, K.; PENSUK, N.; RATTANAPAN, A. The influence of fiber surface treatment and SBR as impact modifier on rheological behavior and mechanical properties of wood plastic composite from acrylate-styrene-acrylonitrile and bagasse. **Key Engineering Materials**, v. 737 KEM, p. 281–286, 2017.
 147. SCATOLINO, M. V.; BUFALINO, L.; DIAS, M. C.; MENDES, L. M.; DA SILVA, M. S.; TONOLI, G. H. D.; DE SOUZA, T. M.; JUNIOR, F. T. A. Copaiba oil and vegetal tannin as functionalizing agents for açaí nanofibril films: valorization of forest wastes from Amazonia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 44, p. 66422–66437, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-022-20520-7>>.
 148. SCI, K. J. W.; KORAI, H. Difficulty of internal bond prediction of particleboard using the density profile. **Journal of Wood Science**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s10086-021-01994-4>>.
 149. SEIBEL, R. K.; ZIMMER, A.; FIORIO, R. Development and Characterization of Novel Castor Oil-Based Polyurethane Composites Containing Wood Sawdust and Rubber Tire Powder. **Polymers and Polymer Composites**, v. 29, n. 7, p. 876–887, 2021.
 150. SHADHIN, M.; TISHA, N. J.; DULAL, M.; JAYARAMAN, R.; RAHMAN, M. Adhesion chemistry of plant-based cellulosic fibers and polymeric matrices in composites: a review. **RSC Advances**, v. 16, n. 7, p. 6132–6163, 2026.
 151. SIDERIDIS, E.; THEOTOKOGLU, E. E.; GIANNOPOULOS, I.; AST, O. Analytical and computational study of the moduli of fiber-reinforced composites and comparison with experiments. **Composite Interfaces**, v. 22, n. 7, p. 563–578, 2015. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09276440.2015.1055180>>.
 152. SILVA, B.; LUCCAS, R. F.; NEMES, N. M.; HANKO, J.; OSORIO, M. R.; KULKARNI, P.; MOMPEAN, F.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, M.; RAMOS, M. A.; VIEIRA, S.; SUDEROW, H. Superconductivity and magnetism on flux-grown single crystals of NiBi 3. **Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics**, v. 88, n. 18, nov. 2013.
 153. SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Applications of Lignocellulosic Fibers in Polymer Chemistry and in Composites. **Quimica Nova**, v. 32, n. 3, p. 661–671, 2009.
 154. SILVA, S. G.; NUNOMURA, R. de C. S.; NUNOMURA, S. M.; ETS, I. Limonoides isolados dos frutos de *Carapa guianensis* Aublet (Meliaceae). **Quimica Nova**, v. 35, n. 10, p. 1936–1939, 2012.
 155. SINGHA, A. S.; THAKUR, V. K. Morphological, Thermal, and Physicochemical Characterization of Surface Modified Pinus Fibers. **International Journal of Polymer Analysis and Characterization**, v. 14, n. 3, p. 271–289, 2009. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10236660802666160>>.
 156. SIQUEIRA, M. U.; CONTIN, B.; FERNANDES, P. R. B.; RUSCHEL-SOARES, R.; SIQUEIRA,

- P. U.; BARUQUE-RAMOS, J. Brazilian Agro - industrial Wastes as Potential Textile and Other Raw Materials : a Sustainable Approach. 2022.
157. SOMARATHNA, H. M. C. C.; RAMAN, S. N.; MOHOTTI, D.; MUTALIB, A. A.; BADRI, K. H. The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications : A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 995–1014, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.166>>.
 158. SOUZA, L. V.; DE JESUS DOS SANTOS, L.; FERREIRA, L. P.; DA SILVA ARAUJO, E.; LORENÇO, M. S.; VIEIRA, S. B.; SALES, A.; SIVIERO, M. A.; ROSÁRIO, B. B.; DA SILVA MOTA, G.; MORI, F. A.; DE LIMA MELO, L. E. Potential of the stem bark of *Bagassa guianensis* Aubl. from sustainable forest management in the Brazilian Amazon as a raw material for biorefineries. **Industrial Crops and Products**, v. 227, n. March, 2025.
 159. SUN, Z. Hyperbranched Polymers in Modifying Natural Plant Fibers and Their Applications in Polymer Matrix Composites—A Review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 67, n. 32, 2019.
 160. TAQUETTI, V. B.; SILVA, V. V.; CHAVES, I. L. S.; OLIVEIRA, R. G. E.; MAFFIOLETTI, F. D.; FERREIRA, G.; MENDONÇA, J. P. C.; SILVA, E. S. G.; GONÇALVES, F. G. Performance of eucalypt particleboard with the addition of residues. **Heliyon**, v. 9, n. 12, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023099681?via%3Dihub>>.
 161. TEIXEIRA, M. Z.; TEREZO, R. F.; ALVES, C.; SANTOS, S.; VIEIRA, H. C.; BAYESTORFF, A. Brazilian Potential of *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage for Cross-Laminated Timber Panels : Structural Analysis and Comparison with *Pinus* spp . and European Standards. p. 1–19, 2025.
 162. TÉRAUBE, O.; AGOPIAN, J.-C.; PUCCI, M.; LIOTIER, P.-J.; CONCHON, P.; BADEL, É.; GARREAU, S. H.; LELEU, H.; BAYLAC, J.; BATISSE, N.; CHARLET, K.; DUBOIS, M. Optimization of interfacial adhesion and mechanical performance of flax fiber-based eco-composites through fiber fluorination treatment. **Composites Part B: Engineering**, v. 296, n. 1, p. 112228., 2025.
 163. TESSERA, G. M.; HABTU, N. G.; ABERA, M. K.; O, D. Process Optimization for Aqueous Ethanosolv Pretreatment of Coffee Husk Biomass Using Response Surface Methodology. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 2, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2257886>>.
 164. TRAN, L. Q. N.; YUAN, X. W.; BHATTACHARYYA, D.; FUENTES, C.; VUURE, A. W. Van; VERPOEST, I. Fiber-matrix interfacial adhesion in natural fiber composites. **International Journal of Modern Physics B**, v. 29, n. 10, p. 1540018, 2015.
 165. TRAN, T. T. A.; LE, T. K. P.; MAI, T. P.; NGUYEN, D. Q. **Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass**. [s.l: s.n.]
 166. TSUJIMOTO, A.; BARKMEIER, W. W.; TAKAMIZAWA, T.; LATTA, M. A.; MIYAZAKI, M. Bonding performance and interfacial characteristics of short fiber-reinforced resin composite in comparison with other composite restoratives. **European Journal of Oral Sciences**, v. 124, n. 3, p. 301–308, 2016.
 167. VARANDA, L. D. Physical Performance of Particleboards Using Castor Oil-Based Adhesive.

- Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 707–712, 2018.
168. VENKATARAJAN, S.; SUBBU, C.; ATHIJAYAMANI, A.; MUTHURAJA, R. Mechanical properties of natural cellulose fibers reinforced polymer composites - 2015-2020: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 1017–1024, 2021.
 169. VUKOVIĆ, J. P.; TIŠMA, M. The role of NMR spectroscopy in lignocellulosic biomass characterisation: A mini review. **Food Chemistry Molecular Science**, v. 22, n. 9, p. 100219, 2024.
 170. WANG, D.; TANG, Z.; HUANG, R.; LI, H.; ZHANG, C.; GUO, B. Inverse Vulcanization of Vinyltriethoxysilane: A Novel Interfacial Coupling Agent for Silica-Filled Rubber Composites. **Macromolecules**, v. 55, n. 19, p. 8485–8494, 2017a.
 171. WANG, Z.; KANG, H.; ZHANG, W.; ZHANG, S.; LI, J. Improvement of Interfacial Adhesion by Bio-Inspired Catechol-Functionalized soy protein with Versatile Reactivity: Preparation of fully utilizable Soy-Based Film. **Polymers**, v. 9, n. 3, 2017b.
 172. WEBER, C.; IWAKIRI, S. UTILIZATION OF WASTE OF PLYWOOD, MDF AND MDP FOR THE PRODUCTION OF PARTICLEBOARDS. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 02, p. 405–413, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cflo/a/WxHZmKQWPTrLqVNphsp76Tr/?format=pdf&lang=pt>>.
 173. WOMELDORF, R. **How MDF is Made & Tips For Working With It**.
 174. XUECHONG, W. Research Progress of Straw Fiber Reinforced Cementitious Composites. **Advances in Research**, v. 26, n. 2, p. 398–405, 2025.
 175. YANG, J.; CHING, Y. C.; CHUAH, C. H. Applications of Lignocellulosic Fibers and Lignin in Bioplastics: A Review. **Polymers**, v. 11, n. 751, 2019.
 176. YAO, Z.; LIANG, Y.; ZHAN, P.; SHAO, L.; WU, Z. Effect of Surfactant on Pseudo-Lignin Formation. **BioResources**, v. 19, n. 2, p. 2714–2723, 2024.
 177. YILGÖR, I.; YILGÖR, E.; WILKES, G. L. Critical parameters in designing segmented polyurethanes and their effect on morphology and properties: A comprehensive review. **Polymer**, v. 58, p. A1–A36, 2015.
 178. YOO, C. G.; MENG, X.; PU, Y.; RAGAUSKAS, A. J. The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: A comprehensive review. **Bioresource Technology**, v. 301, n. January, p. 122784, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122784>>.
 179. ZALDIVAR, R. J.; STECKEL, G. L.; NOKES, J. P.; MORGAN, B. A.; KIM, H. I. Characterization of atmospheric plasma as a surface preparation process for the bonding of space composite materials. **Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 49, n. 3, p. 171–178, 2014.
 180. ZHAO, S.; HU, F.; LI, L.; CAO, Y.; GAO, H.; YANG, X.; XU, H. Evaluation of properties of wood-plastic composites made with different residues. **Materials Today Communications**, 2024. Disponível em: <<https://www.woodresearch.sk/cms/evaluation-of-properties-of-wood-plastic-composites-made-from-seven-types-of-lignocellulosic-fibers/>>.
 181. ZHAO, Z.; UMEMURA, K. Investigation of a new natural particleboard adhesive composed of tannin and sucrose. **Journal of Wood Science**, v. 60, n. 4, p. 269–277, 2014.
 182. ZWIRZITZ, A.; ALTEIO, L.; SULZENBACHER, D.; ATANASOFF, M.; SELG, M. Ethanol

production from wheat straw hydrolysate by *Issatchenkia orientalis* isolated from waste cooking oil. **Journal of Fungi**, v. 7, n. 2, p. 1–12, 2021.

Apêndice

IMPERVEG® AGT 1315

Descrição

IMPERVEG® AGT 1315 é uma resina a base de poliuretano vegetal (originado do óleo de mamona) com função adesiva e matriz aglomerante, bicomponente, 100% sólido (isento de solventes), biodegradável e compostável não liberando vapores tóxicos, formulado pela mistura a frio de um pré-polímero (componente A) e um poliol (componente B), resultando em polímeros com diferentes características, de excepcional estabilidade físico-química, elasticidade, impermeabilidade.

Propriedades

IMPERVEG® AGT 1315 apresenta excelente resistência à ação do intemperismo e águas contendo substâncias agressivas como sais, ácidos e álcalis.

Os compósitos obtidos com esta resina apresentam as seguintes características:

- Alta durabilidade;
- Grande resistência aos raios ultravioleta;
- Estanqueidade a líquidos e gases;
- Excelente penetração nos poros da superfície, garantindo uma boa aderência;
- Não apresenta retração volumétrica após a cura.

Campos de Aplicação

Utilizado como adesivo e aglomerante para formação de compósitos com fibras vegetais, pó de serragem de madeiras, inservíveis e outros.

IMPERVEG® AGT 1315 é fornecido em dois componentes (A + B) que devem ser misturados na proporção de 1:1,5 (uma parte do componente A + uma parte e meia do componente B, em volume respectivamente. EX: 100 ml A + 150 ml B, ou 1:1,2 em peso. EX: 100 gramas do A + 120 gramas B. Após a mistura o tempo de trabalho (pot life) gira em torno de 15 minutos, quando a resina entra no ponto de gel dificultando o manuseio do material, gerando consequentemente perdas. É recomendada inicialmente a mistura de pequenas quantidades.

Características

- Consistência: fluída
- Cor após cura: âmbar;
- Liberação de elementos tóxicos: isento
- Secagem ao Toque: 60 a 90 minutos dependendo da temperatura ambiente
- tempo mínimo de retirada do molde a temperatura ambiente: 2 horas
- Tempo de cura e manuseio: 24 horas

Rendimento

Varia de 10 a 50 % em relação à massa do material a ser utilizado, dependendo das características e resistências mecânicas que se queira dar ao compósito. Vale lembrar que as propriedades mecânicas da peça variam em função da porcentagem a ser utilizada e da carga a ser exercida. Caberá ao interessado a definição da porcentagem e carga para definir as características que pretenda dar ao seu compósito.

Acondicionamento e estocagem do IMPERVEG® AGT 1315

O produto deve ser estocado dentro de sua embalagem original, evitar grandes oscilações de temperatura e conservar as embalagens fechadas, nestas condições, o produto pode ser conservado por 12 (doze) meses, sem alterações de suas propriedades.

IMPORTANTE

As informações fornecidas nesta literatura objetivam apenas orientar os interessados. Não assumimos, entretanto, qualquer responsabilidade pelo uso incorreto do produto ou dessas informações.

OBS: Recomendamos que se utilize luvas de borracha quem for manipular o produto.