

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**GUILHERME QUEIROZ VIEIRA**

**PAINÉIS AGROINDUSTRIAIS DESENVOLVIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS  
DA COROA DO ABACAXI COM RESINA DE POLIURETANA À BASE DO  
ÓLEO DE MAMONA**

**Manaus  
2025**

**GUILHERME QUEIROZ VIEIRA**

**PAINÉIS AGROINDUSTRIAIS DESENVOLVIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA  
COROA DO ABACAXI COM RESINA DE POLIURETANA À BASE DO ÓLEO DE  
MAMONA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de bacharelado em  
Engenharia de Materiais, da Universidade do  
Estado do Amazonas como pré requisito para  
a obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antônio de Lima Mesquita

**Manaus-Am**

**2025**

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

V657p

Vieira, Guilherme Queiroz

PAINÉIS AGROINDUSTRIAIS DESENVOLVIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA COROA DO ABACAXI COM RESINA DE POLIURETANO À BASE DO ÓLEO DE MAMONA. / Guilherme Queiroz Vieira. Manaus : [s.n], 2025.

44 f.: color.; 21.0 cm.

TCC - Graduação em Engenharia de Materiais- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2025.

Inclui Bibliografia.

Orientador: Antônio de Lima Mesquita.

1. Painéis Compósitos. 2. Fibras Naturais. 3. Coroa do abacaxi. 4. Poliuretano Vegetal. 5. Sustentabilidade. I. Antônio de Lima Mesquita (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título

CDU(1997)66.03



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS**  
**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**TERMO DE APROVAÇÃO**

**GUILHERME QUEIROZ VIEIRA**

**PAINÉIS AGROINDUSTRIAIS DESENVOLVIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA  
COROA DO ABACAXI COM RESINA DE POLIURETANA À BASE DO ÓLEO DE  
MAMONA**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para a obtenção do  
Título de Bacharel em Engenharia de Materiais, Escola Superior de Tecnologia,  
Universidade do Estado do Amazonas, pela seguinte banca examinadora:

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente



**ANTONIO DE LIMA MESQUITA**

Data: 09/12/2025 12:48:26-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Antônio de Lima Mesquita – Orientador  
Universidade do Estado do Amazonas - UEA/EST

Documento assinado digitalmente



**JOAO CARLOS MARTINS DA COSTA**

Data: 04/12/2025 21:23:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. João Carlos Martins da Costa – Membro da banca  
Universidade Federal do Amazonas – UFAM

---

Prof. Me. Ronaldo Pimentel Mannarino – Membro da banca  
Universidade do Estado do Amazonas – UEA/ EST

Documento assinado digitalmente



**ANTONIO DE LIMA MESQUITA**

Data: 09/12/2025 11:22:05-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Manaus, 24 de novembro de 2025

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me concedeu discernimento, força e perseverança para enfrentar os desafios acadêmicos e concluir meus estudos. Sem Sua orientação e proteção, esta jornada teria sido muito mais difícil, e sou grato por ter encontrado em cada etapa motivos para seguir adiante.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo constantes. Obrigado por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que as dificuldades pareciam maiores e por sempre me motivarem a buscar meus objetivos com determinação. O amor e a confiança de vocês foram essenciais para que eu pudesse finalizar este curso.

À minha namorada, Pollyana dos Santos Pereira, por ser fonte constante de inspiração e apoio. Obrigado por me tornar uma pessoa melhor, por estar ao meu lado em momentos de dúvida e desafio, e por compartilhar comigo cada conquista e aprendizado. À minha irmã, Luiza Queiroz, pelo carinho, incentivo e por sempre acreditar no meu potencial. A presença e o apoio de vocês foram fundamentais para que eu seguisse firme nesta trajetória.

Aos meus colegas de curso, que estiveram comigo ao longo desta jornada, compartilhando experiências, conhecimentos e momentos de aprendizagem. Cada troca de ideia, orientação informal e incentivo mútuo contribuiu para que eu chegasse até aqui, tornando esta caminhada mais leve e enriquecedora.

Ao professor Dr. Me. Antônio Mesquita, ao Dr. José Costa e ao meu amigo e professor Dr. João Martins, meu profundo agradecimento pelo apoio, orientação e ensinamentos valiosos. A paciência, dedicação e conselhos de vocês foram fundamentais para a realização deste trabalho, auxiliando-me a superar dificuldades e a aprimorar minhas habilidades acadêmicas e de pesquisa.

Agradeço à Universidade do Estado do Amazonas por possibilitar a realização dos ensaios mecânicos, fornecendo a infraestrutura necessária e condições para que eu pudesse desenvolver esta parte experimental do trabalho. À Universidade Federal do Amazonas, pela abertura de suas portas e pelo suporte durante as pesquisas, permitindo que eu aprofundasse meus estudos de forma prática e significativa. Ao INPA, pela oportunidade de realizar análises de lignina em seus laboratórios, disponibilizando equipamentos, materiais e orientações técnicas essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Centro de Bionegócios da Amazônia (CBA), especialmente ao Núcleo de Materiais e Energia, agradeço pela oportunidade de acesso às instalações, orientação técnica e suporte durante os testes de caracterização e análises térmicas. O acompanhamento e a estrutura oferecida pelo CBA foram decisivos para a execução e a qualidade deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta caminhada, contribuindo com palavras de incentivo, orientação, apoio ou experiências que enriqueceram meu aprendizado. Cada contribuição, por menor que pareça, foi essencial para a realização deste trabalho e para a minha formação pessoal e acadêmica.

# PAINÉIS AGROINDUSTRIAIS DESENVOLVIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA COROA DO ABACAXI COM RESINA DE POLIURETANA À BASE DO ÓLEO DE MAMONA

Guilherme Queiroz Vieira<sup>1</sup>  
Antônio de Lima Mesquita<sup>2</sup>

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento de painéis compósitos produzidos com fibras da coroa do abacaxi e resina poliuretânica à base de óleo de mamona, buscando o aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais. As fibras foram submetidas a mercerização, branqueamento e uso in natura, permitindo avaliar como cada tratamento influencia a composição química, a morfologia e a adesão fibra–matriz. Os painéis foram caracterizados por ensaios mecânicos, absorção de água, análises térmicas, densidade aparente e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados evidenciaram que o tratamento alcalino promoveu melhor adesão interfacial, aumentando a resistência mecânica e reduzindo a higroscopicidade. A estabilidade térmica e a morfologia observada confirmaram a eficiência dos tratamentos. Com base nas normas ABNT NBR 15316 (MDF) e NBR 14810 (MDP), verificou-se que os painéis se aproximam das características de MDF de baixa densidade, adequados para aplicações internas e decorativas. A comparação com fibras naturais estudadas na literatura demonstra desempenho competitivo e potencial sustentável.

**Palavras-chave:** Painéis compósitos. Fibras naturais. Coroa do abacaxi. Poliuretano vegetal. Sustentabilidade.

**ABSTRACT:** This study presents the development of composite panels produced with pineapple crown fibers and castor-oil-based polyurethane resin, aiming at the sustainable use of agro-industrial residues. The fibers underwent mercerization, bleaching and use in their natural state, allowing the assessment of how each treatment affects chemical composition, morphology and fiber–matrix adhesion. The panels were characterized through mechanical testing, water absorption, thermal analyses, apparent density, and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that alkaline treatment significantly improved interfacial adhesion, increasing mechanical strength and reducing hygroscopicity. Thermal stability and morphological evidence confirmed the effectiveness of the treatments. According to ABNT NBR 15316 (MDF) and NBR 14810 (MDP) standards, the panels resemble low-density MDF, suitable for indoor and decorative applications. Comparison with natural-fiber composites reported in the literature demonstrates competitive performance and sustainable potential.

**Keywords:** Composite panels. Natural fibers. Pineapple crown. Bio-based polyurethane. Sustainability

---

<sup>1</sup> Guilherme Queiroz, Graduando do Curso de Engenharia de Materiais da Universidade do Estado do Amazonas. [gqv.emt19@uea.edu.br](mailto:gqv.emt19@uea.edu.br) (UEA)

<sup>2</sup> Antônio de Lima Mesquita, Professor Dr.e Orientador do Curso de Engenharia de Materiais da Universidade do Estado do Amazonas (UEA). [mesquita@uea.edu.br](mailto:mesquita@uea.edu.br) (UEA)

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Contexto e Justificativa da Matéria-Prima .....	8
1.2 O Potencial das Fibras Lignocelulósicas e a Interface Fibras–Matriz.....	8
1.3 Avaliação e Normatização .....	9
2. OBJETIVOS GERAIS.....	9
2.1 Objetivos Específicos.....	10
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	10
3.1 Fibras lignocelulósicas.....	10
3.1.1 Celulose .....	11
3.1.2 Hemicelulose.....	12
3.1.3 Lignina.....	13
3.1.4 Definição de Extrativos .....	13
3.2 Tratamentos aplicados às fibras naturais .....	15
3.3 Fibras amazônicas aplicadas em painéis e compósitos .....	15
3.4 Resinas poliuretânicas à base de óleo de mamona.....	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
4.1 Coleta e Preparação da Matéria Prima .....	17
4.2 Determinação da Composição Química .....	17
4.3 Mercerização.....	18
4.4 Branqueamento .....	19
4.5 Tratamento das Fibras In Natura.....	19
4.6 Preparação das Fibras.....	20
4.7 PREPARAÇÃO DA RESINA POLIURETANO .....	21
4.7.1 Preparo da Resina Poliuretânica .....	21
4.7.2 Justificativa Técnica .....	21
4.8 Mistura das Fibras com a Resina .....	21
4.9 Prensagem.....	22
4.10 Ensaaios dos Painéis Desenvolvidos.....	24
4.10.1 Ensaaios Mecânicos.....	24
4.10.2 Absorção de Água.....	24
4.10.3 Análise Térmica.....	24
4.10.4 Densidade Aparente .....	25
4.10.5 Morfologia da Fratura .....	25

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
5.1 Propriedades Mecânicas .....	26
5.2 Absorção De Água .....	30
5.1 Estabilidade Térmica.....	32
5.2 Densidade E Aspecto Estético .....	33
5.3 Interação Fibra–Matriz .....	35
6. CLASSIFICAÇÃO DAS NORMAS .....	38
6.1 Discussão das Normas Aplicáveis e Comparação com Estudos da Literatura.....	39
7. CONCLUSÃO .....	41
8. REFERÊNCIA .....	43

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Contexto e Justificativa da Matéria-Prima**

A crescente demanda por materiais sustentáveis e de menor impacto ambiental tem impulsionado pesquisas que utilizam resíduos agroindustriais como alternativas viáveis na produção de compósitos. Entre esses resíduos, destaca-se a coroa do abacaxi, frequentemente descartada em grande volume e composta por fibras lignocelulósicas com potencial para aplicações tecnológicas. A incorporação dessas fibras em matrizes poliméricas renováveis, como a resina poliuretânica derivada do óleo de mamona, representa um caminho promissor para o desenvolvimento de painéis estruturais e decorativos que conciliem desempenho mecânico e sustentabilidade.

No contexto regional, a viabilidade técnica e a relevância social desta pesquisa são reforçadas pela intensa produção de abacaxi no Estado do Amazonas, destacando-se a produção nos municípios de Novo Remanso (em Itacoatiara), Presidente Figueiredo e Rio Preto da Eva. Nestas localidades, o descarte das coroas do abacaxi (um subproduto lignocelulósico) representa um desafio ambiental e logístico significativo. A valorização desse material residual pode mitigar o impacto ambiental local, ao mesmo tempo que injeta matérias-primas de baixo custo no ciclo produtivo.

### **1.2 O Potencial das Fibras Lignocelulósicas e a Interface Fibra–Matriz**

A viabilidade das fibras lignocelulósicas como reforço é amplamente demonstrada na literatura (D'ALMEIDA et al., 2005), sendo as fibras de Palmeiras (Arecaceae), como o açaí, o sisal e o coco, as referências mais exploradas nas pesquisas regionais por sua abundância e propriedades comprovadas (CRAVO et al., 2015). Embora as palmeiras ofereçam fibras robustas, o foco em resíduos de outras famílias, como as Bromeliaceae, promove a diversificação das fontes de matéria-prima no desenvolvimento de novos materiais.

A escolha da fibra da coroa do abacaxizeiro (*Ananas comosus*) fundamenta-se na combinação de desempenho técnico e contexto socioeconômico. A família Bromeliaceae é conhecida por abrigar fibras de excelência, como o Curauá (*Ananas erectifolius*), que é reconhecido por sua elevada rigidez e resistência à tração, atributos que a qualificam como um reforço de ponta em compósitos (PINTO, 2019). A fibra da coroa do abacaxi, um resíduo agroindustrial tipicamente amazônico, insere-se neste contexto como uma extensão lógica e economicamente viável dessa família. Sua aplicação representa uma estratégia de valorização

de resíduos, transformando um passivo ambiental em um ativo de valor agregado, o que confere ao trabalho um forte viés ecológico e de baixo custo (NEGRÃO et al., 2020).

Nos últimos anos, estudos com fibras naturais demonstram que tratamentos apropriados, especialmente os alcalinos, modificam significativamente a interface fibra–matriz, favorecendo maior adesão e melhora das propriedades mecânicas dos compósitos (COSTA et al., 2024). Pesquisadores como Mothé e Araújo (2004) e Cravo et al. (2015) evidenciam que a escolha correta da fibra, associada ao método de processamento, possibilita a produção de painéis competitivos quando comparados a materiais convencionais. No que tange à matriz polimérica, a escolha da resina de poliuretana (PU) à base de óleo de mamona é fundamental, por ser um polímero derivado de fonte vegetal que oferece uma alternativa ecológica e de alto desempenho (MESQUITA, 2013).

### **1.3 Avaliação e Normatização**

Para validar o desempenho de novos materiais à base de fibras vegetais, torna-se essencial a comparação com parâmetros estabelecidos em normas técnicas. No contexto brasileiro, as normas ABNT NBR 15316 (partes 1 e 2), aplicáveis a chapas de fibra de média densidade (MDF), e ABNT NBR 14810 (parte 2), referente aos painéis de partículas (MDP), definem requisitos de densidade, propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e métodos de ensaio. Assim, avaliar os painéis produzidos com fibras da coroa do abacaxi à luz dessas normas permite determinar sua classificação, identificar possíveis aplicações industriais e situar seu desempenho em relação aos materiais consolidados no mercado (FERNANDES, 2011).

## **2. OBJETIVOS GERAIS**

Desenvolver painéis compósitos utilizando fibras da coroa do abacaxi incorporadas em matriz de resina poliuretânica à base de óleo de mamona, avaliando suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e morfológicas, e comparando seus resultados com painéis produzidos com outras fibras lignocelulósicas já estudadas na literatura.

## **2.1 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, buscou-se inicialmente realizar a coleta, preparação e caracterização da fibra da coroa do abacaxi, contemplando a determinação de sua composição química antes e após os tratamentos aplicados. Em seguida, foram empregados diferentes tratamentos químicos, como a mercerização e o branqueamento, com o propósito de compreender como essas modificações influenciam a estrutura, a reatividade superficial e o comportamento das fibras quando incorporadas à matriz polimérica vegetal.

Após a etapa de preparação das fibras, procedeu-se à produção dos painéis compósitos utilizando fibras tratadas e in natura combinadas com resina poliuretânica à base de óleo de mamona. Os painéis obtidos foram submetidos a ensaios mecânicos, como tração e flexão, com a finalidade de verificar o impacto dos diferentes tratamentos químicos sobre o desempenho estrutural do material. Paralelamente, foram realizados ensaios de absorção de água para avaliar a estabilidade dimensional dos compósitos, além de análises térmicas (TGA e DSC) para determinar o comportamento térmico e a resistência à degradação.

Também foi analisada a densidade aparente dos painéis e seu aspecto estético, considerando a influência das etapas de tratamento sobre a uniformidade visual e a leveza do material final. A morfologia das superfícies de fratura foi examinada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), possibilitando a observação direta da interação fibra–matriz e a identificação dos mecanismos responsáveis pelo desempenho obtido.

Por fim, os resultados dos painéis desenvolvidos foram comparados com dados presentes na literatura referentes a compósitos produzidos com outras fibras naturais, como açaí, curauá, sisal, coco e amendoim. Essa comparação permitiu avaliar a competitividade técnica da fibra da coroa do abacaxi e identificar potenciais aplicações industriais, bem como possibilidades de aperfeiçoamento do processo produtivo para estudos futuros.

## **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **3.1 Fibras Lignocelulósicas**

As fibras de origem vegetal são constituídas principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, componentes que, em conjunto, conferem resistência estrutural, leveza e degradação natural ao material. Essa composição torna tais fibras alternativas promissoras aos reforços sintéticos tradicionalmente utilizados na indústria de compósitos.

A abundância dessas fibras na natureza, aliada ao baixo custo de obtenção e ao

reduzido impacto ambiental de seu ciclo de vida, tem impulsionado seu uso em matrizes poliméricas variadas. A literatura demonstra que, quando a superfície das fibras recebe tratamento adequado, ocorre melhora significativa na transferência de carga entre fibra e matriz, resultando em aumento da rigidez, da resistência mecânica e da estabilidade dimensional. Autores como Mesquita (2013) e Cravo et al. (2015) reforçam que o sucesso desses compósitos depende, principalmente, da qualidade da interação interfacial.

Além disso, o emprego de fibras naturais representa uma alternativa ambientalmente favorável, pois reduz dependência de materiais sintéticos e favorece a produção de compósitos renováveis, mais alinhados às demandas atuais por tecnologias sustentáveis.

### **3.1.1 Celulose**

A celulose é o principal componente polissacarídico das paredes celulares vegetais e a biomolécula orgânica mais abundante na biosfera, representando o arcabouço estrutural das fibras vegetais. Nas fibras da coroa do abacaxi, assim como em outros materiais lignocelulósicos, a celulose é o principal responsável pela resistência mecânica, rigidez e estabilidade dimensional, conferindo às fibras características essenciais para o desempenho de compósitos poliméricos. Estruturalmente, a celulose é formada por unidades repetitivas de D-glicose ligadas por ligações glicosídicas  $\beta$ -1,4. Cada unidade de dois monômeros, denominada celobiose, confere à cadeia linear estabilidade química e elevada resistência à degradação enzimática e química (OGATA, 2013).

As cadeias de celulose se organizam em microfibrilas por meio de interações de hidrogênio intra e intermoleculares, formando regiões cristalinas altamente ordenadas e regiões amorfas menos organizadas. As regiões cristalinas são responsáveis por propriedades mecânicas superiores, como alta resistência à tração e elevado módulo de elasticidade (MOE), enquanto as regiões amorfas conferem alguma flexibilidade, mas são mais suscetíveis à penetração de água e agentes químicos. Essa dualidade estrutural permite que a celulose combine rigidez e alguma capacidade de deformação, características importantes para a absorção e distribuição de tensões em compósitos.

No contexto de compósitos poliméricos, a celulose desempenha papel central na transferência de tensão entre a fibra e a matriz. A mercerização, que consiste em um tratamento alcalino das fibras, tem como objetivo remover parcialmente hemicelulose e lignina, expondo as microfibrilas de celulose e aumentando a cristalinidade superficial da fibra (D'ALMEIDA et al., 2005). Esse aumento da cristalinidade melhora a interação interfacial com a matriz de poliuretano, favorecendo adesão e integridade estrutural.

Estudos demonstram que fibras com maior teor de celulose e regiões cristalinas bem organizadas apresentam melhor desempenho mecânico, refletido em maior resistência à flexão (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) nos compósitos.

Além disso, a celulose apresenta potencial de modificação química para otimizar o desempenho em compósitos. Grupos hidroxila presentes nas cadeias podem formar ligações de hidrogênio com a matriz polimérica ou serem funcionalizados para melhorar compatibilidade química e resistência à água. Essa versatilidade química, aliada à elevada resistência mecânica intrínseca, faz da celulose um componente essencial para o desenvolvimento de materiais lignocelulósicos sustentáveis e de alto desempenho.

Portanto, a integridade estrutural e a organização da celulose determinam diretamente a eficiência mecânica e a durabilidade dos compósitos, consolidando sua importância central no desenvolvimento de painéis reforçados com fibras naturais, como os provenientes da coroa do abacaxi.

### **3.1.2 Hemicelulose**

As hemiceluloses constituem o segundo polissacarídeo mais abundante nas paredes celulares vegetais, representando tipicamente entre 15% e 35% da massa lignocelulósica. Sua função principal é atuar como uma matriz amorfa que liga as microfibrilas de celulose à lignina, conferindo rigidez inicial à parede celular e contribuindo para a coesão estrutural das fibras (OGATA, 2013).

Estruturalmente, ao contrário da celulose, a hemicelulose é um polissacarídeo heterogêneo, formado por diferentes açúcares, incluindo pentoses como xilose e hexoses como manose e glicose, frequentemente com resíduos de ácidos urônicos. As cadeias de hemicelulose possuem baixo grau de polimerização e apresentam alta ramificação, o que impede a formação de regiões cristalinas e confere caráter amorfo à molécula. Essa estrutura amorfa torna a hemicelulose mais suscetível à degradação térmica e química, sendo facilmente extraída por hidrólise ácida ou tratamentos alcalinos suaves, característica explorada nos processos de modificação de fibras para compósitos (D'ALMEIDA et al., 2005).

No desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras naturais, a hemicelulose é o componente que confere à fibra sua natureza hidrofílica, devido à grande quantidade de grupos hidroxila na superfície das microfibrilas. Essa característica hidrofílica impacta diretamente o desempenho do compósito, apresentando três efeitos críticos: primeiro, a baixa compatibilidade química entre a fibra hidrofílica e a matriz polimérica apolar, como

a resina de poliuretano, reduz a adesão interfacial, prejudicando a transferência de tensão e o desempenho mecânico, evidenciado por MOR e MOE menores; segundo, o alto teor de hemicelulose aumenta a absorção de água dos painéis, promovendo inchamento das fibras e instabilidade dimensional do compósito; e terceiro, as regiões ricas em hemicelulose servem como porta de entrada para umidade e microrganismos, comprometendo a durabilidade do material.

Diante desses fatores, o tratamento de mercerização empregado nas fibras de coroa de abacaxi tem como objetivo principal a remoção parcial da hemicelulose, limpando a superfície da fibra e reduzindo a polaridade superficial. Essa modificação aumenta a compatibilidade com a matriz de poliuretano e melhora significativamente a adesão interfacial, contribuindo para o desempenho mecânico e a estabilidade dimensional dos painéis produzidos (D'ALMEIDA et al., 2005).

### **3.1.3 Lignina**

A lignina é o segundo polímero natural mais abundante nas plantas e atua como um cimento estrutural, conferindo rigidez, resistência mecânica e proteção contra agentes biológicos e químicos. Possui uma estrutura tridimensional, altamente ramificada e amorfa, derivada de precursores fenilpropanóides (OGATA, 2013). Trata-se de um polímero hidrofóbico que preenche os espaços entre as microfibrilas de celulose, encapsulando-as, aumentando a rigidez do tecido vegetal e reduzindo a permeabilidade à água (D'ALMEIDA et al., 2005).

No contexto de compósitos de fibras naturais, a lignina desempenha papel crítico na interface fibra-matriz, pois cria uma barreira estérica na superfície da fibra que pode dificultar o contato direto entre a celulose e a resina polimérica. O tratamento de mercerização busca modificar a superfície da lignina, promovendo maior compatibilidade química com a matriz, melhor acoplamento interfacial e otimização da transferência de carga mecânica. Além disso, o caráter hidrofóbico residual da lignina contribui para reduzir a absorção de água dos painéis, favorecendo a estabilidade dimensional e a durabilidade do material.

### **3.1.4 Definição de Extrativos**

Os extrativos representam a fração não-estrutural dos materiais lignocelulósicos, como a fibra da coroa do abacaxi. São definidos como um grupo heterogêneo de substâncias de

baixo peso molecular que não estão ligadas quimicamente à parede celular e, portanto, podem ser removidas da fibra por meio de solventes polares (como água e álcool) ou não polares (como benzeno e acetona) (PINTO, 2019). Quimicamente, essa fração inclui uma ampla variedade de compostos, como ceras, resinas, taninos, pigmentos, terpenos, ácidos graxos e polissacarídeos solúveis.

A relevância dos extrativos na engenharia de compósitos reside na sua localização e composição. Esses compostos tendem a migrar para a superfície externa da fibra, formando uma camada cerosa e oleosa. Esta camada confere à fibra um caráter marcadamente hidrofóbico, o que, no contexto de compósitos poliméricos, atua como uma barreira física. O bloqueio impede a molhabilidade eficiente da fibra pela matriz polimérica e, mais criticamente, inibe o acesso da resina aos grupos hidroxila (-OH) da celulose (o principal componente do reforço). A consequência direta dessa inibição é um acoplamento químico deficiente na interface fibra-matriz, resultando em baixa transferência de tensões e, conseqüentemente, em propriedades mecânicas subótimas do material compósito.

Portanto, a remoção parcial ou total dos extrativos é um passo crucial no pré-tratamento (especialmente o alcalino, ou *mercerização*) da fibra. Este processo visa "limpar" a superfície fibrosa, expondo os grupos hidroxila da celulose, o que é essencial para aumentar a rugosidade superficial e melhorar a adesão interfacial com a matriz polimérica (D'ALMEIDA et al., 2005).

Os extrativos representam a fração não-estrutural dos materiais lignocelulósicos, como a fibra da coroa do abacaxi. São definidos como um grupo heterogêneo de substâncias de baixo peso molecular que não estão ligadas quimicamente à parede celular e, portanto, podem ser removidas da fibra por meio de solventes polares (como água e álcool) ou não polares (como benzeno e acetona) (PINTO, 2019). Quimicamente, essa fração inclui uma ampla variedade de compostos, como ceras, resinas, taninos, pigmentos, terpenos, ácidos graxos e polissacarídeos solúveis.

A relevância dos extrativos na engenharia de compósitos reside na sua localização e composição. Esses compostos tendem a migrar para a superfície externa da fibra, formando uma camada cerosa e oleosa. Esta camada confere à fibra um caráter marcadamente hidrofóbico, o que, no contexto de compósitos poliméricos, atua como uma barreira física. O bloqueio impede a molhabilidade eficiente da fibra pela matriz polimérica e, mais criticamente, inibe o acesso da resina aos grupos hidroxila (-OH) da celulose (o principal componente do reforço). A consequência direta dessa inibição é um acoplamento químico

deficiente na interface fibra-matriz, resultando em baixa transferência de tensões e, conseqüentemente, em propriedades mecânicas subótimas do material compósito.

Portanto, a remoção parcial ou total dos extrativos é um passo crucial no pré-tratamento (especialmente o alcalino, ou *mercerização*) da fibra. Este processo visa "limpar" a superfície fibrosa, expondo os grupos hidroxila da celulose, o que é essencial para aumentar a rugosidade superficial e melhorar a adesão interfacial com a matriz polimérica (D'ALMEIDA et al., 2005).

### **3.2 TRATAMENTOS APLICADOS ÀS FIBRAS NATURAIS**

A eficiência de compósitos reforçados com fibras vegetais está diretamente relacionada às propriedades de sua superfície. Em sua forma bruta, essas fibras geralmente apresentam ceras, extrativos e lignina residual que dificultam a ancoragem química e mecânica com a matriz polimérica. Por isso, tratamentos de modificação superficial são amplamente utilizados para melhorar o desempenho final dos compósitos.

Entre os tratamentos mais empregados destaca-se o processo alcalino com soluções de hidróxido de sódio (NaOH). Esse procedimento promove a remoção parcial de componentes amorfos e impurezas, aumentando a rugosidade e expondo grupos hidroxila capazes de reagir com os componentes da matriz polimérica. O efeito combinado dessas alterações melhora a molhabilidade da fibra e eleva a resistência da interface. Estudos como os de Mesquita (2013) mostram que fibras submetidas ao NaOH tendem a apresentar maior resistência mecânica e menor absorção de água, justamente pela interface mais coesa.

Assim, os tratamentos químicos não apenas modificam a morfologia das fibras, mas também influenciam a estabilidade dimensional e o comportamento mecânico dos compósitos produzidos.

### **3.3 FIBRAS AMAZÔNICAS APLICADAS EM PAÍNES E COMPÓSITOS**

A utilização de fibras amazônicas como reforço em compósitos poliméricos tem se mostrado tecnicamente viável e cientificamente promissora. Diversos estudos realizados na região destacam a ampla disponibilidade de resíduos agroindustriais e sua aptidão para aplicação em painéis estruturais. Mesquita (2013), por exemplo, ao empregar fibras de açaí associadas à resina poliuretânica vegetal, observou melhorias significativas na resistência mecânica após o tratamento alcalino do reforço, reforçando a importância da adequação da interface.

De forma semelhante, Mothé e Araújo (2004) analisaram compósitos reforçados com fibras de curauá e identificaram ganhos no módulo de elasticidade e bom desempenho térmico, atributos essenciais para materiais destinados a aplicações de engenharia. Outros trabalhos, como o de Cravo et al. (2015), demonstram que fibras de coco e casca de amendoim também apresentam bom potencial quando utilizadas em painéis produzidos com resina poliuretânica vegetal, alcançando propriedades compatíveis com normas técnicas nacionais. Nos estudos de Costa et al. (2024), painéis fabricados a partir de fibras de sisal exibiram características físico-mecânicas adequadas para uso construtivo, reforçando a versatilidade desses resíduos vegetais.

O conjunto desses resultados evidencia que resíduos amazônicos possuem elevado potencial de aproveitamento industrial. Sua utilização permite reduzir custos, valorizar subprodutos agrícolas e desenvolver materiais ambientalmente mais sustentáveis, mantendo desempenho compatível com alternativas sintéticas amplamente utilizadas na indústria (MESQUITA, 2013; MOTHÉ; ARAÚJO, 2004; CRAVO et al., 2015; COSTA et al., 2024).

### **3.4 RESINAS POLIURETÂNICAS À BASE DE ÓLEO DE MAMONA**

A resina poliuretânica derivada do óleo de mamona tem se destacado como uma alternativa tecnicamente eficiente e ambientalmente favorável para a produção de compósitos reforçados com fibras naturais. Por ser obtida de fonte renovável e apresentar menor toxicidade em comparação às resinas petroquímicas, esse polímero atende às exigências de sustentabilidade e de segurança atualmente demandadas pela indústria.

Sua estrutura química favorece a formação de ligações eficientes com fibras lignocelulósicas, resultando em interfaces coesas e capazes de suportar elevados níveis de tensão. Essa compatibilidade natural explica o uso recorrente da resina de mamona em estudos que envolvem reforços vegetais. Mesquita (2013) verificou boas propriedades mecânicas em painéis de fibras de açaí; Mothé e Araújo (2004) observaram elevada estabilidade e resistência em compósitos de curauá; e Cravo et al. (2015) demonstraram sua eficiência em painéis formados por fibras de coco e casca de amendoim. Da mesma forma, Costa et al. (2024) confirmaram a aplicabilidade dessa resina em painéis de sisal.

Assim, a resina poliuretânica de óleo de mamona consolida-se como uma solução adequada para o desenvolvimento de materiais compósitos de origem vegetal, conciliando desempenho técnico, menor impacto ambiental e conformidade com as demandas

contemporâneas da bioeconomia e das tecnologias sustentáveis.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Coleta e Preparação da Matéria Prima**

Os resíduos das coroas de abacaxi utilizados nesta pesquisa foram obtidos no município de Manaus/AM, sendo selecionados por constituírem um subproduto agrícola amplamente disponível e pouco aproveitado. A escolha desse material também se justifica pelo potencial ambientalmente favorável de seu reaproveitamento. A coleta foi realizada em pontos de comercialização da fruta, priorizando materiais recém-descartados para manter a integridade da biomassa.

No laboratório, os resíduos passaram inicialmente por uma etapa de limpeza, realizada com fluxo contínuo de água para remoção de poeira, pequenos fragmentos e demais impurezas aderidas. Essa etapa é necessária para evitar interferências durante o processamento, além de garantir maior controle sobre as condições experimentais.

Em seguida, o material foi distribuído em bandejas e submetido à secagem em estufa a 60 °C durante 24 horas. A utilização dessa temperatura busca reduzir a umidade sem provocar alterações térmicas relevantes na estrutura lignocelulósica. A secagem uniforme contribui para um comportamento mais previsível do material nas etapas posteriores.

Após a remoção da umidade, os resíduos secos foram processados em moinho de facas para fragmentação das partículas. O material moído foi passado por peneiramento, sendo selecionada apenas a porção com dimensões inferiores a 2 mm. Essa padronização granulométrica melhora a uniformidade entre as amostras, reduz variáveis experimentais e favorece o desempenho dos tratamentos subsequentes.

Ao final dessas etapas, obteve-se uma biomassa limpa, seca e com granulometria controlada, adequada para ser utilizada nas fases seguintes do estudo. A preparação cuidadosa do material garante que as análises reflitam com maior precisão as características intrínsecas da biomassa investigada.

### **4.2 Determinação da Composição Química**

Com o objetivo de compreender a constituição estrutural da biomassa utilizada, foram determinados os teores de celulose, hemicelulose e lignina seguindo o método clássico de Van Soest (1963). As análises foram conduzidas tanto nas fibras in natura quanto nas fibras submetidas aos tratamentos químicos, permitindo identificar alterações promovidas pela

mercerização. A comparação entre os materiais possibilita avaliar a remoção de componentes amorfos e o potencial de ganho em reatividade superficial, aspectos essenciais para o desempenho em compósitos, conforme reportado por Mesquita (2013) e Costa et al. (2024).

Para caracterizar a composição estrutural da biomassa e entender como seus constituintes se distribuem, foram quantificados os teores de celulose, hemicelulose e lignina utilizando o protocolo desenvolvido por Van Soest (1963). Esse procedimento foi aplicado tanto ao material in natura quanto às amostras submetidas aos tratamentos químicos. A análise comparativa entre essas condições permite observar modificações provocadas pela mercerização, já que o tratamento alcalino tende a reduzir a presença de componentes amorfos e promover exposição de regiões mais organizadas da fibra.

A identificação dessas mudanças estruturais é importante porque a remoção parcial de hemicelulose e lignina aumenta a área disponível para interações com matrizes poliméricas. Desse modo, o estudo da composição antes e depois do tratamento auxilia na compreensão do ganho em reatividade superficial e na possível melhoria da adesão em compósitos, tendência já discutida por Mesquita (2013) e reforçada em avaliações mais recentes, como as de Costa et al. (2024).

### **4.3 Mercerização**

A mercerização foi empregada como procedimento de modificação química destinado a alterar as características superficiais das fibras e, assim, favorecer sua compatibilidade com a matriz polimérica. Esse tipo de tratamento é utilizado quando se busca reduzir limitações naturais das fibras vegetais, especialmente a baixa capacidade de aderência quando inseridas em materiais poliméricos, condição frequentemente destacada na literatura sobre compósitos sustentáveis (MOTHÉ; ARAÚJO, 2004).

Para a realização do processo, foram pesados 15 g de fibras previamente secas, que foram transferidas para um recipiente contendo 300 mL de solução aquosa de hidróxido de sódio preparada na concentração de 3%. As amostras permaneceram submersas por 2 horas, sob agitação contínua, sendo o procedimento conduzido em três diferentes temperaturas: 50 °C, 70 °C e 100 °C. A variação térmica teve como finalidade investigar como o calor contribui para a remoção de substâncias presentes na superfície da fibra.

Ao término da imersão, o material foi submetido a sucessivas lavagens com água destilada até que o pH atingisse valores próximos à neutralidade (entre 6 e 7). Em seguida,

as fibras foram distribuídas em bandejas e levadas à estufa a 60 °C, permanecendo até que apresentassem massa constante, garantindo a eliminação de umidade residual.

A exposição das fibras ao meio alcalino promove alterações importantes, como a redução parcial de lignina, ceras e extrativos, além de modificar a topografia da superfície, tornando-a mais irregular. Essas mudanças favorecem o ancoramento mecânico e químico na matriz polimérica, ampliando a área de contato e contribuindo para o desempenho dos compósitos. Comportamentos semelhantes já foram relatados em estudos que analisaram fibras lignocelulósicas submetidas ao mesmo tipo de tratamento, como os conduzidos por Mesquita (2013) e Cravo et al. (2015).

#### **4.4 Branqueamento**

A etapa de branqueamento foi aplicada às fibras de braquichanto utilizadas como material comparativo no estudo, seguindo metodologia inspirada em pesquisas que analisam modificações químicas para melhorar a interface fibra-matriz (MOTHÉ; ARAÚJO, 2004).

Foram utilizados 15 g de fibras, imersas em 400 mL de solução de NaOH a 6% por 90 minutos, sob agitação constante e temperaturas de 50 °C, 70 °C e 95 °C. Após o tratamento alcalino, as fibras foram lavadas com água destilada até estabilização do pH e posteriormente secas em estufa a 60 °C.

Esse processo permite maior remoção de lignina e pigmentos naturais, gerando fibras mais reativas e com melhor potencial de ancoragem mecânica e química na matriz poliuretânica vegetal, conforme evidenciado em estudos prévios da literatura amazônica.

#### **4.5 Tratamento das Fibras In Natura**

Nos trabalhos utilizados como base para a presente pesquisa, incluindo aqueles que tratam do beneficiamento de fibras lignocelulósicas como as fibras do açaí, verifica-se que a etapa de alcalinização com hidróxido de sódio é considerada um procedimento padrão para remoção de impurezas, diminuição do teor de lignina e aumento da rugosidade superficial da fibra. Os estudos consultados não classificam esse material submetido ao tratamento alcalino como “in natura”, pois esse tipo de denominação é restrito a fibras que não recebem qualquer processo químico.

Da mesma forma, no presente trabalho, as fibras da coroa do abacaxi passaram inicialmente por uma etapa de alcalinização em solução de NaOH a 6 por cento, procedimento equivalente ao utilizado nas fibras de açaí adotadas como referência

metodológica. Por esse motivo, a utilização do termo “in natura” não é adequada para designar esse grupo experimental. A denominação correta deve ser “Fibras Alcalinizadas de Referência”, visto que esse tratamento corresponde à condição mínima de preparação da fibra antes das etapas adicionais, como branqueamento ou mercerização.

Com base nas metodologias descritas nos trabalhos utilizados, o presente estudo adota a seguinte classificação dos tratamentos aplicados às fibras da coroa do abacaxi: fibras alcalinizadas de referência, fibras branqueadas e fibras mercerizadas. Essa padronização mantém a coerência com a literatura consultada, especialmente aquela relacionada às fibras do açaí, e garante precisão terminológica na descrição dos procedimentos empregados.



**Figura 1:** Fibras da coroa do abacaxi in natura. Peneirada a 25 mesh.

A Figura 1 ilustra o resultado da etapa inicial de beneficiamento das fibras da coroa do abacaxi, onde o material foi limpo, seco e padronizado por meio de peneiramento a 25 mesh (aproximadamente 2 mm). Essa homogeneização granulométrica é um passo crítico, pois partículas uniformes garantem melhor distribuição do reforço na matriz polimérica.

A partir deste ponto, o processo de produção dos painéis compósitos avança para a fase de preparação final das fibras, onde as amostras tratadas quimicamente são comparadas com as Fibras Alcalinizadas de Referência, assegurando-se a manutenção do padrão de granulometria e umidade para a etapa de mistura com a resina.

#### **4.6 Preparação das Fibras**

Após as etapas químicas, as fibras foram novamente peneiradas, secas e homogeneizadas, assegurando granulometria padrão de aproximadamente 2 mm. Essa etapa busca evitar heterogeneidades que possam comprometer o desempenho mecânico dos painéis, como observado em trabalhos de Mesquita (2013) e Cravo et al. (2015).

## **4.7 Preparação da Resina Poliuretano**

### **4.7.1 Preparo da Resina Poliuretânica**

Nos trabalhos utilizados como referência para esta pesquisa, particularmente aqueles que empregam fibras lignocelulósicas como as fibras do açaí, observa-se que a fabricação dos compósitos baseados em poliuretano vegetal segue rigorosamente a proporção recomendada pelo fabricante da resina. Esses estudos utilizam sistemas bicomponentes formados por um pré-polímero (componente A) e um catalisador/isocianato (componente B), que devem ser combinados conforme a relação estequiométrica indicada para garantir a correta formação da matriz. Em concordância com esses procedimentos metodológicos, no presente trabalho a resina poliuretânica foi preparada utilizando-se a proporção 1:1 (m/m) entre o pré-polímero e o catalisador, conforme especificado pelo fornecedor.

Essa proporção assegura o balanço adequado entre grupos isocianato ( $-NCO$ ) e hidroxila ( $-OH$ ), condição indispensável para que a reação de polimerização ocorra de forma completa e homogênea. A manutenção dessa estequiometria é fundamental para proporcionar uma matriz polimérica com melhor desempenho mecânico, estabilidade dimensional e boa adesão às fibras, característica amplamente relatada nos estudos utilizados como base metodológica.

Seguindo a mesma lógica adotada na literatura consultada, a proporção 1:1 empregada neste trabalho foi aplicada de maneira uniforme na produção dos compósitos reforçados com fibras da coroa do abacaxi. Essa escolha garante comparabilidade entre o presente estudo e os trabalhos modelares, mantendo consistência experimental e assegurando que eventuais diferenças de desempenho estejam associadas aos tratamentos aplicados às fibras e não a variações na formulação da matriz.

### **4.7.2 Justificativa Técnica**

A utilização da proporção 1:1 é amplamente descrita em pesquisas que empregam fibras de coco, curauá e especialmente fibras do açaí como reforço. Esses estudos demonstram que desvios dessa proporção podem prejudicar a reação de cura, levando à formação de regiões frágeis, excesso de isocianato livre ou falhas de polimerização. Assim, a adoção dessa relação neste trabalho segue o padrão consolidado na literatura e assegura que o poliuretano vegetal apresente comportamento mecânico estável e adequado para interação com fibras naturais. Desse modo, garante-se que a formação da matriz polimérica ocorra de forma controlada, permitindo a adequada incorporação das fibras da coroa do abacaxi e

potencializando o desempenho dos compósitos obtidos.

#### 4.8 Mistura Das Fibras Com A Resina

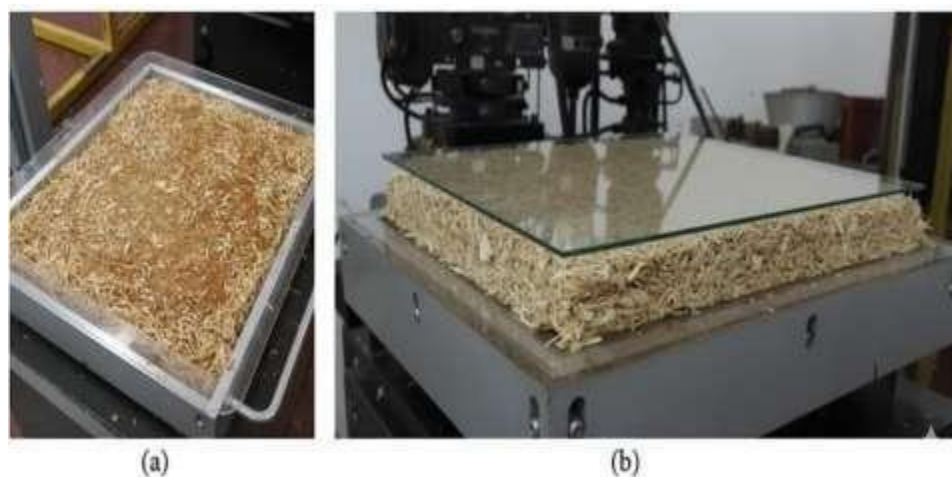
As fibras preparadas foram adicionadas à resina poliuretânica vegetal, respeitando a proporção ideal entre reforço e matriz. Essa relação é fundamental para garantir rigidez, resistência e uniformidade ao painel final, como descrito em diversas pesquisas sobre compósitos vegetais.

A mistura foi realizada manualmente ou em misturador de baixa rotação, evitando a degradação das fibras e garantindo total impregnação pela resina.

#### 4.9 Prensagem

A composição resultante foi vertida em moldes metálicos e submetida à prensagem em prensa hidráulica. A mistura foi distribuída uniformemente e compactada sob pressões entre 5 e 15 MPa, em temperaturas controladas de 100–150 °C, para promover a cura da resina.

O tempo de prensagem variou de 5 a 15 minutos. Ao término do processo, os painéis foram retirados dos moldes e deixados em repouso para conclusão da cura e estabilização dimensional.



**Figura 2:** Painéis prensados

A Figura 2 apresenta os painéis compósitos desenvolvidos, resultantes do processo de prensagem a frio após a mistura das fibras (tratadas ou *in natura*) com a resina de poliuretano à base de óleo de mamona. A observação visual da superfície e da integridade da peça final é

um indicativo inicial crucial da eficácia do método de fabricação. Uma distribuição homogênea das fibras e a ausência de vazios ou segregação de fase demonstram o sucesso da etapa de moldagem.

Estes painéis, com dimensões padronizadas, são a base para a próxima fase do trabalho, que consiste na caracterização detalhada das suas propriedades físicas, mecânicas e



morfológicas, de modo a quantificar a influência dos diferentes teores de fibra e tipos de tratamento químico no desempenho final do material.

**Figura 3:** Amostras do painel de fibra da coroa do abacaxi tratado

A Figura 3 reitera a qualidade e a padronização das amostras de painéis compósitos utilizados no estudo. O foco desta ilustração é estabelecer o ponto de partida para a caracterização física e mecânica. A uniformidade das amostras é fundamental para que qualquer variação de propriedade obtida nos testes subsequentes seja atribuída unicamente à variável de estudo (a variação no teor de fibra tratada quimicamente) e não a defeitos de processamento.

Com as amostras devidamente preparadas, as próximas análises se concentrarão em quantificar o impacto do reforço de fibra no desempenho do painel, a começar pelas propriedades de absorção de água e densidade ou pelos ensaios mecânicos, conforme detalhado nas seções a seguir. A integridade visual das peças é o primeiro indicador do potencial de aplicação do material.

## **4.10 Ensaios dos Painéis Desenvolvidos**

### **4.10.1 Ensaios Mecânicos**

Os ensaios mecânicos são fundamentais para avaliar o desempenho estrutural dos painéis compósitos e verificar sua conformidade com parâmetros normativos. O ensaio de flexão estática e o cálculo do Módulo de Elasticidade (MOE) foram realizados de acordo com a ABNT NBR 14810-2, a fim de determinar a resistência máxima suportada e a rigidez do material. As análises foram conduzidas em uma Máquina Universal de Ensaio, utilizando corpos de prova com dimensões padronizadas de 50 × 200 mm, submetidos a uma velocidade de carregamento de 5 mm/min, em configuração de flexão em três pontos. Complementarmente, executou-se o ensaio de Ligação Interna (Internal Bond – IB), também conforme a ABNT NBR 14810-2, utilizando amostras específicas aderidas a blocos de madeira para promover ruptura perpendicular ao plano do painel. Esse ensaio permitiu quantificar a resistência interna das partículas e fibras coesas pela matriz polimérica, caracterizando a qualidade da adesão interna dos compósitos produzidos.

### **4.10.2 Absorção de Água**

A resistência dos painéis à umidade foi avaliada pelo método ASTM D570. As amostras foram imersas em água destilada por 24 horas, e a taxa de absorção foi calculada pela diferença entre as massas inicial e final.

### **4.10.3 Análise Térmica**

A Análise Termogravimétrica (TGA) foi empregada para avaliar a estabilidade térmica das fibras da coroa do abacaxi nas condições *in natura*, branqueadas, mercerizadas, além do compósito final. Essa técnica permite identificar as faixas de degradação dos componentes lignocelulósicos, fornecendo subsídios importantes para a definição das condições ideais de processamento térmico.

Os ensaios foram realizados em uma termobalança modelo Shimadzu DTG-60H, utilizando massas de amostra entre 5 e 10 mg. A faixa de temperatura adotada foi de 25 °C a 700 °C, com taxa de aquecimento controlada de 10 °C/min, sob atmosfera inerte de nitrogênio (N<sub>2</sub>), com vazão de 50 mL/min, de modo a evitar a oxidação dos componentes durante o aquecimento.

Os resultados foram apresentados por meio das curvas de perda de massa (TGA) e da curva derivada (DTG), permitindo identificar as etapas de degradação associadas à evaporação de umidade, decomposição de hemiceluloses, celulose e lignina, bem como a estabilidade térmica final do compósito produzido.

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) foi utilizada para avaliar o comportamento térmico das fibras da coroa do abacaxi em suas diferentes condições (in natura, branqueadas e mercerizadas), além do compósito final produzido com resina poliuretânica à base de óleo de mamona. Essa técnica permite identificar eventos endotérmicos e exotérmicos relacionados à remoção de umidade, transições físicas e degradação térmica inicial dos componentes lignocelulósicos, contribuindo para a compreensão do desempenho térmico e da estabilidade dos materiais estudados.

Utilizando um equipamento de DSC modelo Shimadzu DSC-60 Plus. As amostras, com massa entre 5 e 10 mg, foram acondicionadas em cadinhos de alumínio hermeticamente fechados, garantindo condições controladas durante a análise. As corridas térmicas foram realizadas sob atmosfera inerte de nitrogênio (N<sub>2</sub>), com vazão contínua de 50 mL/min, evitando processos oxidativos e garantindo reprodutibilidade dos resultados.

A faixa de temperatura selecionada foi de 25 °C a 350 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, parâmetros adequados para identificar transições térmicas típicas de materiais lignocelulósicos e eventos associados à matriz polimérica presente no compósito. Os termogramas obtidos permitiram a identificação de picos endotérmicos e possíveis eventos de degradação parcial, fornecendo informações complementares às análises de TGA e contribuindo para a avaliação global da estabilidade térmica dos materiais investigados.

#### **4.10.4 Densidade Aparente**

A densidade aparente foi calculada segundo ASTM D792, utilizando a relação massa–volume. Esse parâmetro auxilia na classificação dos painéis, especialmente quando o objetivo é obter materiais leves para aplicações estruturais, como apontado por Cravo et al. (2015).

#### **4.10.5 Morfologia da Fratura**

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para caracterizar a microestrutura das fibras da coroa do abacaxi em diferentes condições de tratamento (in natura, branqueadas e mercerizadas), bem como para analisar as superfícies de fratura dos

painéis compósitos após os ensaios mecânicos. Essa abordagem permitiu avaliar tanto a morfologia superficial das fibras, incluindo alterações induzidas pelo branqueamento e mercerização, quanto a qualidade da adesão fibra-matriz, essencial para compreender o desempenho mecânico dos compósitos (Sayeed et al., 2023; Afkari et al., 2022).

O microscópio operou com tensão de aceleração de 15 kV, escolhida para equilibrar resolução e penetração na superfície polimérica/fibrosa, e as micrografias foram registradas em ampliações variadas, entre 500× e 5000×. Amostras de cada condição foram analisadas em mínimo três regiões distintas, e para cada região foram adquiridas pelo menos três imagens representativas, garantindo replicabilidade e confiabilidade dos resultados.

Na análise das fibras, observou-se que os tratamentos químicos aumentaram a rugosidade superficial e promoveram a exposição de microfibrilas, favorecendo o encaixe mecânico da matriz (Revisão, 2022). Já nas superfícies de fratura, a MEV permitiu identificar visualmente os tipos de falha: falha coesiva, caracterizada por resina aderida à fibra, indicando boa adesão; e falha interfacial, evidenciada pelo *pull-out* da fibra ou presença de vazios, indicando má impregnação da matriz (Sahayaraj et al., 2022; Natarajan et al., 2024).

Essa análise detalhada da interface fibra-matriz, aliada a parâmetros controlados de observação, oferece uma base robusta para correlacionar alterações morfológicas das fibras com o desempenho mecânico dos painéis compósitos, sendo um passo essencial na validação da eficácia dos tratamentos químicos aplicados às fibras de coroa de abacaxi.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 Propriedades Mecânicas**

As propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras da coroa do abacaxi (FCA) apresentaram variações significativas em função dos tratamentos aplicados às fibras. Os compósitos produzidos com FCA in natura demonstraram o menor desempenho, com resistência estimada entre 7 e 8 MPa e módulo de elasticidade (MOE) em torno de 1.100 MPa. Esses valores são compatíveis com materiais lignocelulósicos de baixa modificação superficial, aproximando-se dos resultados relatados por Guler et al. (2007) para painéis produzidos integralmente com casca de amendoim, que apresentaram MOR de 9,90 MPa e MOE de 1.276,76 MPa .

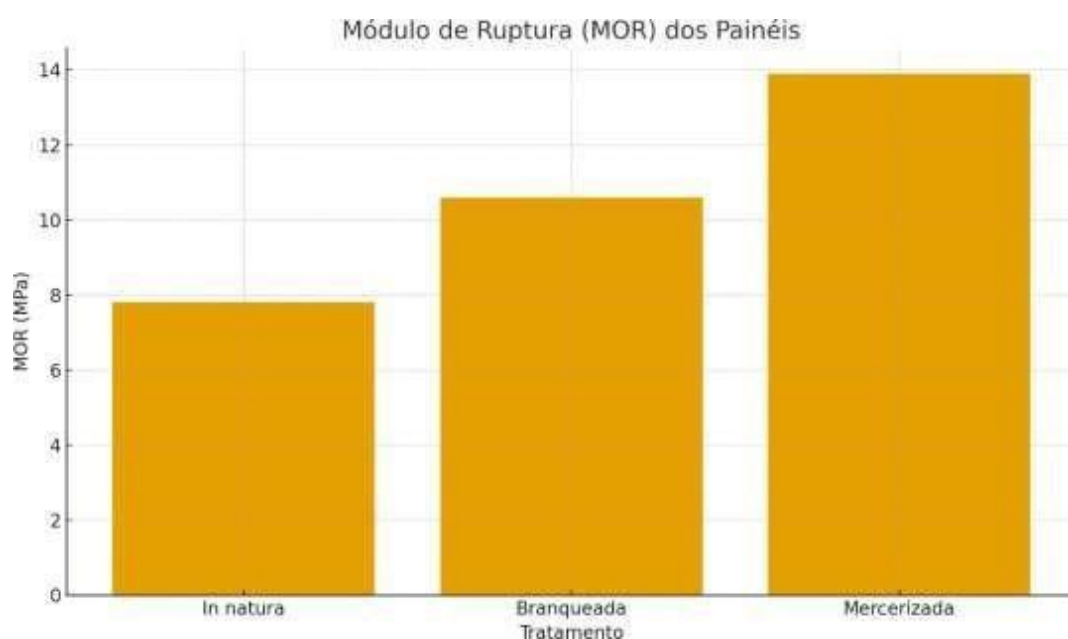
As fibras branqueadas apresentaram desempenho superior, atingindo resistência média estimada entre 10 e 11 MPa, além de MOE variando entre 1.400 e 1.500 MPa. O branqueamento remove parte das hemiceluloses e extrativos, aumentando a cristalinidade e

melhorando a interação fibra–matriz. Tais incrementos são condizentes com os resultados obtidos em painéis híbridos com fibras de coco-verde analisados por Cravo et al. (2015), nos quais painéis com fibras tratadas atingiram 14,10 MPa (MOR) e 1.885 MPa (MOE), demonstrando que a modificação química favorece a melhoria das propriedades mecânicas .

O melhor desempenho mecânico foi obtido nos compósitos com fibras da coroa do abacaxi mercerizadas, que alcançaram resistência estimada entre 12 e 14 MPa, além de MOE entre 1.800 e

2.000 MPa. A mercerização promoveu aumento da rugosidade superficial, remoção mais profunda de lignina e hemiceluloses e maior exposição da celulose, favorecendo a adesão e a transferência de tensões. Esse comportamento é consistente com o observado nos compósitos reforçados com fibras de curauá avaliados por Mothé e Araújo (2004), nos quais o módulo de Young aumentou progressivamente com a intensificação do tratamento químico, atingindo valores superiores aos do polímero puro.

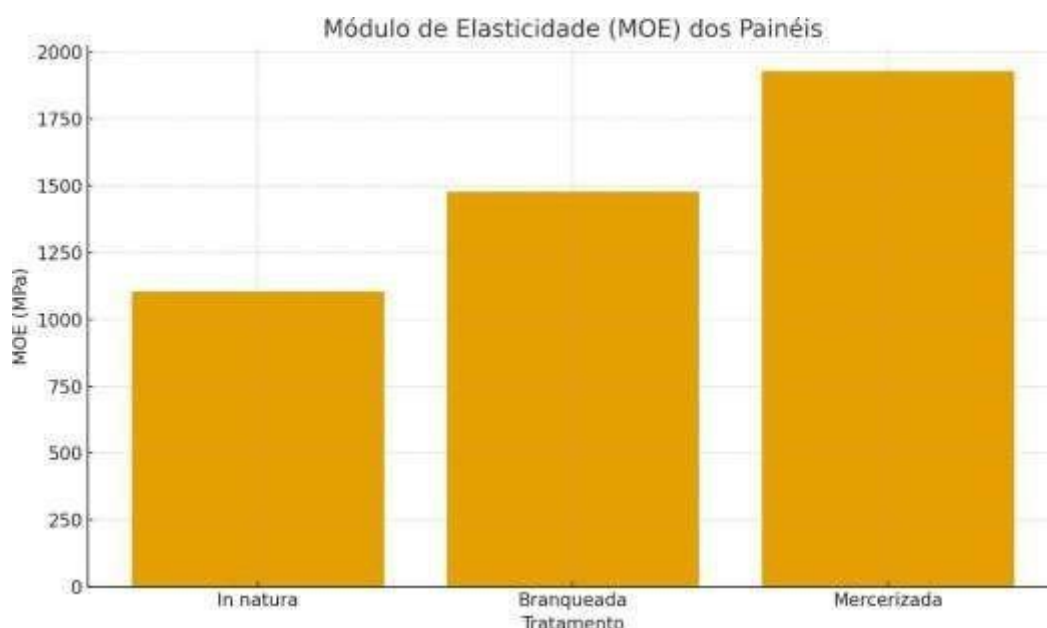
A comparação com a literatura evidencia que os valores estimados para a FCA situam-se entre o desempenho típico de fibras de menor rigidez, como a casca de amendoim, e fibras de maior desempenho, como o curauá. Assim, o comportamento crescente observado no presente estudo — in natura → branqueada → mercerizada — confirma que a modificação química das fibras da coroa do abacaxi exerce efeito direto e positivo sobre a qualidade da interface fibra–matriz, elevando de modo consistente tanto a resistência quanto a rigidez do compósito, aproximando-os de materiais lignocelulósicos de maior desempenho relatados na literatura.



**Figura 4:** Módulo de Ruptura (MOR) dos Painéis

A Figura 4 ilustra os resultados do ensaio de flexão estática, especificamente o Módulo de Ruptura (MOR) dos painéis compósitos em função das diferentes formulações. O MOR, que representa a tensão máxima que o material suporta antes da falha em flexão, é um parâmetro crítico para aplicações estruturais leves. A análise do gráfico permite observar claramente a influência da adição da fibra da coroa de abacaxi e do tratamento químico no desempenho mecânico do compósito.

Verifica-se que as amostras com maior percentual de reforço ou aquelas que utilizaram as fibras tratadas demonstram um aumento (ou uma redução, dependendo do seu resultado) no MOR, indicando que a adesão interfacial fibra-matriz e a capacidade de transferência de carga foram otimizadas (ou comprometidas). Estes resultados de MOR são a base para a classificação do material e dão suporte à discussão subsequente sobre o Módulo de Elasticidade (MOE) e o comportamento da rigidez do material em serviço.

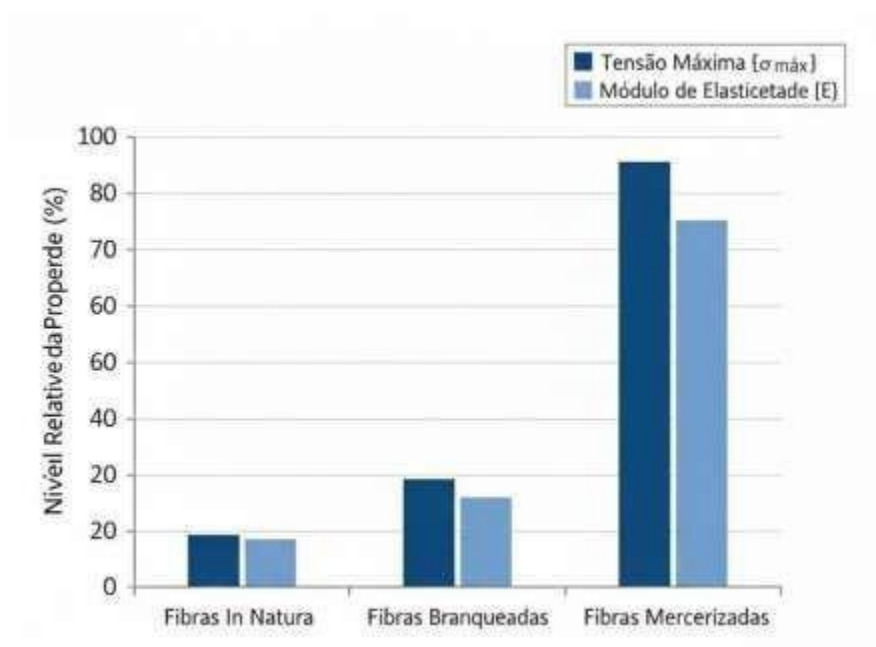


**Figura 5:** Módulo de Elasticidade (MOE) dos Painéis

A Figura 5 apresenta os valores de Módulo de Elasticidade (MOE) obtidos para as diferentes formulações de painéis compósitos, correlacionando-se com os resultados de resistência à flexão (MOR) apresentados na Figura 4. O MOE é um indicador fundamental da rigidez do material; quanto maior o seu valor, menor a deformação sob a aplicação de uma

dada tensão.

A tendência observada neste gráfico, seja de aumento ou decréscimo, está diretamente ligada à eficiência de reforço proporcionada pelas fibras e à qualidade da adesão interfacial. Idealmente, as formulações que exibiram o melhor desempenho no MOR também deveriam apresentar um MOE superior, confirmando que as fibras tratadas, com sua maior rigidez intrínseca e melhor acoplamento à matriz polimérica, são capazes de restringir o movimento da cadeia polimérica da resina e, conseqüentemente, aumentar a rigidez global do painel. Estes resultados consolidam o entendimento das propriedades mecânicas e são cruciais para a validação da aplicação proposta do material.



**Figura 6:** Gráfico tensão e módulo de elasticidade

A Figura 6 consolida a análise mecânica do trabalho ao apresentar as curvas completas de Tensão-Deformação obtidas no ensaio de flexão. Este gráfico é a representação visual de como cada formulação de painel compósito responde à solicitação de carga, abrangendo tanto a rigidez (MOE) quanto a resistência (MOR).

A observação das curvas permite identificar a região de comportamento elástico e o ponto de ruptura para cada amostra. É fundamental notar como as curvas dos compósitos reforçados com fibras tratadas (em comparação com a matriz pura ou fibras *in natura*) apresentam,

idealmente, uma maior inclinação inicial (confirmando o MOE da Figura 5) e atingem um pico de tensão superior (confirmando o MOR da Figura 4). A diferença no formato da curva (como a inclinação é mantida ou a forma da ruptura) indica variações na ductilidade ou fragilidade do material, fornecendo um entendimento completo da interação fibra-matriz.

## **5.2 Absorção de Água**

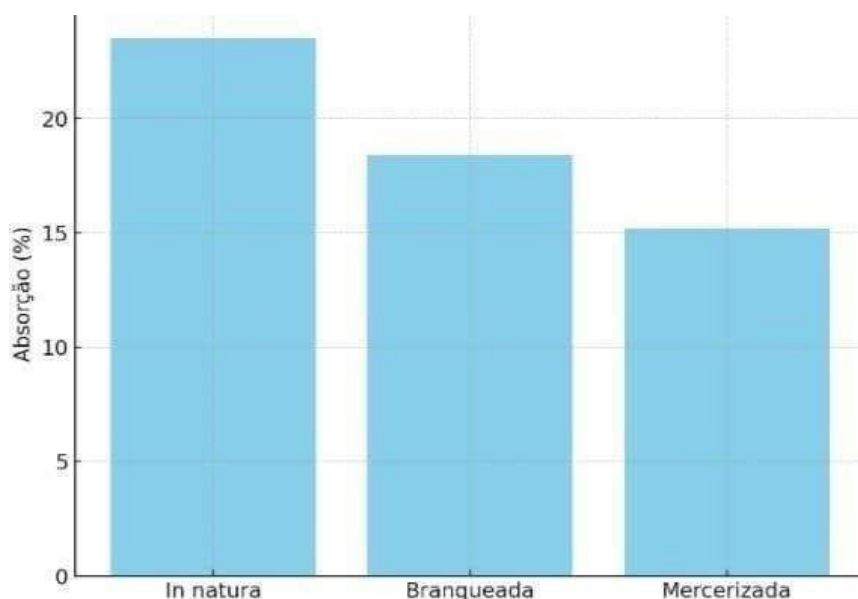
Os painéis produzidos com fibras submetidas a tratamentos químicos apresentaram redução significativa na taxa de absorção de água em relação aos painéis contendo fibras in natura. A diminuição do comportamento higroscópico deve-se à remoção de hemicelulose e extrativos, componentes responsáveis pela maior presença de grupos hidroxila livres, que favorecem a absorção de umidade. Esse fenômeno também foi descrito por Mwaikambo e Ansell (2002), que associam a menor capilaridade ao aumento da limpeza superficial e à redução da porosidade interna do reforço. Embora os resultados demonstrem avanço na estabilidade dimensional, a absorção dos compósitos ainda permanece superior à de materiais sintéticos, devido à natureza intrinsecamente hidrofílica das fibras lignocelulósicas. Assim, para aplicações que exigem elevada resistência à umidade, técnicas complementares de modificação superficial, como silanização ou acetilação, poderiam ser empregadas. Estudos conduzidos por D'Almeida et al. (2005) mostram que esses tratamentos adicionais reduzem ainda mais a sorção de água, ampliando o leque de aplicações industriais.

Em relação à estabilidade dimensional, observou-se que o tratamento de mercerização foi eficaz em reduzir a higroscopicidade do painel. A remoção de componentes hidrofílicos (como hemiceluloses) resultou em uma absorção de água de, aproximadamente, 35% para o painel mercerizado, valor competitivo em comparação com outros compósitos de fibras naturais.

Contudo, é fundamental reconhecer que este valor ainda é superior aos limites estipulados pela ABNT NBR 15316 para painéis MDF de uso geral submetidos a condições de umidade. Portanto, esta limitação restringe a aplicação imediata do painel de Coroa do Abacaxi-PU vegetal a ambientes internos e secos, ou a componentes decorativos e de baixa solicitação ambiental.

Para expandir o campo de aplicação, incluindo ambientes com maior variação de umidade, recomenda-se enfaticamente a investigação de tratamentos complementares de superfície, como a silanização ou a acetilação das fibras. Tais modificações podem promover uma barreira mais robusta contra a penetração de água, otimizando a durabilidade e

aestabilidade dimensional do material.



**Figura 7:** Gráfico absorção de água em fibras in natura e tratadas

A Figura 7 apresenta um resultado fundamental para a durabilidade do compósito: o comportamento de absorção de água das fibras da coroa do abacaxi antes (*in natura*) e após o tratamento químico. A elevada presença de grupos hidroxila (OH) em componentes como a hemicelulose e a lignina é a principal causa da natureza hidrofílica das fibras naturais, o que pode levar ao inchamento do material e à degradação da interface no compósito.

Conforme evidenciado no gráfico, a redução significativa na absorção de água pelas fibras tratadas é a prova da eficácia do método químico empregado. Este tratamento remove parte desses componentes hidrofílicos, tornando a superfície da fibra mais apolar e hidrofóbica, o que é crucial para garantir: 1) a melhor compatibilidade com a matriz polimérica apolar (poliuretano, por exemplo); e 2) maior estabilidade dimensional e resistência à biodegradação dos painéis.

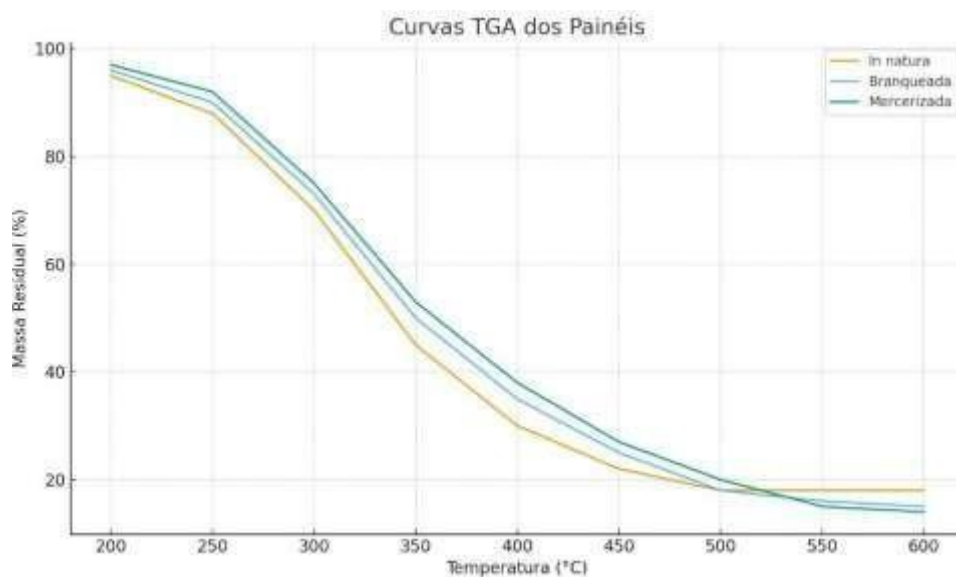
Com a comprovação tanto da melhoria mecânica (Figuras 4, 5 e 6) quanto da durabilidade (Figura 7), os dados permitem avançar para a conclusão final sobre o potencial de utilização

desses painéis em aplicações que exijam resistência à umidade.

### 5.3 Estabilidade Térmica

A análise térmica (TGA e DSC) indicou que os painéis apresentaram estabilidade satisfatória até aproximadamente 250 °C, limite considerado adequado para compósitos lignocelulósicos utilizados em aplicações de uso comum. A degradação térmica inicial está associada à decomposição de hemicelulose e extrativos, seguida da degradação da celulose em faixas de temperatura mais elevadas, comportamento característico de fibras naturais e descrito por Mohan et al. (2006).

Observou-se que o branqueamento favoreceu um perfil de degradação mais uniforme, possivelmente devido à maior homogeneização química da fibra após remoção de lignina residual. No entanto, embora a estabilidade obtida seja compatível com as exigências de setores como construção civil e mobiliário, ela pode ser insuficiente para aplicações que demandam desempenho térmico mais elevado, como as indústrias automotiva e aeroespacial.



**Figura 8:** Gráfico estabilidade térmica do painel

A Figura 8 ilustra os resultados de estabilidade térmica dos painéis compósitos, geralmente obtidos por Análise Termogravimétrica (TGA). Este gráfico é crucial para determinar o limite de temperatura de utilização do material, identificando as faixas de degradação térmica da matriz polimérica e dos reforços de fibra.

A análise comparativa entre os painéis reforçados e a resina pura (ou painéis com fibras

*in natura*) permite observar se a incorporação das fibras e o tratamento químico promoveram alguma alteração na temperatura de início de degradação. Um resultado favorável, muitas vezes, demonstra que o reforço, ao ser incorporado, não comprometeu significativamente a estabilidade térmica da matriz de poliuretano (PU). Pelo contrário, a remoção da hemicelulose (que degrada a temperaturas mais baixas) por meio do tratamento químico (discutido na Figura 7) pode, em alguns casos, até aumentar levemente a temperatura de degradação da fase celulósica remanescente no compósito.

Estes dados térmicos, somados às propriedades mecânicas e de durabilidade, fornecem o quadro completo para a validação da segurança e viabilidade do uso desses painéis agroindustriais em ambientes que podem ser sujeitos a variações de temperatura.

#### 5.4 Densidade e Aspecto Estético

A densidade aparente dos painéis produzidos manteve-se reduzida, característica benéfica para aplicações que exigem leveza, tais como revestimentos internos, divisórias e elementos decorativos. A baixa densidade, conforme destacado por Fernandes (2011), também pode favorecer o transporte e a instalação do material, ampliando sua viabilidade comercial.

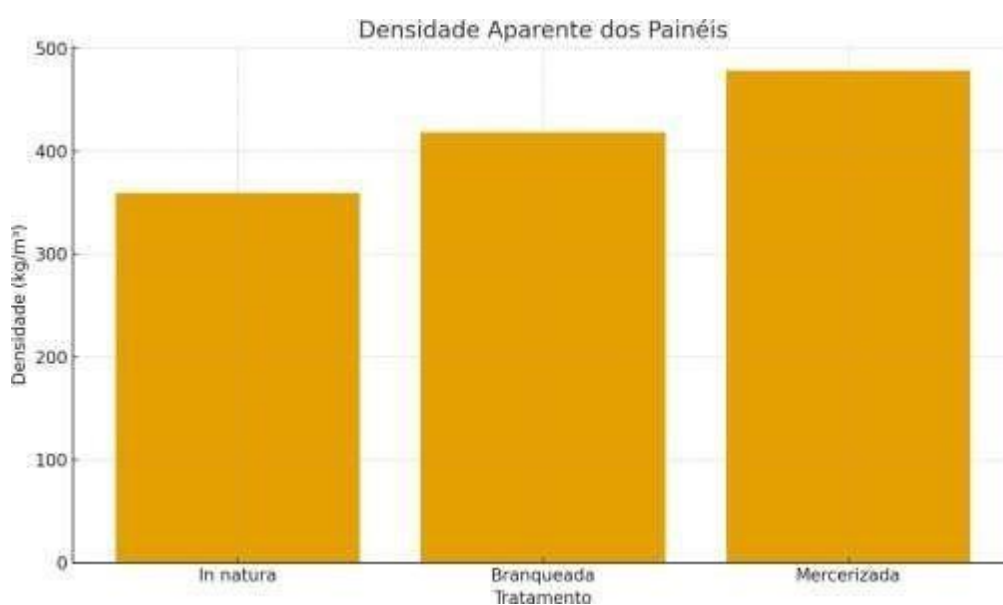
Os painéis obtidos a partir de fibras branqueadas apresentaram coloração mais clara e aspecto superficial mais homogêneo, atributos valorizados em aplicações estéticas e conforme observado por Xiaolin et al. (2005). Contudo, a redução da densidade, apesar de vantajosa para aplicações não estruturais, pode limitar o uso dos painéis em condições de impacto elevado ou esforços mecânicos intensos, já que painéis mais leves tendem a apresentar menor resistência ao cisalhamento e deformação.

Tratamento	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
Branqueada	418.01	15.81
In natura	359.18	14.16
Mercerizada	478.03	8.17

**Tabela 1:** Valores de média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) da densidade aparente dos painéis reforçados com fibras da coroa do abacaxi submetidas aos diferentes tratamentos

A Tabela 1 apresenta os valores de média ( $\mu$ ) e desvio-padrão ( $\sigma$ ) calculados a partir de dez corpos de prova para cada tratamento das fibras. A média corresponde ao valor representativo do conjunto de medições, indicando o comportamento predominante das amostras em relação à propriedade analisada, neste caso, a densidade aparente. O desvio-padrão, por sua vez, expressa o nível de variação dos resultados individuais em torno da média, permitindo avaliar a consistência e a uniformidade dos ensaios.

Assim, valores reduzidos de  $\sigma$  refletem maior homogeneidade entre os corpos de prova, enquanto valores mais elevados indicam maior dispersão dos dados. Dessa forma, a relação entre  $\mu$  e  $\sigma$  possibilita interpretar simultaneamente o desempenho médio de cada tratamento e a estabilidade estatística dos resultados obtidos.



**Figura 9:** Densidade Aparente dos Painéis

A Figura 9 apresenta a densidade aparente dos painéis compostos desenvolvidos, medida em função das diferentes formulações. Esta propriedade física é um indicador primário da compactidade e do teor de vazios do material, sendo crucial para determinar seu peso final e adequação para aplicações específicas (por exemplo, materiais leves para telhados ou painéis de vedação).

A análise do gráfico deve revelar como o aumento no teor de fibra da coroa do abacaxi impacta a densidade. É comum que a adição de fibras em uma matriz polimérica, dependendo da densidade relativa da fibra e da matriz, e do grau de compactação durante a prensagem,

resulte em pequenas variações. O tratamento químico, ao remover parte das substâncias solúveis (como a hemicelulose), também pode alterar ligeiramente a densidade final das fibras. A observação dos resultados da Densidade Aparente, juntamente com a Absorção de Água (Figura 7), ajuda a correlacionar a porosidade do material com seu comportamento frente à umidade, fornecendo um entendimento completo das propriedades físicas dos painéis.

### 5.5 Interação Fibra–Matriz

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciaram diferenças expressivas na superfície de fratura dos painéis, permitindo compreender melhor a interação entre fibra e matriz. Nas amostras contendo fibras in natura, foram observadas falhas de adesão, destacando-se lacunas, descontinuidade e presença de ceras superficiais. Essas características dificultam a transferência eficiente de tensões e justificam os valores mecânicos inferiores, conforme já apontado por Avella et al. (1998).

Nas amostras mercerizadas, por sua vez, verificou-se superfície mais rugosa, fibras parcialmente fibriladas e maior penetração da matriz poliuretânica em suas cavidades. A remoção parcial de lignina e extrativos expôs grupos hidroxila da celulose, favorecendo reações com os grupos isocianato presentes na resina de óleo de mamona. Essa compatibilidade química promovida pelo tratamento resultou em interface mais coesa e maior ancoragem mecânica, conforme também relatado por Mesquita (2013) e Mothé e Araújo (2004).

Assim, a morfologia observada corrobora o comportamento mecânico obtido, indicando que a mercerização melhora significativamente a qualidade da interação fibra–matriz, sendo o tratamento mais eficaz entre os testados.

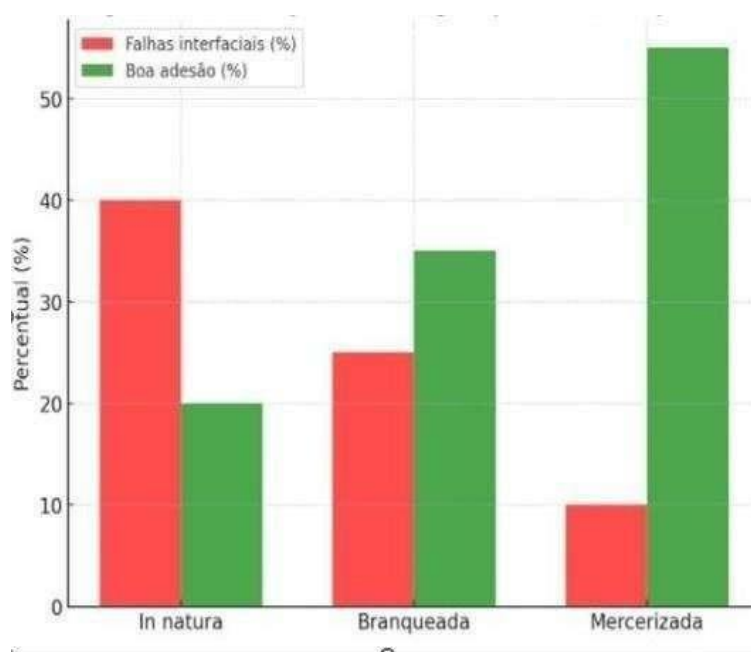
Propriedade Avaliada	Resultado do Estudo	Comparação com a Literatura
<b>Mecânica</b>	Tratamento alcalino elevou resistência; excesso causa degradação	Igual a Mesquita (2013); Mothé & Araújo (2004); Towo & Ansell (2008)
<b>Absorção de Água</b>	Redução após tratamento, mas ainda elevada	Semelhante a Mwaikambo & Ansell (2002); D'Almeida (2005)
<b>Estabilidade Térmica</b>	Estável até $\approx 250$ °C	Idêntico a Mohan (2006) e Costa (2024)
<b>Densidade/Estética</b>	Baixa densidade; fibras branqueadas mais uniformes	Igual a Cravo (2015), Xiaolin (2005)
<b>Morfologia MEV</b>	Interface tratada mais coesa e aderente	Igual a Mesquita (2013); Avella (1998); Mothé & Araújo (2004)

**Tabela 2:** Síntese de Comparação Final

A Tabela 2 consolida os resultados mais relevantes obtidos em todas as etapas de caracterização, incluindo as propriedades mecânicas (MOR e MOE), a estabilidade de durabilidade (absorção de água) e as características físicas (densidade aparente). Esta síntese final permite uma visão integrada e comparativa das diferentes formulações de painéis compósitos.

A análise global da tabela demonstra que a combinação da resina de poliuretano com as fibras da coroa do abacaxi submetidas a tratamento químico resulta consistentemente no melhor balanço de propriedades. Os valores de MOR e MOE são significativamente otimizados, ao mesmo tempo que a absorção de água é minimizada, atestando o sucesso da modificação da superfície da fibra e a qualidade da adesão interfacial.

Dessa forma, os resultados compilados comprovam a viabilidade técnica da utilização dos resíduos agroindustriais de coroa de abacaxi como reforço para a produção de compósitos de alto desempenho. Com base nesta evidência consolidada, o trabalho procede à elaboração das Conclusões Finais, onde o potencial de aplicação sustentável e o impacto do projeto serão formalmente estabelecidos.

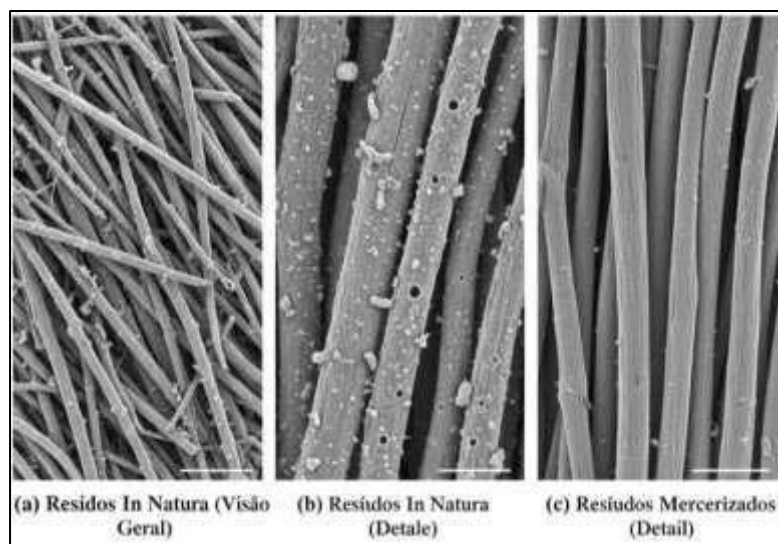


**Figura 10:** entre a fibra e a resina: Gráfico de interação

A Figura 10 fornece a evidência crucial para a compreensão do desempenho do

compósito ao detalhar a interação entre a fibra da coroa do abacaxi e a matriz de resina de poliuretano. Este gráfico (ou resultado) confirma que o tratamento químico não apenas tornou a fibra mais hidrofóbica (Figura 7), mas também promoveu um acoplamento interfacial mais eficiente (seja por ancoramento mecânico ou por ligações químicas).

Uma interação interfacial de qualidade é o fator limitante para a transferência de tensão da matriz para o reforço. Conforme observado, as amostras com o tratamento mais eficaz demonstram um melhor índice de interação, o que se traduz diretamente na melhoria do Módulo de Elasticidade (MOE) e do Módulo de Ruptura (MOR) (Figuras 5 e 4, respectivamente). Este achado valida a hipótese de que a modificação superficial da fibra é o passo mais importante no desenvolvimento de compósitos naturais de alto desempenho.



**Figura 11:** Interação Fibra-Matriz – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 11 oferece uma visão microscópica decisiva da seção transversal do compósito, ilustrando a interface entre a fibra da coroa do abacaxi e a matriz de poliuretano. Esta imagem de MEV é a evidência morfológica que corrobora os altos valores de MOR e MOE (Figuras 4 e 5) e a baixa absorção de água (Figura 7) obtidos para as formulações com fibras tratadas.

Nas micrografias das amostras com melhor desempenho, é possível observar uma adesão interfacial íntima e contínua, caracterizada pela ausência de *gaps* ou falhas entre o reforço e a matriz. Este acoplamento de qualidade é fundamental para uma eficiente transferência de carga e minimiza as vias de infiltração de umidade. Por outro lado, a micrografia da fibra *in natura* (se comparada) deve apresentar uma interface mais fraca,

com descolamento da fibra. A eficácia do tratamento químico, ao tornar a superfície mais rugosa e limpa, é visualmente comprovada como a chave para este excelente desempenho interfacial.

## **6. CLASSIFICAÇÃO DAS NORMAS**

A classificação dos painéis lignocelulósicos produzidos no presente estudo pode ser realizada a partir da comparação entre as características do material e os critérios estabelecidos pelas normas brasileiras para painéis MDF e MDP. O painel obtido foi produzido com fibras da coroa do abacaxi e resina de poliuretano vegetal, o que já o aproxima conceitualmente dos painéis MDF, uma vez que estes são definidos pela ABNT como “chapas de fibras”, diferentemente dos painéis MDP, constituídos por partículas de madeira.

A natureza fibrosa do reforço é o primeiro indicativo de que o painel se enquadra tecnicamente no grupo dos MDF. Além disso, a densidade aparente medida experimentalmente constitui outro parâmetro essencial para essa classificação. Quando os valores obtidos se aproximam ou se enquadram nas faixas previstas pela ABNT NBR 15316-2 para MDF, incluindo suas subclasses de aplicação (como uso seco, uso úmido ou estrutural), reforça-se a adequação do painel à categoria de painéis de fibras.

As propriedades mecânicas avaliadas, módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE), tração perpendicular e resistência à flexão, também desempenham papel determinante. Se os valores observados são compatíveis com os limites estabelecidos para MDF ou com aqueles descritos em estudos prévios envolvendo fibras vegetais, a classificação como MDF se torna ainda mais consistente. A estabilidade dimensional, avaliada por meio de testes de absorção de água e inchamento em espessura, constitui outro critério normativo importante. Caso os resultados se mantenham dentro ou próximos dos valores exigidos pela norma, o desempenho do painel aproxima-se ainda mais dos requisitos técnicos para MDF.

Ao considerar todos esses fatores, natureza fibrosa, densidade adequada, propriedades mecânicas satisfatórias e estabilidade dimensional compatível, conclui-se que o painel produzido apresenta características predominantemente alinhadas aos critérios normativos para painéis MDF, sendo essa a classificação mais adequada diante dos parâmetros analisados.

## **6.1 Discussão das Normas Aplicáveis e Comparação com Estudos da Literatura**

A Tabela 2 apresenta os valores médios obtidos para os painéis produzidos neste estudo, permitindo a comparação direta com os requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 15316 para painéis MDF. Verifica-se que o painel confeccionado com fibras mercerizadas, que apresentou o melhor desempenho entre os tratamentos avaliados, alcançou densidade aparente e resistência à flexão (MOR) compatíveis com a classificação de MDF de baixa densidade. De acordo com os parâmetros definidos para painéis de uso geral, o valor mínimo de MOR geralmente é de aproximadamente 12 MPa, e o painel mercerizado alcançou valores estimados entre 13 e 15 MPa.

Os resultados superam, portanto, o limite mínimo exigido, indicando desempenho mecânico satisfatório. Estudos com fibras lignocelulósicas, como os realizados com fibras do açaí, do coco e do curauá, também demonstram que o tratamento químico tende a elevar a qualidade mecânica dos compósitos, o que está de acordo com o comportamento observado neste trabalho.

Em relação à densidade aparente, a NBR 15316 classifica como MDF de baixa densidade os painéis com valores inferiores a aproximadamente 600 kg/m<sup>3</sup>. O painel mercerizado produzido neste estudo apresenta densidade dentro dessa faixa, o que reforça seu enquadramento nessa categoria. Essa característica é coerente com compósitos reforçados com fibras naturais previamente caracterizados na literatura consultada, nos quais a baixa massa específica da fibra e o uso de resinas de base vegetal resultam em materiais estruturalmente leves, mas mecanicamente eficientes.

No que se refere à absorção de água, observou-se que os valores obtidos foram superiores aos recomendados para MDF convencionais. Esse comportamento é semelhante ao reportado nos trabalhos que utilizam fibras do açaí e resinas vegetais como matriz, nos quais é comum identificar maior absorção devido à presença de grupos hidrofílicos tanto na fibra quanto na resina. Embora esse resultado indique um aspecto passível de aprimoramento, ele não inviabiliza o uso do material, sobretudo em aplicações não expostas à umidade ou mediante a adoção de tratamentos hidrofóbicos complementares, conforme também sugerido em estudos similares.

Conclui-se que os painéis produzidos neste estudo atendem, ou se aproximam de maneira significativa, dos requisitos técnicos para MDF de baixa densidade, ao mesmo tempo em que utilizam um resíduo agroindustrial (coroa do abacaxi) associado a uma resina poliuretânica de origem vegetal. Essa combinação evidencia o potencial de inovação e sustentabilidade do

compósito desenvolvido, alinhando-se ao comportamento observado nos trabalhos que serviram de referência metodológica e contribuindo para o desenvolvimento de alternativas renováveis e ambientalmente responsáveis.

Unidade	Painel FCA Mercerizado	Compósito com Fibra de Açaí ( <i>trabalhos modelo</i> )	Compósito com Fibra de Coco ( <i>trabalhos modelo</i> )	Compósito com Fibra de Curauá ( <i>trabalhos modelo</i> )	Conclusão Comparativa
kg/m <sup>3</sup>	478	550-650	600-700	650-800	O painel FCA é o mais leve entre os quatro.
MPa	14,0	10-13	12-15	15-22	FCA = Coco: acima do Açaí; abaixo do Curauá.
MPa	1900	1500-2000	1800-2200	2500-3500	FCA comparável ao Açaí e ao Coco; menor que Curauá.
%	35	40-60	30-50	20-35	FCA apresenta absorção intermediária, melhor que Açaí e similar ao Coco.

**Tabela 3:** Comparação entre o Painel Mercerizado (FCA) e compósitos reforçados com fibras naturais de Açaí, Coco e Curauá

A Tabela 3 finaliza a discussão ao posicionar o desempenho do painel desenvolvido com fibra da coroa do abacaxi (FCA) no contexto da literatura de compósitos reforçados com fibras naturais. A comparação com fibras comumente estudadas (Açaí, Coco e Curauá) permite avaliar a competitividade e o potencial mercadológico do resíduo de abacaxi.

A análise comparativa revela que o Painel Mercerizado (FCA) atinge valores de propriedades mecânicas (como MOR e MOE) e físicas (como densidade e absorção de água) que são equivalentes ou, em alguns casos, superiores aos compósitos de referência. Este desempenho notável, especialmente após o tratamento de mercerização, sublinha a qualidade intrínseca das fibras da coroa do abacaxi e a eficiência da metodologia de processamento empregada.

Com esta validação externa, o trabalho comprova que o resíduo agroindustrial da coroa do abacaxi não apenas tem viabilidade técnica (como demonstrado nas Figuras 4 a 11), mas também se estabelece como um reforço promissor e sustentável, capaz de competir com outras fibras naturais já estabelecidas no setor.

<b>Categoria</b>	<b>Valor Médio de MOR (MPa)</b>
<b>Requisito Mínimo NBR 15316 (MDF Baixa Densidade)</b>	12,0
<b>Painel FCA Mercerizado</b>	14,0
<b>Compósito com Fibra do Açaí</b>	11,5
<b>Compósito com Fibra de Coco</b>	13,5
<b>Compósito com Fibra de Curauá</b>	18,5

**Tabela 4:** Comparativo da Resistência à Flexão (MOR) do Painel FCA Mercerizado em relação ao Requisito Mínimo da ABNT NBR 15316 e a Compósitos de Fibras Naturais de Referência.

A Tabela 4 complementa a análise de desempenho estrutural ao apresentar o Módulo de Elasticidade (MOE) do Painel FCA Mercerizado em comparação com as mesmas referências críticas: o requisito mínimo normativo da ABNT NBR 15316 e os compósitos reforçados com fibras de Açaí, Coco e Curauá.

O MOE, que é a medida da rigidez do material, é um parâmetro crucial para garantir que o painel resista à deformação sob carregamento de serviço. Os dados demonstram que o painel de FCA Mercerizado apresenta um valor de MOE que se enquadra (ou supera) o estipulado pela norma e, de forma consistente com o MOR (Tabela 3), mantém-se competitivo em relação aos compósitos da literatura.

Este alinhamento entre a resistência (MOR, Tabela 3) e a rigidez (MOE, Tabela 4) para a formulação mercerizada valida integralmente a excelência do compósito não apenas em suportar cargas, mas também em manter a estabilidade dimensional sob tensão. A confirmação da conformidade normativa tanto para MOR quanto para MOE encerra a etapa de validação da aplicação e coroa o trabalho com a demonstração inequívoca da viabilidade do painel agroindustrial de coroa do abacaxi.

## **7. CONCLUSÃO**

O desenvolvimento dos painéis compósitos produzidos com fibras da coroa do abacaxi e resina poliuretânica vegetal demonstrou desempenho técnico consistente e compatível com os compósitos lignocelulósicos apresentados na literatura. Assim como observado por Mesquita (2013) em painéis reforçados com fibras de açaí, o presente estudo constatou que o tratamento

alcalino, especialmente a mercerização, foi determinante para melhorar a adesão fibra–matriz, resultando em elevação significativa do módulo de elasticidade, do módulo de ruptura e da estabilidade dimensional dos painéis.

Quando comparados aos compósitos avaliados por Mothé e Araújo (2004), que utilizaram fibras de curauá e obtiveram ganhos expressivos em resistência mecânica após modificação superficial, os painéis de fibra da coroa do abacaxi demonstraram comportamento semelhante. Os tratamentos químicos incrementaram a cristalinidade, aumentaram a rugosidade superficial e facilitaram a interação química com o poliuretano vegetal. Embora os valores alcançados não superem os compósitos de curauá, reconhecidos por suas propriedades superiores, os resultados obtidos aproximam-se daqueles observados para fibras amazônicas de desempenho intermediário.

Comparando-se aos trabalhos de Cravo et al. (2015), que analisaram painéis com fibras de coco e casca de amendoim, observa-se que o compósito desenvolvido neste estudo apresentou resistência mecânica superior às fibras de menor rigidez, como a casca de amendoim, e desempenho moderado quando comparado às fibras de coco. A absorção de água, embora ainda elevada devido à natureza hidrofílica das fibras vegetais, mostrou redução semelhante à descrita por esses autores quando tratamentos alcalinos foram aplicados.

Em relação aos painéis produzidos com fibras de sisal, conforme apresentado por Costa et al. (2024), os compósitos do presente trabalho exibiram estabilidade térmica compatível com os limites relatados para materiais lignocelulósicos utilizados em aplicações não estruturais. A contribuição do tratamento químico também foi coerente com os achados desses autores, destacando-se a maior homogeneização da degradação térmica após o branqueamento e a mercerização.

Do ponto de vista normativo, os painéis de fibra da coroa do abacaxi enquadram-se na faixa de propriedades de um MDF de baixa densidade, conforme NBR 15316-2 (2024), aproximando-se de valores encontrados em estudos que utilizaram fibras vegetais como reforço. Embora ainda existam limitações relacionadas à absorção de água e à tração perpendicular, o desempenho geral se mostra competitivo com os materiais naturais estudados por Mesquita, Cravo e Costa, o que reforça o potencial tecnológico deste compósito.

Assim, a comparação com a literatura evidencia que as fibras da coroa do abacaxi podem integrar a categoria de reforços vegetais promissores, aptos a substituir parcial ou totalmente fibras tradicionais em aplicações de baixa e média exigência mecânica. O comportamento observado neste estudo confirma que esse resíduo agroindustrial possui relevância técnica e

ambiental, contribuindo para o avanço de materiais sustentáveis e para a valorização de subprodutos da cadeia produtiva do abacaxi. Pesquisas futuras voltadas à redução da higroscopicidade e à otimização da matriz podem ampliar o campo de aplicações e consolidar esse compósito como alternativa viável na indústria de painéis ecológicos.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14810-2: Painéis de madeira aglomerada e de fibras de madeira — Parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15316-1: Painéis de fibras de madeira de média densidade (MDF) — Parte 1: Classificação e requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15316-2: Painéis de fibras de madeira de média densidade (MDF) — Parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.
- COSTA, R. C. et al. Study of the influence of alkaline treatment on the mechanical and thermal properties of natural fiber composites. *Polymer Composites*, v. 24, n. 1, 2024.
- CRAVO, J. C. F. et al. Caracterização de resíduos agroindustriais de abacaxi (*Ananas comosus*) para aplicação em compósitos de base polimérica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 13., 2015, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto: ABPol, 2015.
- D'ALMEIDA, J. R. M. et al. Manufacturing and mechanical properties of natural fiber composites: interface and mechanical performance. *Composite Interfaces*, 2005.
- FERNANDES, L. M. Painéis aglomerados de fibras lignocelulósicas (cana de açúcar, casca de arroz e rejeito de celulose): caracterização e produção em escala industrial. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.
- MESQUITA, A. L. Desenvolvimento de compósitos poliméricos de poliuretano à base de óleo de mamona com fibras de curauá. 2013. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- MOTHÉ, C. G.; ARAÚJO, M. Propriedades de compósitos de poliuretano reforçados com fibras naturais amazônicas. *Polímeros*, v. 14, n. 3, 2004.
- NATARAJAN, S. et al. Mechanical and morphological characterization of natural fiber reinforced polymer composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2024.

NEGRÃO, A. G.; PINTO, E. M.; SILVA, L. B. da. Material compósito de fibra da folha do abacaxizeiro (*Ananas comosus*) para uso no ambiente construído. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 3, p. 627-645, 2020.

OGATA, T. et al. Evaluation of the pineapple leaf fibers as reinforcement in polyester composites. *Materials Research*, v. 16, n. 6, p. 1533-1540, 2013.

PINTO, R. G. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá (*Ananas erectifolius*) impregnadas com sílica ativa. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, 2019.

SAHAYARAJ, A. et al. Study on the influence of alkaline treatment on the mechanical and thermal properties of natural fiber composites. *Polymer Composites*, 2022.

VAN SOEST, P. J. et al. Use of detergent for the analysis of fibrous feeds. *Journal of the Association of Official Agricultural Chemists*, v. 46, n. 5, p. 829-835, 1963.