

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANA GABRIELA DE PAULA FONSECA

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLIURETANO
REFORÇADOS COM FIBRA DE BANANEIRA

BELO HORIZONTE

2025

ANA GABRIELA DE PAULA FONSECA

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLIURETANO
REFORÇADOS COM FIBRA DE BANANEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Mayra Aparecida Nascimento

BELO HORIZONTE

2025

ANA GABRIELA DE PAULA FONSECA

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLIURETANO
REFORÇADOS COM FIBRA DE BANANEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 18/02/25

BANCA EXAMINADORA

Professora Dr.^a Mayra Aparecida Nascimento

Professor Dr. Leonardo Dalseno Antonino

Professor Dr. Marcello Rosa Dumont

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por me guiar com sua sabedoria e luz ao longo de toda a jornada da graduação.

Aos meus pais, Renata e Cléber, ao meu padrasto, Paulo, e ao meu irmão, Gabriel, que foram meu alicerce, me apoiando e incentivando a cada passo. Sem o seu carinho, compreensão e inspiração, nada disso seria possível.

Às lindas amizades que cultivei durante o caminho, em especial ao colegas Victor, Mariana, Daniel e Marcelo, com quem compartilhei tantos momentos de aprendizado, desafios e conquistas. A colaboração e amizade de cada um fizeram com que eu pudesse crescer tanto pessoal quanto profissionalmente.

À minha orientadora, Professora Mayra Nascimento, por toda a paciência, dedicação e incentivo. Agradeço por suas valiosas sugestões, apoio constante e confiança no meu potencial.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pelas oportunidades de desenvolvimento profissional e cultural e pela infraestrutura de qualidade.

Aos professores e técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais que me ensinaram e auxiliaram com tanto entusiasmo ao longo do curso.

RESUMO

O aumento na utilização de materiais poliméricos nos mais diversos setores é apreciável, sendo um dos mais proeminentes o poliuretano (PU) devido à versatilidade com a qual ele pode se apresentar. Esse polímero pode ser utilizado sob a forma de espumas, termoplásticos ou termofixos e apresenta como sua principal fonte o petróleo, sendo sintetizado a partir de uma reação entre diisocianatos e polióis. Tendo em vista a utilização do PU e a proposta de melhoria das propriedades do material sob tração, propõe-se utilizar o PU termofixo reforçado com fibra de bananeira. Foi realizado um estudo referente à proporção entre diisocianato e polioliol e aos parâmetros de cura (umidade e pressão) do poliuretano para verificar qual seria a melhor matriz para receber as fibras. O compósito foi obtido pelo processo de laminação manual e posteriormente submetido a ensaio de tração para determinar a influências das fibras e proporções entre os componentes do PU. A combinação de cura a vácuo e proporção de 1:1 mol/mol entre polioliol e diisocianato foi a que demonstrou melhor sinergia com as fibras não tratadas, apresentando um aumento de 255% na tensão de ruptura em relação à matriz polimérica sem fibras. Embora os tratamentos superficiais na fibra tenham sido eficientes na remoção de componentes indesejados, houve uma degradação das propriedades mecânicas das fibras tratadas, que por fim apresentaram desempenho mecânico sob tração inferior às fibras não tratadas.

Palavras chave: Poliuretano. Fibra de bananeira. Compósito. Otimização.

ABSTRACT

The increasing use of polymeric materials across various sectors is remarkable, with polyurethane (PU) being one of the most prominent due to its versatility. This polymer can be utilized in the form of foams, thermoplastics, or thermosets and is primarily derived from petroleum, synthesized through a reaction between diisocyanates and polyols. Considering the use of PU and the proposal to enhance the material's tensile properties, this study proposes the use of thermoset PU reinforced with banana fiber. A study was conducted regarding the ratio between diisocyanate and polyol, as well as the curing parameters (humidity and pressure) of polyurethane, to determine the optimal matrix for fiber incorporation. The composite was obtained through the hand lay-up process and subsequently subjected to a tensile test to assess the influence of the fibers and the proportions of PU components. The combination of vacuum curing and a 1:1 mol/mol ratio between polyol and diisocyanate demonstrated the best synergy with untreated fibers, showing a 255% increase in tensile strength compared to the polymer matrix without fibers. Although surface treatments on the fibers were effective in removing undesirable components, they led to the degradation of the mechanical properties of the treated fibers, which ultimately exhibited lower tensile performance compared to untreated fibers.

Keywords: Polyurethane. Banana fiber. Composite. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Reação geral entre isocianato e álcool na formação de poliuretano.	15
Figura 3.2 - Estruturas dos ácidos oleico, linoleico e ricinoleico.	17
Figura 3.3 - Representação de fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e aleatórias.	21
Figura 3.4 - Estrutura de uma fibra natural.	23
Figura 3.5 - Estrutura da bananeira.	27
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental.	29
Figura 4.2 - Estruturas utilizadas para extração das fibras.	30
Figura 4.3 - Fibras de bananeira expostas.	31
Figura 4.4 - Fibras do pseudocaule de bananeira imersas em Ácido Acético (à esquerda) e Hidróxido de Sódio (à direita) para tratamento superficial.	32
Figura 4.5 - Dimensões do Corpo de Prova.	33
Figura 5.1 – Aumento de 40x para as fibras de bananeira: a) sem tratamento, tratadas em b) 5% CH₃COOH por 4h e c) 5% NaOH por 4h.	38
Figura 5.2 - Aspecto macroscópico das fibras tratadas em a) CH₃COOH, b) NaOH.	39
Figura 5.3 - Espectros na região do Infravermelho das fibras de bananeira sem tratamento e após tratamento com NaOH e CH₃COOH.	39
Figura 5.4 - 1P1MA	41
Figura 5.5 - 1P1MD	41
Figura 5.6 - 1P1MV	41
Figura 5.7 - 1P1,2MSF	42

Figura 5.8 - 1,2P1MSF	42
Figura 5.9 - Compósitos: a) 1P1MFB, b) 1,2P1MFB, c) 1P1,2MFB, d) 1P1MFB - A.A e e) 1P1MFB - NAOH.	43
Figura 5.10 - Módulo de Elasticidade em tração para matrizes e compósitos com fibras longas não tratadas.	45
Figura 5.11 – Limite de resistência à tração para matrizes e compósitos com fibras longas não tratadas.	46
Figura 5.12 - Módulo de Elasticidade em tração para compósitos com matriz 1P1M.	47
Figura 5.13 – Limite de resistência à tração para compósitos com matriz 1P1M.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas de fibras naturais.	25
Tabela 4.1 - Condições de cura do PU.	32
Tabela 4.2 - Formulações das matrizes de PU	33
Tabela 4.3 - Corpos de prova ensaiados em tração	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials.*

CRFN – Compósitos reforçados com fibras naturais.

FTIR – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier.

MDI – 4,4-difenilmetano diisocianato.

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.

Mt – Megatoneladas.

OSB – *Oriented Strand Board.*

PU – Poliuretano.

RPDOM – Resina poliuretano derivada do óleo de mamona.

TDI – 2,4-tolueno diisocianato.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Materiais Poliméricos.....	15
3.2 Poliuretano	15
3.2.1 Resina Poliuretano Derivada do Óleo da Mamona (RPDOM)	17
3.3 Materiais Compósitos.....	18
3.3.1 Compósitos de matriz polimérica	19
3.3.2 Compósitos reforçados com fibras	20
3.4 Fibras Naturais	22
3.4.1 Fibra de Bananeira.....	26
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 Descrição Geral do Trabalho.....	29
4.2 Materiais.....	29
4.3 Extração das Fibras.....	30
4.4 Tratamento das Fibras	31
4.5 Obtenção da matriz de PU	32
4.5.1 Otimização das proporções de poliols e MDI.....	33
4.6 Obtenção dos Compósitos	34
4.7 Caracterização	34
4.7.1 Caracterização das fibras	34
4.7.1.1 Densidade	34
4.7.1.2 Análise de Superfície	35

<i>4.7.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	35
<i>4.7.3 Ensaio de Tração</i>	35
5 RESULTADOS e DISCUSSÃO	37
5.1 Densidade	37
5.2 Análise de superfície	37
5.3 FTIR	39
5.4 Matriz de PU	40
<i>5.4.1 Condições de cura</i>	40
<i>5.4.2 Proporção de poliol e MDI</i>	42
5.5 Obtenção dos compósitos	43
5.5 Ensaio de Tração	44
6 CONCLUSÃO	49
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS futuros	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros constituem uma classe de materiais com propriedades variáveis e únicas, sendo indispensáveis no setor produtivo contemporâneo. Embora esses materiais possam ser encontrados em fontes naturais, a sua aplicação em larga escala ocorreu apenas após a compreensão da sua microestrutura e descoberta dos meios de produção, datados do início do século XX. Desde então, o seu uso no meio industrial e na produção de bens de consumo ocorreu de forma ascendente, alcançando valores na ordem de megatoneladas (Mt) anuais no contexto atual (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Dentre os polímeros descobertos e empregados na fabricação de produtos comerciais destaca-se o poliuretano (PU), material majoritariamente proveniente do petróleo e considerado o sexto mais produzido no mundo, representando cerca de 8% dos polímeros consumidos e atingindo uma produção de 18Mt apenas no ano de 2016 (KAUR *et al.*, 2022). Seus altos índices de produção são justificados pela diversidade de aplicações, que vão desde a confecção de itens de uso diário, como espumas de colchão, até o desenvolvimento de materiais avançados utilizados na medicina, como implantes (ALVES *et al.*, 2022).

O poliuretano apresenta diversas propriedades que o tornam apto às suas aplicações, como alta resistividade elétrica, boa resistência mecânica à compressão e impacto (no caso de termoplásticos e elastômeros), baixa densidade e baixa rigidez (poliuretano termoplástico e espumas flexíveis). Ele pode ser obtido sob a forma de espuma, como um termoplástico ou como termofixo (SOUZA; KAHOL; GUPTA, 2021).

Contudo, com a crescente preocupação com a questão ambiental, busca-se fontes alternativas para diversos materiais poliméricos, incluindo o PU derivado do petróleo. Poliuretanos com um de seus componentes à base de óleos vegetais como o de girassol, de milho, linhaça e mamona são amplamente abordados na literatura (IBRAHIM; AHMAD; MOHAMED, 2015).

A depender dos requisitos da aplicação do PU, é preciso também aprimorar as propriedades mecânicas do material, como a resistência à tração ou rigidez, sem comprometer a viabilidade econômica de sua utilização. Uma das alternativas, portanto, é a fabricação de um material compósito de PU.

Aliado ao PU com componente proveniente de fonte renovável, é possível reforçar o compósito com uma fase também de fonte renovável e biodegradável. Dessa forma, minimiza-se o impacto ambiental tanto pela redução do uso de petróleo, quanto pelo uso de reforços de fontes sustentáveis.

Dentre as opções de reforços com as características citadas, um dos que se destaca por sua abundância e capacidade de aprimoramento das propriedades mecânicas dos polímeros é a fibra do pseudocaule de bananeira (LOTFI *et al.*, 2019).

De acordo com o EMBRAPA, o Brasil produz anualmente cerca de 6,6 milhões de toneladas de banana e para cada tonelada de banana produzida são geradas 3 toneladas de pseudocaule, devido à poda após cada colheita (LIMA, 2020). A quantidade elevada de pseudocaule descartado pode prejudicar outros cultivos, pois favorece o crescimento de fungos na região de acúmulo de detritos. Portanto, é interessante desenvolver métodos para aproveitamento dessa estrutura de forma adequada (SILVA, 2020).

Este trabalho propõe a produção de compósitos de poliuretano com componente derivado de fonte renovável reforçados com fibra de bananeira. Com isso, objetiva-se aliar a redução do consumo de materiais de fontes não renováveis, possível melhoria nas propriedades do polímero e o aproveitamento de pseudocauces.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desse trabalho é desenvolver compósitos de poliuretano termofixo com parâmetros de cura (a saber: pressão e umidade) e proporção poliol/diisocianato otimizados e reforçados com fibra de bananeira.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter as fibras do pseudocaule da bananeira;
- Realizar tratamentos alcalino (NaOH) e ácido (CH₃COOH) nas fibras de bananeira para aprimorar a interação fibra/matriz;
- Caracterizar mecanicamente em tração os corpos de prova para avaliar as propriedades de tensão de ruptura e rigidez dos compósitos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais Poliméricos

Canevarolo Jr. (2006) define polímero como sendo uma macromolécula composta por muitas unidades de repetição, denominadas mero, ligadas covalentemente e formando as chamadas cadeias poliméricas. Os meros são formados por monômeros, que representam a matéria prima para a produção de um polímero.

Uma das possíveis classificações de materiais poliméricos está relacionada ao seu comportamento térmico, principalmente características de fusibilidade. De acordo com essa divisão, consideram-se duas classes de polímeros: termofixos e termoplásticos (EBEWELE, 2000).

Polímeros termofixos passam por um processo denominado cura, durante o qual se formam as ligações cruzadas (ligações covalentes entre as cadeias), que impedem seu reprocessamento térmico (tornam-se infusíveis e insolúveis), uma vez que as cadeias são impedidas de fluir livremente (EBEWELE, 2000; LEVY NETO; PARDINI, 2016).

Já os termoplásticos, por não apresentarem cadeias quimicamente ligadas entre si, amolecem e fluem quando aquecidos, possibilitando a moldagem mesmo após o produto estar finalizado (CANEVAROLO JR., 2006; LEVY NETO; PARDINI, 2016).

3.2 Poliuretano

Poliuretanos são uma classe de materiais poliméricos obtidos a partir de reações de poliadição – sem perda de massa sob a forma de compostos de baixo peso molecular - entre diisocianatos (com grupos isocianato -NCO) e polióis (com grupos hidroxila -OH) (CANEVAROLO JR., 2006; SOUZA; KAHOL; GUPTA, 2021). A reação geral de síntese do poliuretano está apresentada na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Reação geral entre isocianato e álcool na formação de poliuretano.



Fonte: SOUZA; KAHOL; GUPTA, 2021.

As propriedades dos poliuretanos são altamente dependentes de fatores como a quantidade de ligações cruzadas, o emaranhamento das cadeias a quantidade de grupos reativos (IBRAHIM; AHMAD; MOHAMED, 2015).

Os polióis são responsáveis por conferir ao poliuretano características como a elasticidade, uma vez que tratam-se dos segmentos mais flexíveis da cadeia polimérica. Os isocianatos, por sua vez, contribuem para a rigidez e hidrofobicidade do PU. O uso de catalisadores é bastante comum para possibilitar que a reação entre os componentes ocorra à temperatura ambiente (SOUZA; KAHOL; GUPTA, 2021).

Caso haja excesso de diisocianato, o poliuretano pode apresentar grupos isocianato em suas extremidades, capazes de reagir com dióis (dois grupos OH) poliméricos, estendendo a cadeia, ou trióis (três grupos OH), formando ligações cruzadas (MOTTA, 2011). Ivdre et al. (2020) observaram que quanto maior o índice de isocianato, há a formação em maior quantidade de polímeros de baixo peso molecular, que ficam expostos à superfície do poliuretano, causando adesividade. Por outro lado, um excesso de polioliol pode significar uma menor quantidade de ligações cruzadas, causando uma redução da rigidez do polímero (SANTOS; CLARO NETO, 2015).

Os diisocianatos mais utilizados são o 4,4-difenilmetano diisocianato (MDI) e o 2,4-tolueno diisocianato (TDI). Em processos de obtenção de poliuretano realizados em uma única etapa e à frio, o MDI é geralmente empregado devido à sua reatividade mais elevada em comparação a outros isocianatos. Em termos de polióis, tem-se os poliéters e poliésteres, sendo o último grupo mais hidrofílico (VILAR, 1998).

Aditivos como retardantes de chama, agentes antienvelhecimento, corantes e pigmentos, agentes de reticulação, promotores de adesão, agentes de acoplamento, plastificantes, lubrificantes e bactericidas são comumente utilizados para modificar as características dos poliuretanos de acordo com os requisitos de aplicação (VILAR, 1998).

Durante a reação de formação do poliuretano, o isocianato pode reagir com água e formar ureia e CO₂, gerando bolhas de gás. A água funciona como um agente de expansão, controlando a estrutura celular e a morfologia do material para a formação de espuma (SONNENSCHNEIN, 2021; SOUZA; KAHOL; GUPTA, 2021).

A depender da aplicação almejada, a presença de bolhas e a consequente expansão do PU podem ser uma desvantagem, sendo necessário a aplicação de vácuo para eliminação de gases (SILVA, 2003; VILAR, 1998).

Outra estratégia para a diminuição da quantidade de bolhas é realizar uma mistura lenta dos reagentes, evitando ao máximo a incorporação de gases. Nenhuma nova bolha é formada após a mistura, ocorrendo apenas o crescimento e coalescência (SONNENSCHNEIN, 2021).

Para promover a secagem, reduzindo a quantidade de água disponível para reagir com o isocianato, é possível utilizar agentes secantes, como zeólitos ou peneira molecular nos reagentes higroscópicos como o poliálcool poliéster (VILAR, 1998). A diminuição da umidade também pode ser alcançada a partir do uso de dessecador, como descrito por Macedo (2017), que manteve o poliuretano em dessecadora por um período de 24 horas.

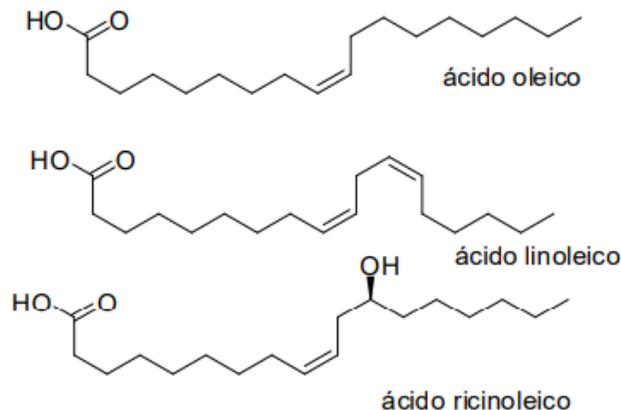
O poliuretano pode ser classificado como termoplástico, termofixo e elastômero. Os poliuretanos termofixos apresentam alta densidade de ligações cruzadas em sua estrutura (SOUZA; KAHOL; GUPTA, 2021).

3.2.1 Resina Poliuretano Derivada do Óleo da Mamona (RPDOM)

A maioria dos óleos vegetais é composta por um dos seguintes ácidos: palmítico, esteárico, oleico, linoleico e linolênico, todos com diferentes proporções entre número de átomos de carbono e número de ligações duplas entre carbonos (LI *et al.*, 2015).

O óleo de mamona, especificamente, apresenta como principal constituinte o ácido ricinoleico, um ácido graxo que contém grupos hidroxila em sua estrutura e não está entre os cinco ácidos comumente observados na estrutura dos óleos vegetais. Esse ácido assemelha-se ao ácido oleico, apresentando como diferença a presença de uma hidroxila no décimo primeiro carbono a partir do grupo carboxila (IBRAHIM; AHMAD; MOHAMED, 2015; MORAIS *et al.*, 2013). As estruturas químicas dos ácidos oleico, linoleico e ricinoleico estão apresentadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Estruturas dos ácidos oleico, linoleico e ricinoleico.



Fonte: MORAIS *et al.*, 2013.

Além de configurar um recurso sustentável, sendo um óleo vegetal, o óleo de mamona também é atrativo como matéria-prima do poliuretano pela sua baixa toxicidade. Ele é um óleo límpido de cor amarelada e odor suave característico (IBRAHIM; AHMAD; MOHAMED, 2015; MORAIS *et al.*, 2013).

As principais características físicas e químicas do óleo de mamona se devem ao ácido ricinoleico, que faz com que ele seja caracterizado como uma exceção frente a outros óleos, uma vez que apresenta grupo hidroxila. Dentre as propriedades que diferenciam esse óleo de outros pode-se destacar a elevada viscosidade e polaridade, que contribuem para a aplicação desse óleo em indústrias cosméticas e de produção de tintas (MORAIS *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2015).

A obtenção do polioliol a partir do óleo de mamona ocorre com base na modificação do ácido ricinoleico insaturado através da ação de enzimas ou produtos químicos, que introduzem mais grupos hidroxila à composição (IBRAHIM; AHMAD; MOHAMED, 2015).

Os PUs derivados do óleo de mamona apresentam propriedades semi-flexíveis ou semi-rígidas e variam de elastômeros a plásticos com elevada rigidez. Mesmo sendo proveniente de fonte renovável, as RPDOM apresentam resistência à tração, deformação permanente à compressão (quando se apresenta sob a forma de um material elastomérico) e resiliência equiparáveis às do poliuretano à base de petróleo (LI *et al.*, 2015).

Cangemi *et al.* (2008) estudaram a biodegradabilidade do poliuretano derivado da mamona frente ao PU derivado do petróleo. Foram utilizados microrganismos como fungos e bactérias para degradar os materiais, observando-se uma maior degradabilidade no PU de origem renovável, sendo o mecanismo de ação dos microrganismos similar ao que ocorre na quebra de gorduras, justificado devido à fonte do PU ser vegetal e sua estrutura química tornar o material susceptível ao ataque de microrganismos.

3.3 Materiais Compósitos

Um material compósito pode ser definido como uma substância formada pela combinação de dois ou mais materiais, que são insolúveis entre si, para criar um novo material de engenharia que apresenta propriedades diferentes aos componentes puros (ASTM, 2023).

Os materiais que constituem um compósito mantêm sua individualidade e, embora atuem em conjunto, não se dissolvem ou se fundem completamente uns nos outros. O

constituente contínuo é chamado de matriz, enquanto a fase descontínua é chamada de reforço (ASTM, 2023).

A matriz atua como um aglutinante, permitindo que os esforços mecânicos sejam transferidos através da fase de reforço. Usualmente, materiais cerâmicos, metálicos ou poliméricos são empregados como matriz (DANIEL; ISHAI, 2006; LEVY NETO; PARDINI, 2016).

As características dos materiais compósitos dependem das propriedades e geometrias dos constituintes, bem como da distribuição das fases. A distribuição influencia diretamente na uniformidade do sistema, sendo que sistemas mais heterogêneos apresentam maior probabilidade de falhar devido às diferenças de propriedades em diferentes regiões. Outro fator que impacta significativamente as propriedades do material são as frações volumétricas dos componentes (DANIEL; ISHAI, 2006; LEVY NETO; PARDINI, 2016).

Os compósitos apresentam uma série de propriedades que os materiais com uma única fase não podem oferecer, como alta resistência aliada à elevada rigidez e baixa densidade. A combinação entre materiais da matriz e do reforço proporciona a existência de uma vasta gama de propriedades físico-químicas e mecânicas para os compósitos (DANIEL; ISHAI, 2006; LEVY NETO; PARDINI, 2016).

Os reforços para materiais compósitos tradicionais (para aplicações não estruturais) são classificados em três categorias: partículas, fibras curtas (ou whiskers) e fibras contínuas (DANIEL; ISHAI, 2006). A primeira categoria apresenta partículas de diferentes tamanhos e formatos dispersas aleatoriamente na matriz. Já a segunda categoria utiliza como reforço fibras curtas, nanotubos (como no caso de nanocompósitos reforçados com nanotubos de carbono) ou whiskers, que podem estar todas orientadas em uma única direção ou dispostas de maneira aleatória. No caso de fibras curtas orientadas, o material compósito tende a apresentar anisotropia; já se a organização for aleatória, pode ser considerado quase isotrópico. A terceira categoria contém fibras longas que podem estar alinhadas paralelamente, formando os chamados compósitos de fibras contínuas unidirecionais; cruzadas em ângulos retos (ou em tecido) ou distribuídas em várias direções, nos compósitos de fibras contínuas multidirecionais (DANIEL; ISHAI, 2006).

3.3.1 Compósitos de matriz polimérica

As matrizes poliméricas podem ser divididas principalmente entre termofixas (ou termorrígidas) e termoplásticas. As matrizes termofixas são as mais amplamente utilizadas.

Dentre elas, destacam-se as resinas epóxi, resinas poliéster, resinas fenólicas e as resinas poliimidadas. Via de regra, as resinas passam pelo processo de polimerização e cura a partir de um agente endurecedor ou por aquecimento (CANEVAROLO JR., 2006; DANIEL; ISHAI, 2006; LEVY NETO; PARDINI, 2016).

3.3.2 Compósitos reforçados com fibras

O engenheiro inglês Alan Arnold Griffith, conhecido por suas contribuições no estudo de fraturas frágeis e fadiga em termos de tensões elásticas, foi o primeiro a demonstrar na prática que materiais em forma de fibras apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica, uma vez que a resistência tende a se aproximar da resistência teórica do material. Levando esse fato em consideração, conclui-se que as fibras representam um meio efetivo de reforço e por isso são a classe mais utilizada para materiais compósitos (LEVY NETO; PARDINI, 2016).

Nos materiais compósitos poliméricos, as fibras ou filamentos são as responsáveis por suportar os carregamentos mecânicos. A matriz combina as milhares de fibras independentes presentes no compósito como um todo. Dessa forma, quando algumas das fibras se rompem, a carga é redistribuída para aquelas que permaneceram intactas, evitando que compósito apresente falhas catastróficas rapidamente (LEVY NETO; PARDINI, 2016; YANG; PARK; PARK, 2019).

Esse tipo de reforço apresenta uma configuração geométrica bastante característica: o comprimento é muito maior que o diâmetro. Tal estrutura permite que a área interfacial fibra/matriz disponível para transferência por unidade de volume da fibra aumente (LEVY NETO; PARDINI, 2016).

A transmissão da carga da matriz para a fibra está intrinsecamente relacionada com a ligação interfacial entre elas. Essa ligação interfacial ocorre de maneira mais efetiva nas proximidades do centro da fibra. Por isso, quando uma carga é aplicada no compósito, não há transmissão dela para as extremidades. Devido a essa situação, é preciso estabelecer um comprimento mínimo para que a fibra possa efetivamente reforçar a resistência e a rigidez do compósito, o comprimento crítico (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2010).

De maneira geral, o comprimento crítico depende do diâmetro da fibra, da resistência à tração final e da resistência de ligação entre fibra e matriz. Fibras que apresentam o comprimento várias vezes maior que o crítico (normalmente 15 vezes) são denominadas fibras contínuas e possuem uma maior região para qual a tensão será transmitida. Já as fibras

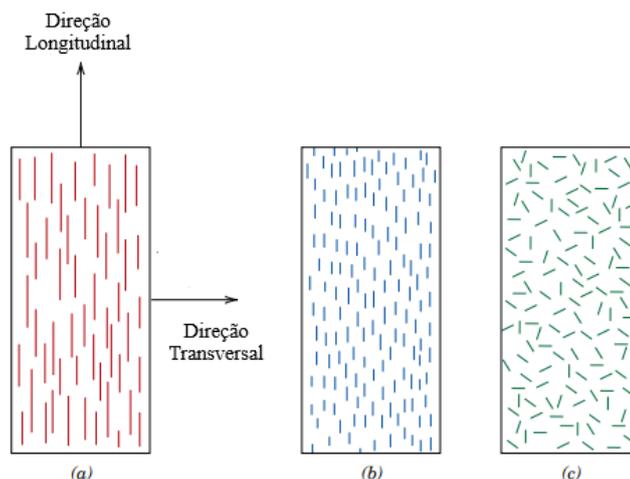
classificadas como descontínuas são mais curtas e reforçam menos, já que a matriz sofre deformação ao redor das fibras, não havendo praticamente nenhuma transferência de tensão. (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2010; YANG; PARK; PARK, 2019).

Outros aspectos que afetam o comportamento do compósito são a dispersão e a orientação das fibras. Fibras aglutinadas dificultam a transmissão da carga, por isso, uma distribuição uniforme dos reforços fornece melhores propriedades para o compósito. As propriedades mecânicas finais dos compósitos dependem também tanto do tipo de fibra, quanto dos grupos químicos superficiais presentes nelas e sua topografia superficial (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2010; LEVY NETO; PARDINI, 2016).

Em relação à orientação, as fibras podem ser alinhadas ou aleatórias. As fibras contínuas geralmente são alinhadas, enquanto as descontínuas podem tanto ser alinhadas quanto aleatórias (Figura 3.3). Fibras alinhadas apresentam propriedades com elevada anisotropia: quando a carga é aplicada longitudinalmente em relação à orientação das fibras, a resistência está diretamente relacionada à resistência da própria fibra, enquanto que a resistência do compósito quando há a aplicação de uma carga transversal dependerá de fatores como as propriedades da fibra e da matriz, a resistência da ligação fibra-matriz e a presença de vazios. O compósito apresenta melhor comportamento quando submetido a esforços na mesma direção da orientação das fibras (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2010).

No caso de fibras aleatórias, elas geralmente são descontínuas e proporcionam ao material compósito características isotrópicas. O módulo elástico da matriz é aumentado em alguma proporção da fração volumétrica da fibra (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2010).

Figura 3.3 - Representação de fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e aleatórias.



Algumas das características das fibras que se destacam são sua alta resistência específica (resistência/peso) e alta rigidez específica (rigidez/peso). Essas propriedades contribuem para aprimorar a resistência à tração e a rigidez e aumentar a resistência ao impacto em baixas temperaturas do compósito (YANG; PARK; PARK, 2019).

As fibras mais amplamente utilizadas são: fibras de vidro, fibras de carbono, fibras de aramida e fibras naturais (YANG; PARK; PARK, 2019).

Os compósitos de matriz polimérica termorrígida reforçados com fibras podem ser processados de diversas maneiras, incluindo pultusão, prepreg, enrolamento filamental, laminação manual, entre outros (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2010).

A pultrusão é um processo no qual fibras contínuas são impregnadas com a resina, puxadas através de uma matriz para serem conformadas e levadas até um molde no qual ocorre a cura do termorrígido. Prepreg, por sua vez, é um material em forma de fita obtido através de fibras pré-impregnadas com uma resina parcialmente curada; essa fita pode ser moldada e curada conforme o objetivo da aplicação do material. No processo de enrolamento filamental as fibras são posicionadas conforme um padrão, submetidas a um banho de resina e então enroladas de maneira contínua ao redor de um mandril, formando um produto oco que é então submetido ao processo de cura (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2010). O processo de laminação manual é um dos mais utilizados na fabricação dos compósitos poliméricos termorrígidos. Ele consiste na aplicação de resina no molde, incorporação de fibras, sendo aplicada pressão manualmente para garantir que a resina penetre bem e que as fibras fiquem completamente impregnadas e, por fim, a cura (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

3.4 Fibras Naturais

As fibras naturais podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. Seu uso em materiais compósitos visa principalmente a incorporação de carga de material reciclável e de baixo custo à matriz, reduzindo o custo do compósito. Diferentemente de fibras sintéticas, as fibras naturais não são capazes de reforçar compósitos mecanicamente de maneira muito relevante (LEE *et al.*, 2021; LEVY NETO; PARDINI, 2016; LOTFI *et al.*, 2019).

As fibras naturais vegetais podem ser obtidas a partir de resíduos agroindustriais e pós-consumo, como por exemplo das coroas de abacaxis ou resíduos de fabricação de produtos da indústria têxtil (PRADO; SPINACE, 2011).

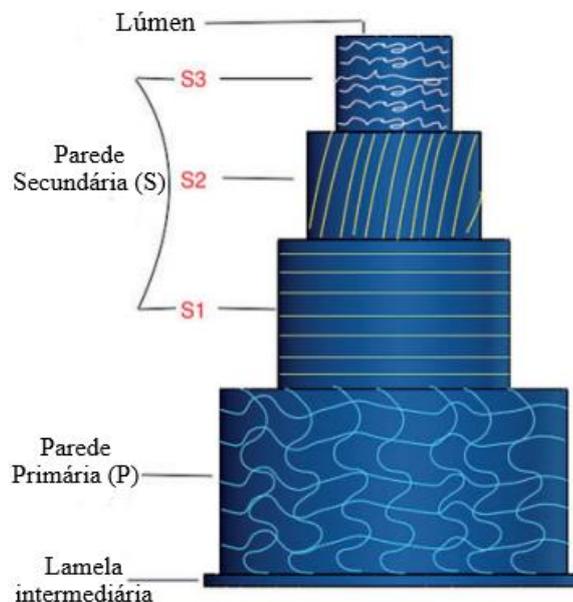
Em comparação com as fibras sintéticas, pode-se destacar uma série de vantagens das fibras naturais: baixo custo, baixa densidade, biodegradabilidade, elevado isolamento acústico

e térmico, maciez e abrasividade reduzidas e baixo consumo de energia na produção (LEVY NETO; PARDINI, 2016; LOTFI *et al.*, 2019).

Por outro lado, as fibras naturais apresentam propriedades mecânicas inferiores e outras limitações como: baixas temperaturas de processamento (degradação à baixas temperaturas), baixa estabilidade dimensional, alta sensibilidade a intemperismos, menor durabilidade e má adesão interfacial com a matriz (LEVY NETO; PARDINI, 2016; Lotfi *et al.*, 2019).

Quimicamente, as fibras vegetais apresentam 5 constituintes: celulose, cera, lignina, hemicelulose e pectina. Já estruturalmente, elas são constituídas por 4 partes principais, apresentadas na Figura 3.4 (LATIF *et al.*, 2018).

Figura 3.4 - Estrutura de uma fibra natural.



Fonte: Adaptado de LATIF *et al.*, 2018.

O lúmen é o canal central da fibra, responsável pelo transporte de água. Já a lamela intermediária e as paredes primária e secundária compõem a parede celular da fibra vegetal (LATIF *et al.*, 2018).

A parede primária consiste basicamente em celulose desordenada agindo como reforço em uma matriz combinada de pectina, hemicelulose e lignina. Já a lamela intermediária, majoritariamente composta por lignina, é responsável por estabelecer as ligações entre as fibras. Por fim, a parede secundária consiste em celulose cristalina e apresenta três camadas: parede secundária externa (S1), parede intermediária (S2, que forma o corpo principal da célula) e parede interna (S3) (LATIF *et al.*, 2018).

Os componentes das fibras com lignocelulose (celulose, hemicelulose e lignina) desempenham papéis na absorção de água, sendo a hemicelulose responsável pela captação da maior parcela de água (GRYCZAK; BERNADIN, 2021).

As propriedades mecânicas das fibras naturais são influenciadas diretamente por características físicas como o diâmetro e comprimento da fibra (conforme discutido na Seção 3.3.2), a densidade e o ganho de umidade. Além disso, a quantidade de celulose e hemicelulose, bem como o ângulo das microfibrilas regem as propriedades mecânicas (LATIF *et al.*, 2018).

Tendo em vista os diversos fatores que podem afetar as propriedades das fibras naturais, é razoável inferir que suas características apresentam uma variabilidade natural. Até mesmo aspectos relativos ao cultivo do vegetal como a maturidade da fibra, a qualidade do solo, a técnica de extração da fibra, a época da colheita e a origem da fibra podem atuar no comportamento do material (LOTFI *et al.*, 2019).

Considerando os compósitos reforçados com fibras naturais (CRFN), as propriedades mecânicas são influenciadas pela remoção de componentes não celulósicos, cuja presença na superfície das fibras naturais dificulta a ligação interfacial matriz-reforço. Tal ligação, juntamente com o índice de cristalinidade da celulose são os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos CRFN (LATIF *et al.*, 2018).

Muitas vezes há uma incompatibilidade entre os componentes dos CRFN, seja devido ao aspecto suave que as fibras naturais apresentam em sua superfície (dificultando o acoplamento matriz-fibra) ou a propriedades físicas (como hidrofiliabilidade/hidrofobicidade). Essa incompatibilidade pode ser reduzida com a realização de tratamentos superficiais nas fibras (LATIF *et al.*, 2018).

Os tratamentos superficiais podem ser tanto físicos, quanto químicos. Tratamentos físicos mudam as condições superficiais das fibras sem afetar sua composição química, exemplos são: tratamento a laser, tratamento térmico, plasma ou utilizando argônio. Já os tratamentos químicos modificam a composição química, a topografia superficial e a morfologia das fibras. Para isso, são utilizados produtos químicos como bases, silano, ácido acético, dióxido de titânio, siloxano oligomérico, entre outros (LATIF *et al.*, 2018).

As fibras tratadas fisicamente apresentam propriedades mecânicas, físicas e térmicas melhores se comparadas às fibras tratadas quimicamente. Contudo, o tratamento químico apresenta menor custo e sua execução é mais simples, o que favorece sua utilização em detrimento de outro tipo de tratamento (LATIF *et al.*, 2018).

Em relação à aplicação dos CRFN, nos últimos anos um dos segmentos em que estão mais visados é o automotivo. Fabricantes e fornecedores passaram a utilizar esse tipo de reforço

com o intuito de substituir cargas minerais e sintéticas em uma grande quantidade de produtos (LOTFI *et al.*, 2019).

As fibras naturais mais utilizadas são: sisal, linho, banana, algodão, juta, kenaf, bambu, coco, entre outras. A escolha de qual fibra utilizar deve se basear nos seguintes critérios: propriedades mecânicas, físicas e térmicas e sua relevância para a aplicação; tensão de falha; preço e custos de processamento; tratamentos superficiais para melhorar a adesão e molhabilidade e a disponibilidade (LOTFI *et al.*, 2019). Na Tabela 3.1 estão apresentadas propriedades mecânicas de diversas fibras, que podem ser analisadas para embasar a escolha.

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas de fibras naturais.

Fibra Natural	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Abaca	400-980	6,2-20
Bagaço (cana)	222-290	17-27,1
Banana	500	12
Bambu	140-800	11-32
Coco	95-230	2,8-6
Algodão	287-800	5,5-12
Linho	343-2000	27,6-103
Cânhamo	270-900	23,5-90
Juta	320-800	8-78
Kenaf	223-930	14,5-53
Sisal	363-700	9-38

Fonte: Adaptado de LOTFI *et al.*, 2019.

Lopes *et al* (2021) compararam a performance de um compósito de poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado com fibras de bambu e de *oriented strand board* (OSB) comercial. Propriedades mecânicas como resistência à flexão e ao impacto foram significativamente aumentadas, sendo a resistência ao impacto do compósito 26 vezes mais alta do que da OSB.

Aparicio *et al* (2024) obtiveram compósitos de poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado com fibras de piaçava da Amazônia com diferentes frações de isocianato e polioliol, observando um aumento no módulo de ruptura à medida em que a fração de isocianato aumentava. Por outro lado, devido à quantidade insuficiente de resina polimérica e elevada fração de fibras (85%), não foi possível recobrir inteiramente as fibras de modo a formar uma interface satisfatória entre matriz e reforço.

Gryczak e Bernadin (2021) desenvolveram compósitos de RPDOM reforçada com casca de arroz, material com lignocelulose, assim como a bananeira. Foi observado que quanto maior

a quantidade de fibra adicionada, maior foi a absorção de água por parte do compósito, pois a absorção ocorre não somente através da superfície do reforço, mas também pelo lúmen por ação capilar.

RPDOM também foram reforçadas com palha de cana-de-açúcar. Mileo *et al.* (2010) constataram um aumento da rigidez do compósito com a adição de lignina e celulose e uma maior estabilidade térmica em relação à fibra e à matriz individualmente.

3.4.1 Fibra de Bananeira

As fibras de bananeira pertencem à classe de fibras de caule e são extraídas de uma estrutura denominada pseudocaule. O principal constituinte é a celulose e elas apresentam propriedades mecânicas atrativas para o uso em compósitos (SILVA, 2020).

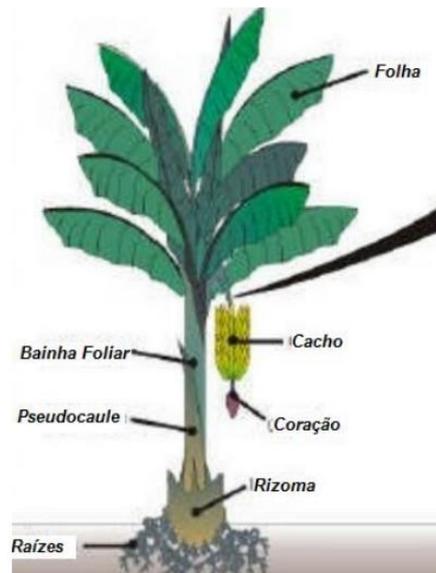
A bananeira dispõe de um caule verdadeiro, denominado rizoma, que se localiza abaixo do solo. Acima desse caule há um pseudocaule e as bananas crescem em cachos no topo dele (SILVA, 2020). Um esquema ilustrativo das estruturas da bananeira está representado na Figura 3.5.

Após a colheita do cacho, uma prática agrícola comum é realizar o corte total ou parcial do pseudocaule com o intuito de acelerar a melhoria nas propriedades físicas e químicas do solo. Essa atividade pode afetar negativamente os produtos vegetais devido à matéria vegetal acumulada no solo caso ela demore para passar pelo processo de decomposição, já que pode se tornar foco de proliferação de fungos (SILVA, 2020; TRINDADE *et al.*, 2004).

Conforme exposto na Figura 3.4, as bainhas foliares são estruturas que envolvem o pseudocaule da bananeira. As bainhas são destacadas do tronco e as fibras podem ser extraídas manual ou mecanicamente (SILVA, 2020).

O processo manual consiste na utilização de uma calandra para retirar água, seguida do posicionamento da bainha em uma mesa e um processo de retirada da porção não fibrosa por meio do uso de uma escova de aço. Após a retirada completa do conteúdo não fibroso, ocorre a lavagem e secagem das fibras. Já no processo mecânico utiliza-se uma máquina desfibradora para a retirada das fibras (SILVA, 2020).

Figura 3.5 - Estrutura da bananeira.



Fonte: SILVA, 2020.

Devido à existência de hemicelulose e outras impurezas na região interfacial entre matriz e reforço, a adesão entre matrizes poliméricas e fibras de bananeira pode ser comprometida. Portanto, recomenda-se a realização de modificações na superfície das fibras (AL-DAAS *et al.*, 2023).

Al-Daas *et al.* (2023) obtiveram êxito no aprimoramento da interação e da adesão entre matriz polimérica e fibras de bananeira a partir de tratamento alcalino (mercerização). Observou-se elevação no módulo elástico do compósito e um aumento razoável da resistência à tração, além da remoção de impurezas da superfície da fibra.

Mercerização também foi realizada em compósito de fibra de bananeira e matriz de polipropileno. Através de microscopia óptica de varredura (MEV), observou-se diferenças entre as superfícies das fibras tratadas e não tratadas, sendo que as últimas apresentaram grande concentração de impurezas. Análises do MEV também demonstraram uma melhora na adesão matriz-reforço. O uso de NaOH reduziu a absorção de água pelas fibras (CLIMACO; BECKER; BALZER, 2009).

Oyewo *et al.* (2023) evidenciaram mudanças nas características das fibras de pseudocaule de bananeira a partir de acetilação, como a formação de orifícios na superfície das fibras que funcionam como estruturas de intertravamento, promovendo acoplamento entre matriz e fibras, além da remoção de estruturas de lignocelulose.

Kadire e Joshi (2024) estudaram o efeito de diferentes concentrações de soluções de NaOH nas propriedades finais de compósitos reforçados com fibras de bananeira. Foi

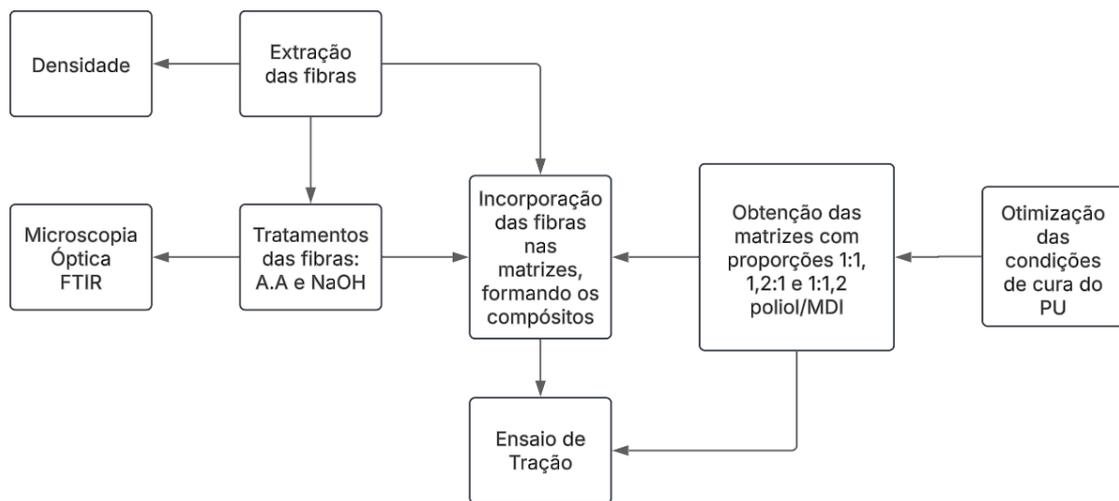
constatado que a concentração de 5% foi a que resultou em um material com maior resistência à tração, flexão e impacto, além de menor absorção de água, quando comparado a tratamento alcalino com outras concentrações. Clímaco, Becker e Balzer (2009) também verificaram que dentre concentrações de 2%, 5% e 10%, a com 5% foi a que apresentou melhores resultados em ensaios mecânicos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição Geral do Trabalho

O procedimento experimental será realizado conforme apresentado na Figura 4.1. Os corpos de prova obtidos a partir do compósito serão caracterizados em ensaio de tração a fim de determinar as propriedades mecânicas de tensão de ruptura e módulo de elasticidade do material obtido.

Figura 4.1 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

4.2 Materiais

O poliuretano termofixo foi obtido a partir dos seguintes insumos:

- Poliol Poliéster Biopol® 2117 da empresa PolyUrethane;
- Diisocianato de Difenilmetano Ecopoly Iso Biopol (MDI) da empresa PolyUrethane;
- Peneira Molecular GK3;
- Catalisador Dibutil Dilaurato de Estanho.

Para o tratamento superficial das fibras de bananeira foram utilizados:

- Ácido Acético Glacial 99,8% P.A.;
- Hidróxido de Sódio P.A-ACS (micropérolas).

4.3 Extração das Fibras

A amostra de pseudocaule de bananeira foi obtida em área externa de domínio público. A extração das fibras de bananeira foi realizada de maneira manual, seguindo o procedimento descrito por Carvalho (2015). As fibras foram retiradas das três camadas mais externas (conforme destacado na Figura 4.2) do pseudocaule, por apresentarem maior resistência mecânica.

Figura 4.2 - Estruturas utilizadas para extração das fibras.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2024.

Inicialmente, as bainhas foliares (camadas 1, 2 e 3) foram separadas do pseudocaule e em seguida cortadas longitudinalmente em tiras. Após isso, um instrumento cortante foi utilizado para retirar transversalmente as diversas camadas das tiras, até expor a camada mais interna, denominada palha da bananeira.

Foram então realizados processos de raspagem contínuos da palha com espátula serrilhada de material polimérico para evitar danos à estrutura do material, de maneira que restassem apenas as fibras, conforme apresentado na Figura 4.3. Com as fibras acessíveis, foi realizado um procedimento de lavagem com água e posteriormente a secagem ao sol.

Figura 4.3 - Fibras de bananeira expostas.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2024.

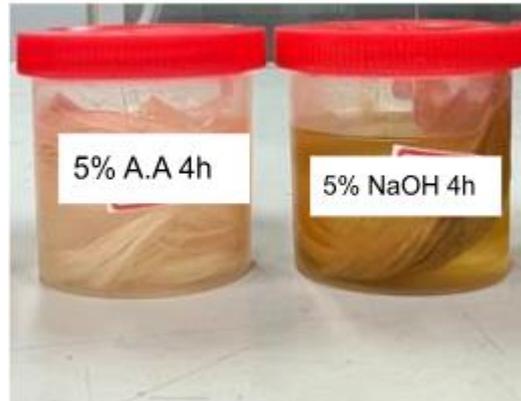
Para garantir a que as fibras não absorvessem água durante o armazenamento, elas foram mantidas em um dessecador com sílica gel. Além disso, as fibras foram secas em estufa a 60°C por 2 horas antes da incorporação à matriz polimérica para remover a umidade.

4.4 Tratamento das Fibras

Foram realizados tanto tratamento alcalino, quanto tratamento ácido na superfície das fibras de bananeira. Foi utilizada uma mesma concentração para os dois tratamentos, estabelecida com base nos procedimentos descritos tanto por Kadire e Joshi (2024), quanto por Clímaco, Becker e Balzer (2009).

Para os tratamentos foram utilizadas soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido acético, ambas na concentração de 5%. As fibras foram colocadas em contato com a solução em repouso, conforme mostrado na Figura 4.4, e temperatura ambiente durante um período de 4 horas e, ao final do tratamento, as fibras passaram por processo de lavagem para neutralização com água destilada e secagem a 60 °C em estufa.

Figura 4.4 - Fibras do pseudocaulo de bananeira imersas em Ácido Acético (à esquerda) e Hidróxido de Sódio (à direita) para tratamento superficial.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2024.

4.5 Obtenção da matriz de PU

O processo de mistura dos reagentes foi realizado manualmente. Inicialmente, o polioli foi misturado com 1 g de peneira molecular. Em seguida, adicionou-se o MDI na proporção de 1:1 mol/mol (1 polioli: 1 MDI) e realizou-se a mistura. Por fim, foram adicionados 0,03 g de catalisador. Todo o processo de mistura foi realizado de maneira lenta para evitar a formação de bolhas e a expansão do PU.

Após a mistura dos reagentes, o material foi vertido em um molde. Os moldes utilizados possuem dimensões de 213,27 mm x 20,00 mm x 2,50 mm, conforme apresentado na Figura 4.5.

Durante a cura as misturas foram acondicionadas ao ar, em dessecador e sob vácuo, verificando-se a influência das variáveis pressão e umidade, conforme explicitado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Condições de cura do PU.

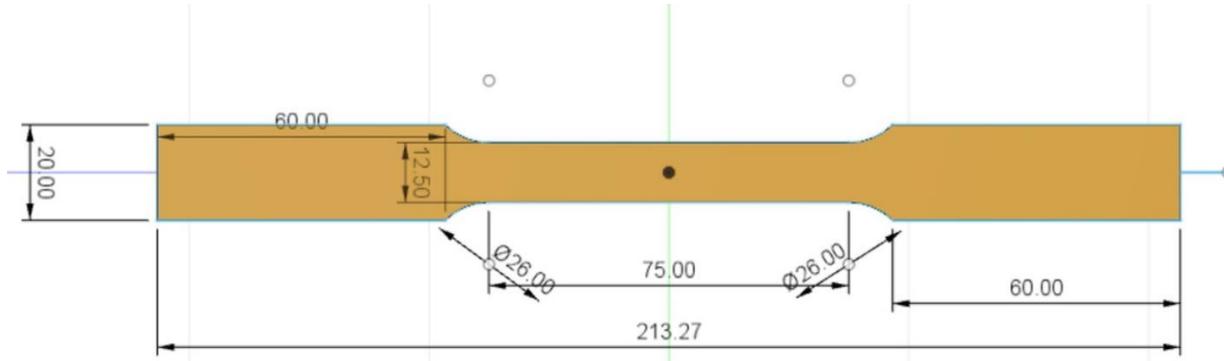
Identificação	Razão Polioli:MDI (mol/mol)	Peneira Molecular (g)	Catalisador (g)	Cura
1P1MSA	1:1	1,0	0,03	Ao ar
1P1MD	1:1	1,0	0,03	Dessecador
1P1MV	1:1	1,0	0,03	Vácuo

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

Para garantir a condição de vácuo e remoção de gases, criando um ambiente de baixa pressão comparada à pressão atmosférica, foi utilizada uma embalagem à vácuo impermeável e uma bomba elétrica de sucção.

Já para a redução da umidade em relação à do ambiente do laboratório, foi utilizada sílica gel no dessecador.

Figura 4.5 - Dimensões do Corpo de Prova.



Fonte: INJETA3D MOLDES, 2025.

O processo de cura do poliuretano foi realizado em um período de 24 horas em temperatura ambiente. Após esse tempo, o material foi retirado do molde e foi avaliado seu aspecto superficial em relação à quantidade de bolhas, qualidade da moldagem e expansão.

4.5.1 Otimização das proporções de polioli e MDI

Uma vez definida a condição de cura mais favorável, ou seja, aquela que apresentou menor quantidade de bolhas, foram produzidas matrizes de poliuretano com três diferentes proporções de polioli e MDI conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Formulações das matrizes de PU

Identificação	Razão Polioli:MDI (mol/mol)	Peneira Molecular (g)	Catalisador (g)	Cura
1,2P1MSF	1,2:1	1,0	0,03	Vácuo
1P1,2MSF	1:1,2	1,0	0,03	Vácuo
1P1MSF	1:1	1,0	0,03	Vácuo

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

4.6 Obtenção dos Compósitos

A matriz do compósito foi obtida conforme item 4.5.1. Foi utilizada uma proporção fixa de 2% de fibras v/v. Após a secagem das fibras, a maior parte delas foi mantida longa, para avaliar o comportamento mecânico de fibras contínuas e orientadas, e as demais fibras foram cortadas com o comprimento de 5-10 mm, para avaliar o comportamento das fibras curtas dispersas aleatoriamente na matriz.

Para os compósitos reforçados com fibras longas, foi realizado o processo de laminação manual: metade da resina foi vertida no molde, as fibras foram então posicionadas e impregnadas e em seguida o restante da resina foi vertida sobre o molde.

Já para os compósitos reforçados com fibras curtas, as fibras foram misturadas manualmente diretamente à resina antes de ser vertida no molde.

Foi realizada a cura durante 24 horas em temperatura ambiente e, após a desmoldagem, as rebarbas dos corpos de prova provenientes do vazamento da resina após aplicação de vácuo foram retiradas com o uso de uma lixa d'água grão 200.

4.7 Caracterização

4.7.1 Caracterização das fibras

4.7.1.1 Densidade

Após a extração das fibras, foi realizado um procedimento para determinar a densidade com o auxílio de um picnômetro. Primeiramente, o picnômetro vazio foi pesado (m_p), em seguida as fibras de bananeira foram adicionadas e a massa novamente aferida (m_{p+f}) e por fim, foi adicionada água até completar o volume do picnômetro e mediu-se novamente a massa.

A densidade das fibras foi obtida a partir dos cálculos apresentados nas Equações 1-3.

$$m_f = m_{p+f} - m_p \quad (1)$$

$$V_f = V_p - V_a \quad (2)$$

$$d_f = m_f/V_f \quad (3)$$

Em que: m_f é a massa das fibras em gramas;

m_p é a massa do picnômetro em gramas;

m_{p+f} é a massa do picnômetro e fibras em gramas;

V_f é o volume das fibras em mL;

V_p é o volume do picnômetro = 50 mL;

V_a é o volume de água em mL;

d_f é a densidade das fibras em g/cm³.

4.7.1.2 Análise de Superfície

As superfícies das fibras tratadas e sem tratamento foram analisadas com o auxílio de um microscópio biológico trinocular Digilab DI-521T. Foi realizada a coleta e análise de pelo menos 5 fibras para cada tratamento. O aumento utilizado foi de 40x para todas as amostras, sendo 4x associado à lente objetiva e 10x à ocular.

4.7.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

O FTIR foi utilizado para observar a remoção dos componentes indesejados (lignina e hemicelulose) das fibras de pseudocaule de bananeira a partir dos tratamentos superficiais em todas as condições.

O equipamento utilizado para a análise foi o IR Prestige 21, da marca Shimadzu. A resolução utilizada foi de 2,0 cm⁻¹, o número de scans foi de 52 e a faixa do espectro analisada foi de 4000 a 400 cm⁻¹.

4.7.3 Ensaio de Tração

O ensaio foi realizado tanto para definir o tipo de reforço (fibras longas ou curtas) que proporciona maior resistência mecânica para o compósito, quanto para verificar as propriedades finais dos compósitos.

O equipamento utilizado foi a Máquina Universal de Ensaio Shimadzu AG-X, com célula de carga de 10 kN. A velocidade de deslocamento do cabeçote foi de 5 mm/min e foram ensaiados 5 corpos de prova para cada condição avaliada, conforme norma da *American Society for Testing and Materials* ASTM D638-10 (2014).

A partir das informações obtidas ponto a ponto, foi plotado o gráfico Tensão x Deformação. As propriedades-alvo para o trabalho determinadas a partir do ensaio mecânico foram a resistência à tração e o módulo de elasticidade.

A Tabela 4.3 apresenta as condições dos corpos de prova compósitos ensaiados.

A partir dos ensaios dos compósitos reforçados com fibras não tratadas, observou-se que o aumento da resistência provocado pela adição de fibras foi muito superior para a proporção de 1 polioliol:1 MDI. Dessa forma, as fibras tratadas tanto com NaOH quanto com CH₃COOH foram utilizadas para reforçar as matrizes do tipo 1P1MSF. Foram também ensaiadas fibras curtas para essa mesma proporção de polioliol e MDI.

Tabela 4.3 - Corpos de prova ensaiados em tração

Identificação	Razão Polioliol:MDI (mol/mol)	Tratamento (5% 4h)	Fibras (v/v)
1P1,2MSF	1:1,2	-	-
1P1,2MFB	1:1,2	-	2%
1,2P1MSF	1,2:1	-	-
1,2P1MFB	1,2:1	-	2%
1P1MSF	1:1	-	-
1P1MFB	1:1	-	2%
1P1MFB - NaOH	1:1	NaOH	2%
1P1MFB - A.A	1:1	CH ₃ COOH	2%
1P1MFBC	1:1	-	2% (curtas)

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Densidade

A densidade das fibras não tratadas (d_f) foi de $0,65 \text{ g/cm}^3$. Tendo em vista que o processo de extração das fibras depende principalmente da habilidade do responsável pela raspagem do material, podendo haver danos à estrutura principal da fibra durante a retirada dos componentes menos desejados, os valores de densidade das fibras de pseudocaule de bananeira variam consideravelmente na literatura. Borges e Pereira (2016) descreveram um procedimento em que as fibras foram trituradas, colocadas em recipiente de volume conhecido e em seguida pesadas, resultando em uma densidade de $1,5 \text{ g/cm}^3$ após cálculos. Já Carvalho (2015) obteve uma densidade entre $0,66 \text{ g/cm}^3$ e $0,82 \text{ g/cm}^3$ com o auxílio de um picnômetro, valor mais próximo do obtido neste estudo. Bharathi, Vinodhkumar e Saravanan (2021), por outro lado, apontaram que as fibras de bananeira apresentam densidade entre $0,75$ e $0,95 \text{ g/cm}^3$.

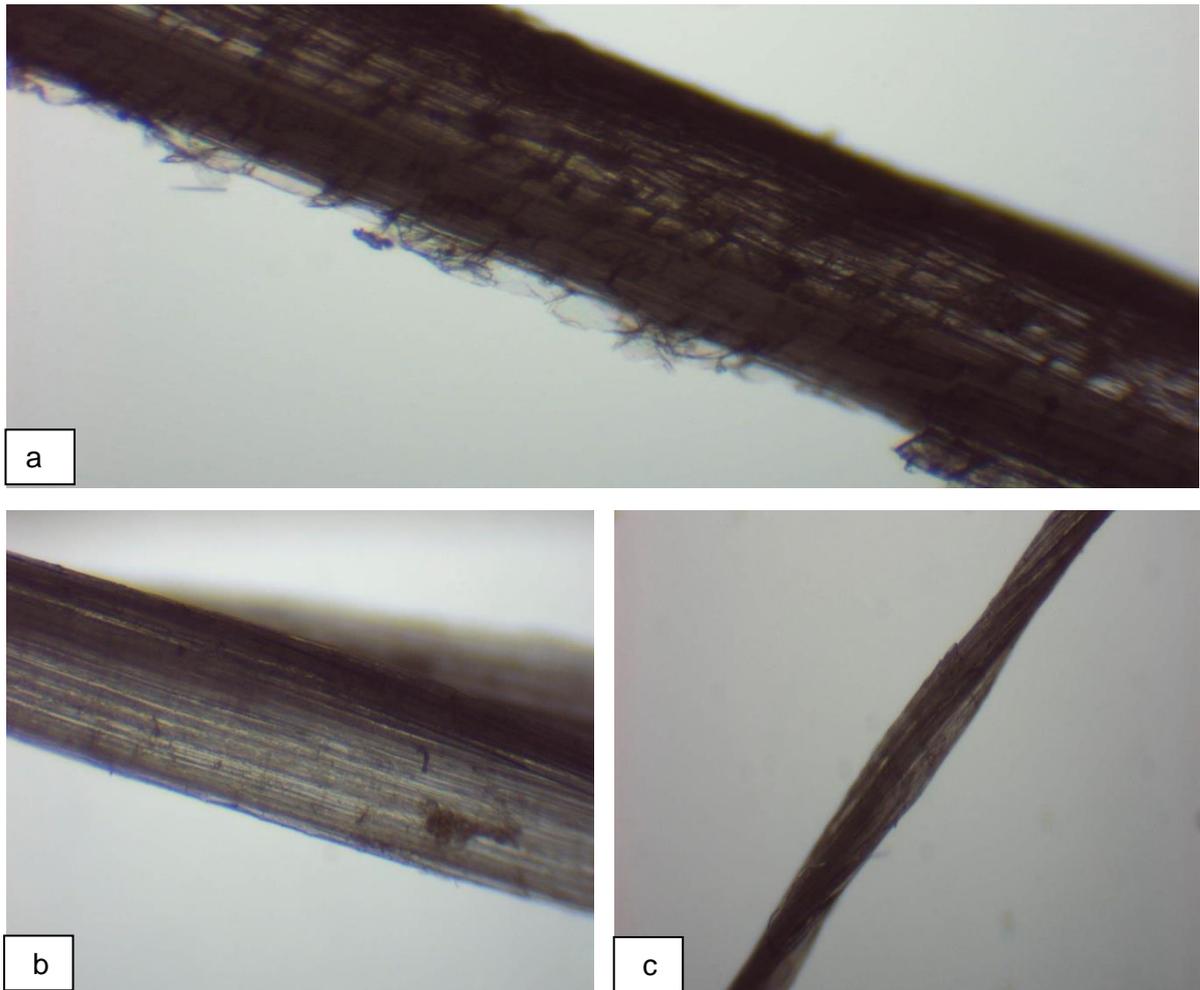
5.2 Análise de superfície

Visualmente, observou-se que as fibras sem tratamento (Figura 5.1a) apresentam impurezas em sua superfície, que foram retiradas tanto pelo tratamento alcalino (Figura 5.1c), quanto pela acetilação (Figura 5.1b).

As fibras tratadas com NaOH apresentaram uma visível redução de diâmetro. Al-Daas *et al.* (2023) demonstraram que o hidróxido de sódio promove a remoção parcial de hemicelulose e lignina das fibras de bananeira ao remover ligações de hidrogênio presentes na estrutura da celulose. Essa interação pode ser responsável pela redução dimensional observada no diâmetro das fibras. A hipótese de aumento de exposição da celulose devido à remoção de impurezas tanto por NaOH quanto por CH_3COOH também é corroborada por Oyewo *et al.* (2023).

O aspecto superficial mais liso e limpo - observado nas duas condições de tratamento - das fibras tratadas é um indicativo de que há possibilidade de interação interfacial entre fibras e matriz de maneira mais adequada, devido ao aumento da área superficial efetiva da fibra (FOOK; YATIM, 2015).

Figura 5.1 – Aumento de 40x para as fibras de bananeira: a) sem tratamento, tratadas em b) 5% CH_3COOH por 4h e c) 5% NaOH por 4h.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2024.

Em relação à coloração, as fibras tratadas com ácido acético apresentaram a mesma cor das fibras não tratadas (Figura 5.2a). As fibras tratadas com NaOH , por outro lado, apresentaram aspecto amarelado (Figura 5.2b).

Fook e Yatim (2015) observaram um aspecto amarelado em fibras naturais após tratamento alcalino. A mudança de coloração foi devido à remoção de impurezas, cera e lignina contidos na superfície externa da parede celular.

Figura 5.2 - Aspecto macroscópico das fibras tratadas em a) CH_3COOH , b) NaOH .

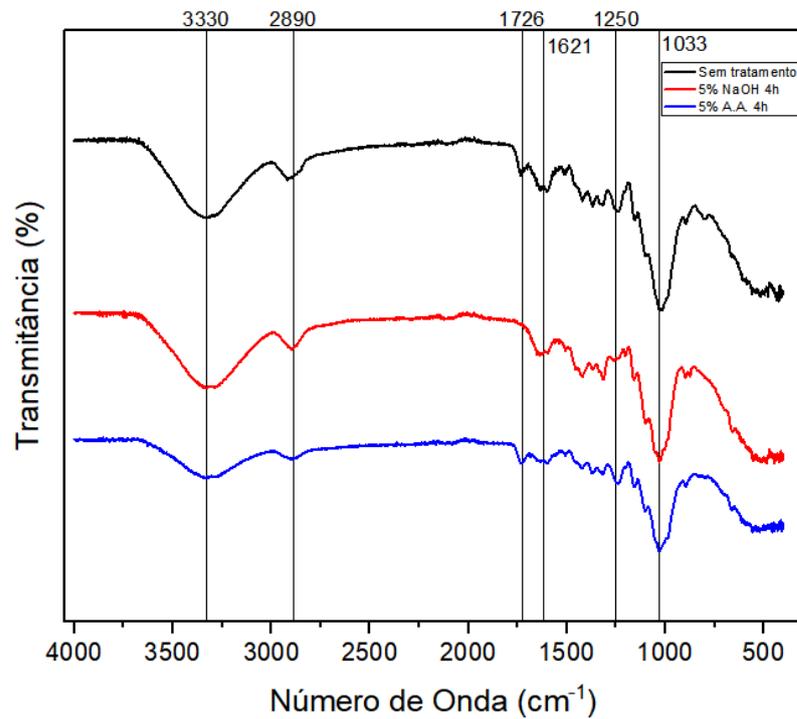


Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2024.

5.3 FTIR

Os espectro na região do infravermelho das fibras tratadas e não tratadas são apresentados na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Espectros na região do Infravermelho das fibras de bananeira sem tratamento e após tratamento com NaOH e CH_3COOH .



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

A banda de absorção entre 3000 cm^{-1} e 3500 cm^{-1} é atribuída à vibração do grupo hidroxila (OH), presente na celulose virgem. Uma redução na intensidade do pico pode estar relacionada a um distúrbio da ligação de hidrogênio que unia a celulose às impurezas presentes na fibra.

As bandas presentes entre 2887 cm^{-1} e 2894 cm^{-1} , como é o caso do encontrado em 2890 cm^{-1} , podem ser atribuídos ao estiramento C-H dos grupos metil e metileno. Essa banda foi significativamente reduzida na condição de tratamento com ácido acético. A banda em $\sim 1033\text{ cm}^{-1}$ indica vibração de alongamento da ligação C-O-C que estão presentes na celulose (AL-DAAS *et al.*, 2023; CARVALHO 2015).

Os picos em 1726 cm^{-1} e 1621 cm^{-1} são associados à hemicelulose (ácido carboxílico e cetonas) e à lignina (ligações C=C), respectivamente (CARVALHO, 2015; PEREIRA, 2013). No tratamento alcalino, é possível verificar que o pico atribuído à hemicelulose ficou praticamente ausente. No tratamento com A.A., verificou-se uma redução acentuada da intensidade do pico referente à lignina.

Observa-se também uma redução da intensidade do pico presente em 1250 cm^{-1} para o tratamento com NaOH, o que indica a remoção bem sucedida da hemicelulose atribuída a esse pico (AL-DAAS *et al.*, 2023).

5.4 Matriz de PU

5.4.1 Condições de cura

Todos os corpos de prova apresentaram bolhas, seja em sua superfície ou em seu interior. É importante salientar que o preparo da matriz não foi realizado em um ambiente livre de umidade, dessa forma, é possível que durante o processo de polimerização tenham ocorridos reações paralelas entre o isocianato e a água, resultando na formação de CO_2 e uma amina, com posterior formação de ureia, conforme a Equação 4 (SONNENSCHNEIN, 2021).



A cura realizada ao ar (Figura 5.4) foi a que permitiu maior formação de CO_2 , sendo possível observar elevada quantidade de bolhas sendo formadas.

Figura 5.4 - 1P1MA



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

O aspecto superficial dos corpos de prova obtidos a partir de cura em dessecador está apresentado na Figura 5.5. A quantidade de bolhas diminuiu em relação ao que foi observado na cura ao ar, porém o controle da cura em ambiente seco com o uso de sílica foi menos efetivo na redução da quantidade de bolhas do que em ambiente com vácuo (Figura 5.6).

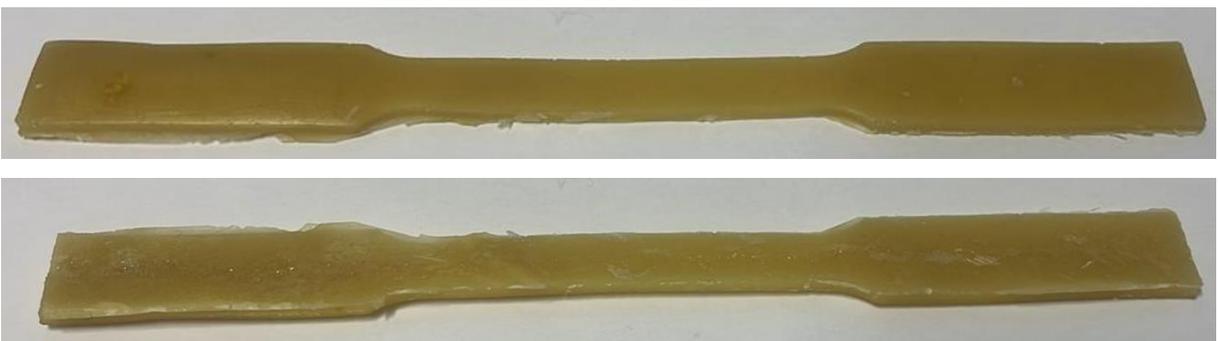
Figura 5.5 - 1P1MD



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

Ainda é possível observar uma pequena quantidade de bolhas para a condição 1P1MV. Silva (2003) também experienciou a formação de bolhas apesar do uso de dispositivo de vácuo, o que sugere que a umidade presente no ambiente durante a mistura dos componentes do poliuretano também pode afetar a geração de CO_2 .

Figura 5.6 - 1P1MV



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

5.4.2 Proporção de polioli e MDI

Uma vez estabelecido que a condição de cura mais favorável é à vácuo, foram testadas diferentes proporções de polioli e MDI. Além da de 1 polioli:1 MDI mol/mol, foram testadas proporções com 20% de excesso tanto de polioli, quanto de MDI.

A matriz de PU com excesso de MDI é mostrada na Figura 5.7, enquanto o corpo de prova com excesso de polioli é mostrado na Figura 5.8. Ambos apresentam pequena quantidade de bolhas visíveis, demonstrando que a cura a vácuo realmente contribuiu para a redução da quantidade de CO₂.

Ao manipular os corpos de prova, foi possível verificar que os do tipo 1P1,2MSF apresentaram superfície pegajosa, o que pode indicar que houve uma cura incompleta. Essa adesividade se deve à presença de grupos isocianatos não reagidos que, por conta da sua baixa energia livre, são expostos à superfície, conforme descrito por Ivdre *et al.* (2020). Os corpos de prova do tipo 1,2P1SF apresentaram superfície totalmente seca ao toque.

Figura 5.7 - 1P1,2MSF



Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

Figura 5.8 - 1,2P1MSF





Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

É importante ressaltar que a razão polioli/MDI afeta diretamente as propriedades estruturais, físicas e térmicas do poliuretano. Devido à isso, ainda durante a manipulação dos corpos de prova, percebeu-se que os corpos de prova com mais polioli eram menos rígidos do que os com excesso de MDI. Esse comportamento é pertinente - e foi posteriormente confirmado à partir do ensaio de tração -, dado que o MDI é responsável pelos segmentos mais rígidos do PU (RAYUNG; GHANI; HASANUDIN, 2024).

5.5 Obtenção dos compósitos

As Figuras 5.9a-e mostram os compósitos obtidos a partir do processo de laminação manual.

O compósito com proporção 1 polioli/1,2 MDI apresentou superfície pegajosa, assim como a matriz 1P1,2MSF. O restante das amostras apresentou superfície seca.

Nenhuma delas apresentou acréscimo significativo na quantidade de bolhas na superfície.

Figura 5.9 - Compósitos: a) 1P1MFB, b) 1,2P1MFB, c) 1P1,2MFB, d) 1P1MFB - A.A e e) 1P1MFB - NAOH.





Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

5.5 Ensaio de Tração

Devido à elevada quantidade de bolhas formadas e consequente interferência nas propriedades mecânicas dos materiais, observou-se um desvio padrão elevado para todas as condições de ensaio.

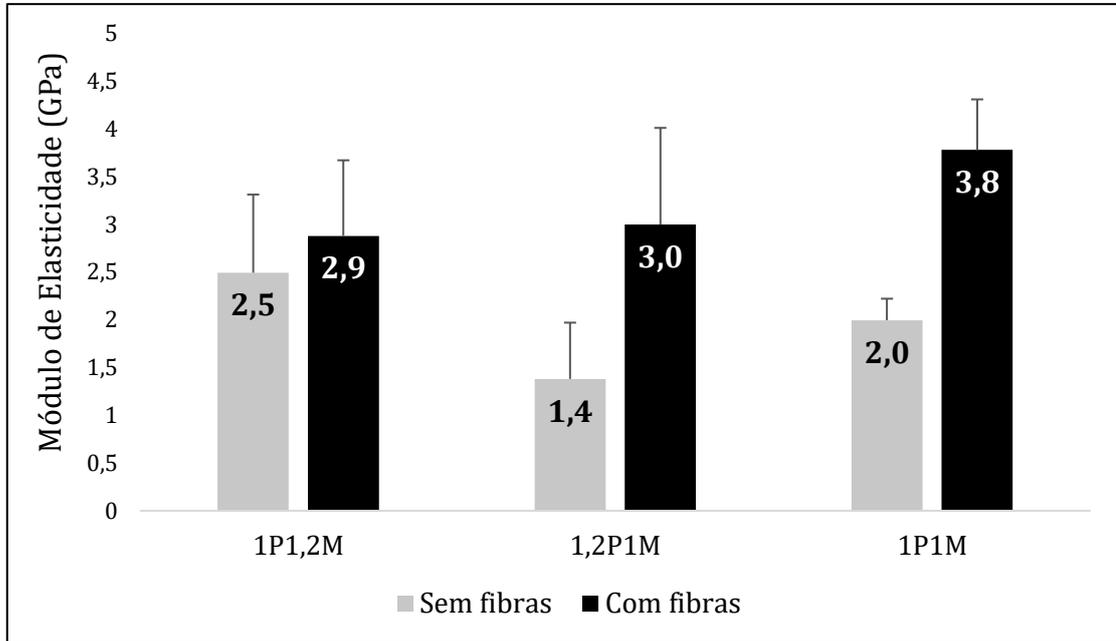
Comparando os corpos de prova sem fibras, observa-se que os do tipo 1P1,2MSF foram os que apresentaram maior módulo de elasticidade em tração: $2,5 \pm 0,8$ GPa (Figura 5.10). Mesmo com a presença de adesividade na superfície devido ao excesso de MDI, a maior rigidez se deve ao fato de que os isocianatos presentes nas extremidades das cadeias podem formar ligações cruzadas adicionais. Em contraste, os corpos de prova 1,2P1MSF foram os que apresentaram menor módulo de elasticidade em tração - maior flexibilidade -, justamente devido à maior quantidade de hidroxilas (MOTTA, 2011; SOUZA; KAHOL; GUPTA, 2021).

Para os materiais compósitos, o uso de fibras longas e orientadas na direção do esforço aumentou o módulo de elasticidade em todas as condições, incluindo os compósitos com fibras tratadas.

O acréscimo mais discreto em termos de módulo elástico em tração foi observado nos compósitos 1P1,2MFB, apenas 16%, enquanto que o maior foi para os corpos de prova 1,2P1MFB, de 114%. A maior proporção de MDI pode ter contribuído para a hidrofobicidade do poliuretano, diminuindo a compatibilidade com as fibras, que são hidrofílicas, apresentando OH em sua estrutura, conforme verificado na seção 5.3. Em contrapartida, o excesso de polioli

em 1,2P1MFB pode ter contribuído para a hidrofiliicidade do PU e adesão fibras/matriz (SOUZA; KAHOL; GUPTA, 2021).

Figura 5.10 - Módulo de Elasticidade em tração para matrizes e compósitos com fibras longas não tratadas.

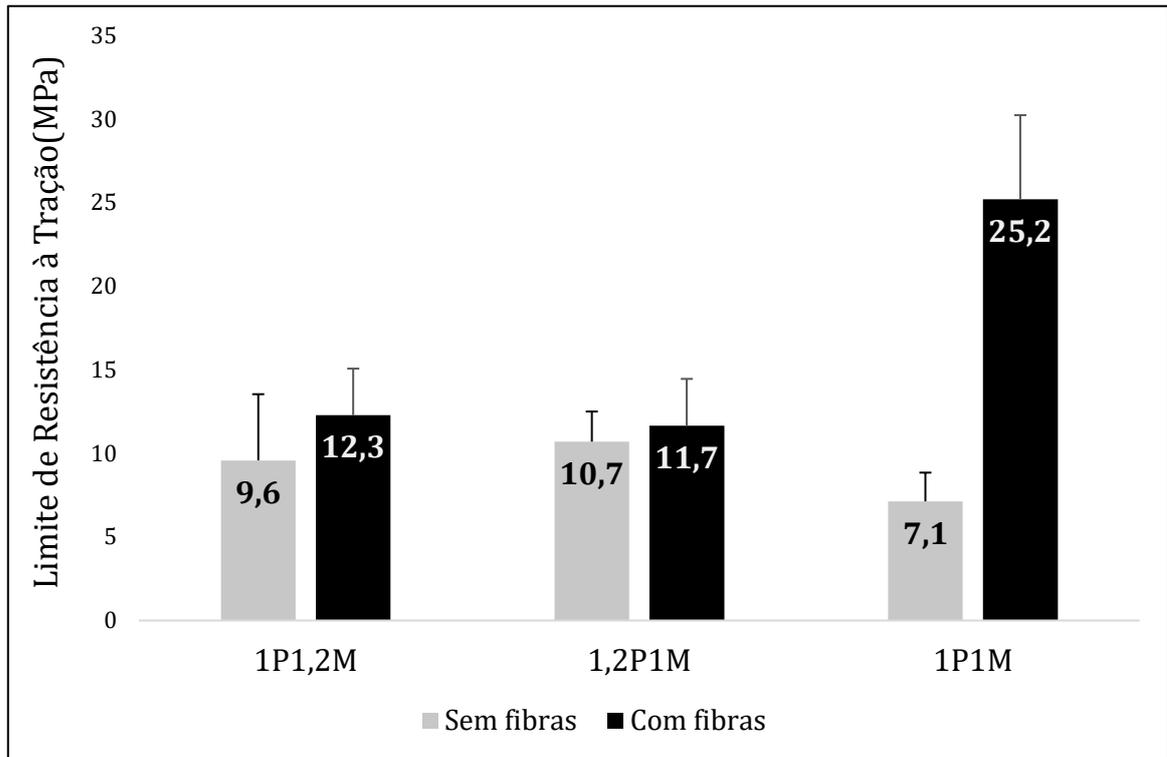


Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

Em termos de limite de resistência à tração (Figura 5.11), dentre os corpos de prova sem fibras, os que apresentaram maiores valores foram os 1,2P1MSF, com $10,7 \pm 1,8$ MPa. Isso pode indicar que a maior relação entre NCO/OH presente nas outras formulações e a consequente maior reticulação interfere na mobilidade das cadeias poliméricas, tornando o material menos resistente à deformação (MOTTA, 2011; SOUZA; KAHOL; GUPTA, 2021).

Considerando os materiais compósitos, houve um aumento significativo na resistência mecânica em relação à matriz de PU para 1P1MSF, apresentando um crescimento de 255%. Isso pode indicar que a ligação interfacial entre matriz e fibras foi mais bem sucedida na condição de proporções iguais entre polioliol e MDI (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2010).

Figura 5.11 – Limite de resistência à tração para matrizes e compósitos com fibras longas não tratadas.



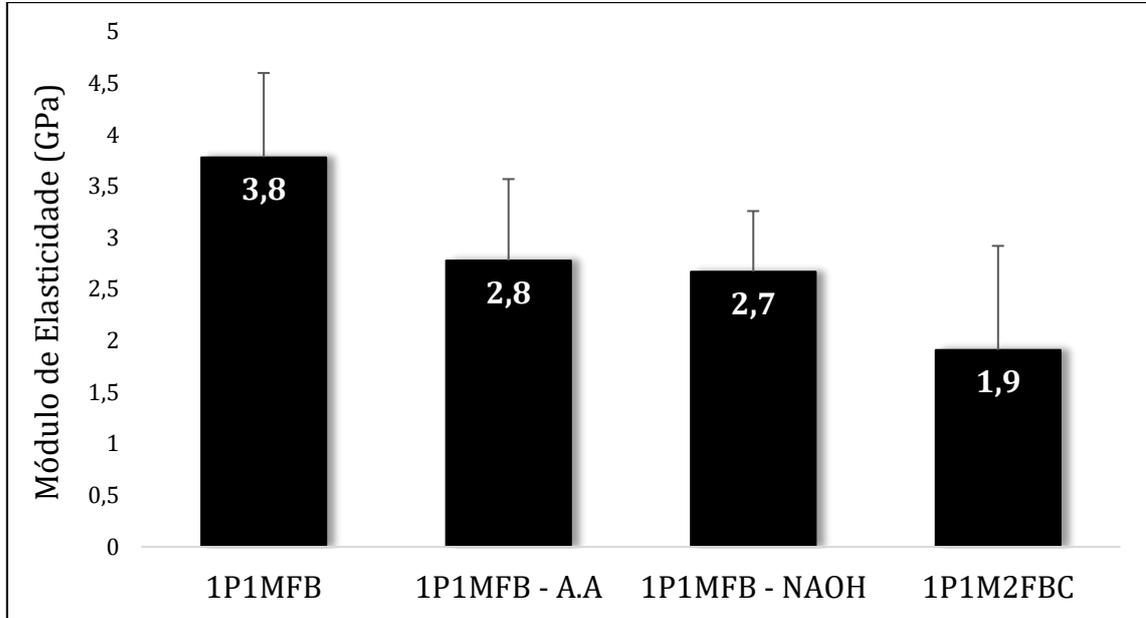
Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

A partir do comportamento mecânico dos compósitos, verificou-se que o reforço mais eficiente se deu com a matriz com proporção de polioli/MDI de 1:1. Com isso, foram realizados ensaios de tração com as fibras longas tratadas, e também com as fibras curtas sem tratamento a partir da matriz 1P1MSF.

A Figura 5.12 mostra o módulo de elasticidade para todas as condições de compósitos com razão 1 polioli/ 1 MDI. Observou-se que o acréscimo na rigidez dos compósitos com proporções iguais de polioli e MDI com fibras não tratadas foi superior ao com as fibras tratadas. Esse fato indica que, assim como observado por Clímaco, Becker e Balzer (2009) para algumas condições de seus experimentos com fibras de bananeira tratadas, é possível que tenha ocorrido um ataque químico às fibras que levou a um decréscimo de suas propriedades mecânicas.

O tratamento com ácido acético aparentemente foi mais eficiente para compatibilizar fibra e matriz do que o alcalino. Observa-se que para 1P1MFB-A.A tanto a tensão de ruptura quanto o módulo elástico foram maiores. É possível que a redução mais significativa na banda entre 3000 cm^{-1} e 3500 cm^{-1} (indicando distúrbio das ligações de hidrogênio entre a celulose e as impurezas, hemicelulose e lignina) tenha contribuído para um comportamento ligeiramente mais hidrofóbico por parte da fibra (AL-DAAS *et al.*, 2023).

Figura 5.12 - Módulo de Elasticidade em tração para compósitos com matriz 1P1M.

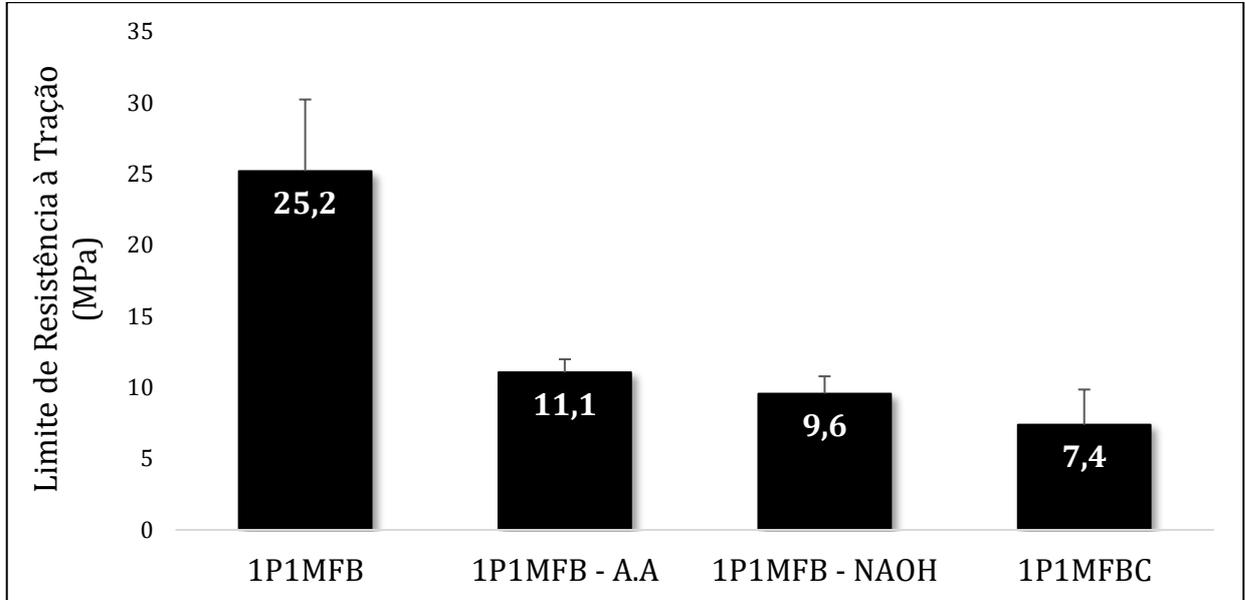


Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

A Figura 5.13 mostra a tensão de ruptura para todas as condições de compósitos com razão 1 poliol/ 1 MDI. Assim como para o caso do módulo elástico, os compósitos com fibras tratadas apresentaram menor tensão de ruptura se comparados aos com fibras tratadas, corroborando a hipótese de que o tratamento causou uma degradação nas propriedades das fibras (CLIMACO; BECKER; BALZER, 2009).

Becker, Kleinschmidt e Balzer (2014) também relataram um decréscimo na resistência à tração em compósitos reforçados com fibras de bananeira tratadas por mercerização, além de uma redução do módulo de elasticidade de fibras submetidas a tratamento alcalino e acetilação. Esses resultados foram associados a um excesso de delignificação e à baixa adesão entre matriz e fibras.

Kadire e Joshi (2024) apontaram que, a depender da concentração de NaOH, pode ocorrer a deterioração da celulose e de outros componentes estruturais, reduzindo a capacidade das fibras de suportar carga e diminuindo a resistência mecânica.

Figura 5.13 – Limite de resistência à tração para compósitos com matriz 1P1M.

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2025.

Para os dois parâmetros obtidos através do ensaio de tração, as fibras curtas apresentaram comportamento mecânico inferior às fibras longas. É sabido que reforços orientados longitudinalmente à aplicação do esforço tendem a contribuir de maneira mais significativa para a resistência do compósito, uma vez que a resistência do material estará intrinsecamente ligada à resistência da fibra em si (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2010).

6 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a obtenção de compósitos de poliuretano termofixo com condições de cura e proporção polioliol/diisocianato otimizadas, reforçado com fibras de pseudocaule de bananeira.

Verificou-se que as características da matriz de poliuretano, principalmente no que diz respeito à quantidade de bolhas e expansão do material está intrinsecamente relacionada às condições nas quais esse polímero é desenvolvido. Parâmetros como a umidade do ambiente são impactantes para a formação de CO₂, que é capaz de modificar a estrutura do material, tornando-o menos resistente mecanicamente devido à presença de porosidade na estrutura.

Além disso, a proporção entre polioliol e MDI também se mostrou impactante para o desempenho do material. Observou-se que excesso de MDI e grupos isocianatos nas extremidades das cadeias podem causar fragilidades no material devido à formação de ligações cruzadas em excesso.

A obtenção das fibras e tratamentos superficiais ocorreram conforme descrito pela literatura, porém os tratamentos não melhoraram a resistência mecânica do compósito devido ao ataque químico sofrido pelas fibras.

Os resultados indicaram que, dentre os compósitos, o que apresentou proporções iguais de polioliol e MDI foi capaz de causar uma interação mais favorável com as fibras, visto que apresentou maior tensão de ruptura e módulo de elasticidade simultaneamente. Contudo, o uso de fibras contínuas se mostrou eficiente para aumentar a resistência mecânica de todos os corpos de prova, pois o fato de a resistência depender das características da própria fibra predominou frente à condição de interação menos favorável.

Os efeitos do uso de fibras curtas foram coerentes com as informações da literatura. Como esperado, o ganho em resistência mecânica foi inferior ao obtido com as fibras contínuas devido a menor quantidade de área disponível para interação entre fibra e matriz.

Por fim, destaca-se a importância do controle dos parâmetros de obtenção do PU, principalmente o equilíbrio na formulação do material durante a síntese, garantindo que todos os grupos reativos participem da formação da rede polimérica desejada.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para trabalhos futuros o estudo do comportamento dos compósitos de poliuretano reforçados com fibras de pseudocaule de bananeira quando submetidos a outros tipos de carregamentos mecânicos (como flexão e impacto) e do comportamento tribológico.

Também é recomendado realizar os tratamentos superficiais das fibras em tempos mais curtos, para evitar a degradação das propriedades mecânicas das fibras e atingir um nível de sinergia entre matriz e fibra superior ao verificado para as fibras sem tratamento.

Além disso, a realização de ensaios de biodegradabilidade, comparando-se compósitos que utilizam poliuretano obtido a partir de polióis de fontes não renováveis com os de mamona, forneceria dados relevantes para a consideração do material para aplicações sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- AL-DAAS, Aseel; AZMI, Azlin Suhaida; ALI, Fathilah Binti; ANUAR, Hazleen. The Effect of Alkaline Treatment to Pseudo-Stem Banana Fibers on the Performance of Polylactic Acid/Banana Fiber Composite. **Journal of Natural Fibers**, [S.L], 2023. DOI: 10.1080/15440478.2023.2176401
- ALVES, Lucas Repecka; CARRIELLO, Giovanni Miraveti; PEGORARO, Guilherme Manassés; REZENDE, Maira de Lourdes; MENEZES, Aparecido Junior de. Aplicações de Enzimas em Poliuretano: uma revisão das dissertações e teses brasileiras. **Disciplinarum Scientia - Ciências Naturais e Tecnológicas**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 99-112, ago. 2022. *Disciplinarum Scientia: Serie Ciencias Naturais e Tecnologicas*. <http://dx.doi.org/10.37779/nt.v23i2.4313>. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/4313/3039>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3878 - 23: Standard Terminology for Composite Materials**. Conshohocken, 2023. 7 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ISO/ASTM D638–10: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. 2014.
- APARICIO, Rosinaldo R; DOS SANTOS, Gabrielle Machado; REBELO, Viviane Siqueira Magalhães; GIACON, Virgínia Mansanares; DA SILVA, Cristina Gomes. **Scientific Reports**, vol. 14, no. 1, 20 Mar. 2024, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54000-4>. Acesso em: 20 Nov. 2024.
- BHARATHI, S Vidya; VINODHKUMAR, S; SARAVANAN, M.M. Strength characteristics of banana and sisal fiber reinforced composites. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 1055, n. 1, p. 1-8, 1 fev. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1055/1/012024>.
- BECKER, D.; KLEINSCHMIDT, A. C.; BALZER, P. S.. Compósitos de PVC rígido e fibras de bananeira: Efeito do tratamento da fibra. **Revista Matéria**, Joinville, v. 19, n. 3, p. 257-265, set. 2014.
- BORGES, Daiana de Oliveira; PEREIRA, Warley Augusto. **ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À RUPTURA DAS FIBRAS DE BURITI E BANANEIRA**. 2016. 15 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2016.
- CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Materials Science and Engineering: an introduction**. 8. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- CANEVAROLO JR, Sebastião V.. **Ciência dos Polímeros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.
- CANGEMI, José M.; DOS SANTOS, Antonia M.; C. NETO, Salvador; CHIERICE, Gilberto O. Biodegradation of Polyurethane Derived from Castor Oil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Ribeirão Preto, v. 18, n. 3, p. 201-206, jan. 2008.

CARVALHO, Adriana Caldas. **Fabricação e caracterização de compósitos à base de resina epóxi e fibras de bananeira**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2015.

CLIMACO, A.; BECKER, D.; BALZER, P. Compósitos de Polipropileno e Fibra de Bananeira: estudo da influência do tratamento alcalino das fibras de bananeira nas propriedades do compósito. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS*, 10., 2009, Maringá. **Anais**. Joinville: Instituto Superior Tupy, 2009.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. 2 ed. New York: Oxford University Press, 2006. 463 p.

EBEWELLE, Robert O.. **POLYMER SCIENCE AND TECHNOLOGY**. Cidade do Benin: Crc Press Llc, 2000.

FOOK, Lam Tian; YATIM, Jamaludin Mohamad. AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF ALKALI TREATMENT ON PROPERTIES OF KENAF FIBER FOR REINFORCED CONCRETE ELEMENTS. **International Journal Of Research In Engineering And Technology**. India, p. 37-40. ago. 2015.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAVEND, Lei de Kara. **Production, use, and fate of all plastics ever made**, p. 1-5. jul. 2017. Disponível em: <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/sciadv.1700782>. Acesso em: 12 dez. 2024.

GRYCZAK, Marcelo; BERNADIN, Adriano Michael. Development and characterization of sustainable agglomerated composites formulated from castor polyurethane resin and reinforced with rice husk. **Clean Technologies And Environmental Policy**, [S.L.], v. 23, n. 5, p. 1655-1662, 2 fev. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-021-02036-9>.

IBRAHIM, S; A AHMAD; MOHAMED, N s. Synthesis and characterization of castor oil-based polyurethane for potential application as host in polymer electrolytes. **Bulletin Of Materials Science**, India, v. 38, n. 5, p. 1155-1161, set. 2015.

IVDRE, Aiga; ABOLINS, Arnis; SEVASTYANOVA, Irina; KIRPLUKS, Mikelis; CABULIS, Ugis; MERIJS-MERI, Remo. Rigid Polyurethane Foams with Various Isocyanate Indices Based on Polyols from Rapeseed Oil and Waste PET. **Polymers**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 738, 26 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym12040738>.

KADIRE, Temam; JOSHI, Shrikrishna N.. Effects of alkaline treatment and manufacturing process on mechanical and absorption properties of Wild Abyssinia Banana fiber reinforced epoxy composite. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 98, p. 212-218, 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.045>.

KAUR, Raminder; SINGH, Pooja; TANWAR, Surya; VARSHNEY, Gunjan; YADAV, Sarla. Assessment of Bio-Based Polyurethanes: perspective on applications and bio-degradation. **Macromol**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 284-314, 4 jul. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/macromol2030019>.

LATIF, Rashid; WAKEEL, Saif; KHAN, Noor Zaman; SIDDIQUEE, Arshad Noor; VERMA, Shyam Lal; KHAN, Zahid Akhtar. Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: a review. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 15-30, 2 out. 2018. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684418802022>.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 416 p.

LI, YebO; LUO, Xiaolan; HU, Shengjun. Polyols and Polyurethanes from Vegetable Oils and Their Derivatives. **Springerbriefs In Molecular Science**, [S.L.], p. 15-43, 2015. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-21539-6_2.

LIMA, Juliana Domingues; BRAVO, Natália de Souza; ROZANE, Danilo Eduardo; NOMURA, Edson Shigueak; DA SILVA, Silvia Helena Modenese Gorla; GOMES, Eduardo Nardini. Waste management of pseudostem to increase the growth of banana seedlings. **Acta Agronômica**, Colombia, v. 69, n. 3, p. 228-233, ago. 2020. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/1699/169968951009/html/#B11>. Acesso em: 20 ago. 2023.

LOTFI, Amirhossein; LI, Huaizhong; DAO, Dzung Viet; PRUSTY, Gangadhara. Natural fiber-reinforced composites: a review on material, manufacturing, and machinability. **Journal Of Thermoplastic Composite Materials**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 238-284, 28 abr. 2019. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0892705719844546>.

LOPES, Mariana Dias Machado; PÁDUA, Magno de Souza; DE CARVALHO, Juliana Peixoto Rufino Gazem; SIMONASSI, Noan Tonini; LOPEZ, Felipe Perissé Duarte; COLORADO, Henry A.; VIEIRA, Carlos Maurício Fontes. Natural based polyurethane matrix composites reinforced with bamboo fiber waste for use as oriented strand board. **Journal Of Materials Research And Technology**, v. 12, p. 2317-2324, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.023>.

MACEDO, Vinícius de; ZIMMERMANN, Matheus Vinicius Gregory; KOESTER, Letícia Scherer; SCIENZA, Lisete Cristine; ZATTERA, Ademir José. Obtenção de espumas flexíveis de poliuretano com celulose de *Pinus elliottii*. **Polímeros**, [S.L.], v. 27, n. , p. 27-34, 16 jan. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2212>.

MILEO, Patrícia Câmara; DE OLIVEIRA, Matheus F.; LUZ, Sandra M.; ROCHA, George J.M.; GONÇALVES, Adilson Roberto. Evaluation of Castor Oil Polyurethane Reinforced with Lignin and Cellulose from Sugarcane Straw. **Advanced Materials Research**, [S.L.], v. 123-125, n. , p. 1143-1146, 11 ago. 2010. Trans Tech Publications, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.123-125.1143>.

MORAIS, S. F. A.; DA SILVA, Monique G.A.; DA SILVA, E. C.; DE MELO, A. M. F. Synthesis and Stabilization of Gold Nanoparticles in Castor Oil. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 1, p. 95-105, jan. 2013. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20130009>.

PRADO, K.; SPINACE, M. Caracterização de fibras naturais proveniente de resíduos agroindustriais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 11., 2011, Campos do Jordão. **Anais**. Santo André: Universidade Federal do ABC, 2011. 6 p.

MOTTA, Bruno Cesar Silva. **Estudo do efeito do uso de polioli reciclado nas propriedades mecânicas da espuma rígida de poliuretano**. 2011. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

OYEWO, Abideen Temitayo; OLUWOLE, Oluleke Olugbemiga; AJIDE, Olusegun Olufemi; OMONIYI, Temidayo Emmanuel; HUSSAIN, Murid. Banana pseudo stem fiber, hybrid composites and applications: a review. **Hybrid Advances**, [S.L.], v. 4, p. 100101, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100101>.

PEREIRA, André Luís Sousa. **NANOCOMPÓSITOS BASEADOS EM PVOH E NANOCRISTAIS DE CELULOSE OBTIDOS DE PSEUDOCAULE DE BANANEIRA**. 2013. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

RAYUNG, Marwah; GHANI, Noraini Abd; HASANUDIN, Norhafizah. A review on vegetable oil-based non isocyanate polyurethane: towards a greener and sustainable production route. **Rsc Advances**, [S.L.], v. 14, n. 13, p. 9273-9299, fev. 2024. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d3ra08684d>.

REZENDE, Mirabel Cerqueira; COSTA, Michelle Leali; BOTELHO, Edson Cochieri. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.

SANTOS, Antonia Marli dos; CLARO NETO, Salvador. Influência das Razões de OH/NCO na Biodegradabilidade do Poliuretano Derivado de Óleo Vegetal por Análise Térmica. **Brazilian Journal Of Thermal Analysis**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 21-25, 30 out. 2015. Instituto Internacional de Análise Térmica. <http://dx.doi.org/10.18362/bjta.v4.i3.226>.

SILVA, Fernanda Souza. **UTILIZAÇÃO DA MALHA ENTRECruzADA DA FIBRA DE BANANEIRA COMO REFORÇO NA LAMINAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS ARTIFICIAIS E NATURAIS**. 2020. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais., Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2020.

SILVA, Rosana Vilarim da. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Engenharia de Materiais., São Carlos, 2003.

SONNENSCHNEIN, Mark F.. **POLYURETHANES: Science, Technology, Markets, and Trends**. 2. ed. Midland: John Wiley & Sons, Inc., 2021

SOUZA, Felipe M. de; KAHOL, Pawan K.; K.GUPTA, Ram. Introduction to Polyurethane Chemistry. In: K.GUPTA, Ram; KAHOL, Pawan K.. **Polyurethane Chemistry: renewable polyols and isocyanates**. Washington: American Chemical Society, 2021. p. 1-24.

TRINDADE, Aldo Vilar *et al.* **O cultivo da bananeira**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2004.

VILAR, Walter Dias. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 1998. Disponível em: <https://poliuretanos.com.br/livro/livro.htm>. Acesso em: 10 dez. 2024.

YANG, Guijun; PARK, Mira; PARK, Soo-Jin. Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: a review. **Composites Communications**, [S.L.], v. 14, p. 34-42, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coco.2019.05.004>.