

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

MARCELO VIEIRA RODRIGUES

**COMPÓSITOS DE POLIURETANO TERMOFIXO REFORÇADOS COM FIBRAS**  
**NATURAIS DE VETIVER**

BELO HORIZONTE

2025

MARCELO VIEIRA RODRIGUES

**COMPÓSITOS DE POLIURETANO TERMOFIXO REFORÇADOS COM  
FIBRAS NATURAIS DE VETIVER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Mayra Aparecida Nascimento

BELO HORIZONTE

2025

MARCELO VIEIRA RODRIGUES

**COMPÓSITOS DE POLIURETANO TERMOFIXO REFORÇADOS COM FIBRAS  
NATURAIS DE VETIVER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:     /     /

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dra. Mayra Aparecida Nascimento, Orientadora, CEFET-MG.

---

Prof. Dr. Leonardo Dalseno Antonino, CEFET-MG.

---

Prof. Dra. Aline Silva Magalhães, CEFET-MG.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria ao longo dessa jornada acadêmica.

À minha família, em especial a minhamãe, pelo amor incondicional, apoio constante e incentivo nos momentos mais difíceis.

Aos colegas e amigos que caminharam comigo durante essa trajetória, compartilhando desafios, conquistas e aprendizados. A presença de vocês tornou essa caminhada mais leve e significativa.

A minha orientadora, Professora Mayra Nascimento pela dedicação, paciência e incentivo ao longo do desenvolvimento deste trabalho. 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 pela infraestrutura de qualidade.

Aos professores e técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais, por todo o conhecimento transmitido e pela formação acadêmica que me proporcionaram.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

A crescente preocupação com a poluição ambiental tem motivado a busca por alternativas sustentáveis em diversos setores, incluindo o da produção de materiais. Uma solução promissora reside na utilização de recursos renováveis, como os resíduos agroindustriais, que podem ser transformados em produtos de alto valor agregado. Nesse contexto, a folha do vetiver, um resíduo abundante, geralmente utilizado em artesanato, surge como uma matéria-prima em potencial. Este estudo tem como objetivo principal desenvolver um biocompósito a partir da combinação de duas fontes renováveis: biopoliol, como base para o poliuretano termofixo, e a fibra do vetiver, extraída da folha do vetiver. A fibra do vetiver é conhecida por apresentar elevadas propriedades mecânicas, como resistência a tração e flexão. As propriedades mecânicas do compósito foram investigadas por meio de ensaios de tração e dureza, enquanto o comportamento tribológico foi avaliado para análise do desgaste e do atrito utilizando o ensaio tribológico de roda de borracha. Os resultados obtidos foram comparados aos da matriz de poliuretano puro, permitindo verificar o efeito da incorporação das fibras nas propriedades do material. Os compósitos reforçados mantiveram seu desempenho mecânico em relação a matriz pura, porém o resultado tribológico foi superior em relação à matriz pura, evidenciando o potencial da fibra de vetiver como reforço sustentável para aplicações em materiais compósitos.

Palavras-chave: Folha de vetiver.Fibra.Compósito. Poliuretano.

## ABSTRACT

The growing concern with environmental pollution has driven the search for sustainable alternatives in various sectors, including material production. A promising solution lies in the use of renewable resources, such as agro-industrial waste, which can be transformed into high-value-added products. In this context, vetiver leaves—an abundant residue typically used in handicrafts—emerge as a potential raw material. This study aims to develop a biocomposite from the combination of two renewable sources: castor oil, used in the production of polyol as a base for thermoset polyurethane, and vetiver fiber, extracted from vetiver leaves. Vetiver fiber is known for its high mechanical properties, such as tensile and flexural strength. The mechanical properties of the composite were investigated through tensile and hardness tests, while its tribological behavior was evaluated to analyze wear and friction using the rubber wheel abrasion test. The results were compared to those of the pure polyurethane matrix, allowing the assessment of the effects of fiber incorporation on the material's properties. The reinforced composites maintained their mechanical performance compared to the pure matrix, while the tribological results were superior to those of the pure matrix, highlighting the potential of vetiver fiber as a sustainable reinforcement for composite material applications.

Keywords: Vetiver. Fibers. Composite. Polyurethane.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reação de obtenção Poliuretano .....	15
Figura 2 – Domínios rígidos e flexíveis em espumas de poliuretano .....	16
Figura 3 – Estrutura de uma fibra natural .....	20
Figura 4 – Estrutura molecular da celulose .....	22
Figura 5 – Representação esquemática da organização de cadeias da celulose .....	22
Figura 6 – Fluxograma das etapas de trabalho. ....	25
Figura 7 – Folhas do vetiver .....	26
Figura 8 – Dimensões do corpo de prova.....	29
Figura 9 – Fibras de vetiver tratadas com solução de 5% NaOH.....	31
Figura 10 - Corpo de prova com 0,5g de peneira molecular. a)vista superior b)vista inferior	32
Figura 11 - Corpo de prova com 1g de peneira molecular a) vista inferior b) vista superior ..	32
Figura 12 - Corpo de prova com 2g de peneira molecular a)vista inferior b)vista superior ....	33
Figura 13 – Corpo de prova com 1% de fibras curtas de vetiver. a) vista superior b) vista inferior.....	33
Figura 14 – Corpo de prova com 1,5% de fibras curtas de vetiver. a) vista inferior b) vista superior.....	34
Figura 15 – Limite de resistência à tração para matrizes com variadas proporções de peneira molecular. ....	34
Figura 16 – Módulo de elasticidade para matrizes com variadas proporções de peneira molecular. ....	35
Figura 17 - Limite de resistência à tração para matrizes com variadas proporções de fibras de vetiver.....	36
Figura 18- Módulo de elasticidade para matrizes com variadas proporções de fibras de vetiver. ....	36

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de Vetiver e outras fibras naturais.....	23
Tabela 2 – Dados ensaio de dureza .....	37
Tabela 3 – Cálculo da perda de massa durante o ensaio roda de borracha .....	39

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
2.1	Objetivo geral .....	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Polímeros .....</b>	<b>13</b>
3.1.1	Poliuretanos.....	15
3.1.2	Poliuretano termofixo .....	16
<b>3.2</b>	<b>Compósitos .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Fibras naturais .....</b>	<b>19</b>
3.3.1	Fibras do vetiver.....	22
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Método de obtenção das fibras .....</b>	<b>26</b>
4.2.1	Extração das fibras de Vetiver .....	26
4.2.2	Tratamento das fibras.....	27
<b>4.3</b>	<b>Preparo da matriz de poliuretano termofixo.....</b>	<b>27</b>
<b>4.4</b>	<b>Obtenção dos compósitos .....</b>	<b>28</b>
<b>4.5</b>	<b>Densidade das fibras de vetiver .....</b>	<b>28</b>
<b>4.6</b>	<b>Ensaio de tração do compósito.....</b>	<b>29</b>
<b>4.7</b>	<b>Ensaio de dureza do compósito.....</b>	<b>29</b>
<b>4.8</b>	<b>Ensaio tribológicos.....</b>	<b>30</b>

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>Tratamento alcalino .....</b>	<b>31</b>
<b>5.2</b>	<b>Densidade das fibras de vetiver .....</b>	<b>31</b>
<b>5.3</b>	<b>Otimização da matriz de PU .....</b>	<b>32</b>
<b>5.4</b>	<b>Obtenção dos compósitos .....</b>	<b>33</b>
<b>5.5</b>	<b>Ensaio de tração .....</b>	<b>34</b>
<b>5.6</b>	<b>Ensaio de dureza .....</b>	<b>37</b>
<b>5.7</b>	<b>Ensaio tribológico .....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente preocupação com o meio ambiente, a busca por soluções sustentáveis tem impulsionado a demanda por materiais provenientes de fontes renováveis. Nesse contexto, a engenharia de sustentabilidade surge como um campo multidisciplinar que visa desenvolver processos e produtos mais eficientes, otimizando o uso de recursos e minimizando o impacto ambiental (AKINYEMI *et al.*, 2016). Os biopolímeros, derivados de fontes naturais, surgem como uma alternativa promissora aos polímeros tradicionais por sua abundância, baixo custo e potencial de biodegradabilidade (FRANCHETTI e MARCONATO, 2006).

O poliuretano (PU) é um polímero amplamente utilizado devido à sua versatilidade de processamento e de suas propriedades, e ao bom equilíbrio entre resistência mecânica, durabilidade e propriedades tribológicas, como resistência ao desgaste e à abrasão. Essas características tornam o material adequado para aplicações em diversos setores, incluindo o automotivo, a construção civil e o de revestimentos (COUTINHO e DELPECH, 2009). No entanto, suas propriedades podem ser aprimoradas por meio da incorporação de reforços, especialmente fibras naturais, o que tem despertado interesse crescente no desenvolvimento de compósitos sustentáveis (PITT *et al.*, 2011).

A adição de fibras naturais à matriz de PU tem se mostrado eficaz na melhoria de diversas propriedades do material como resistência à tração e comportamento tribológico, além de serem renováveis e abundantes, também apresentam baixa densidade, fatores que favorecem sua aplicação no desenvolvimento de compósitos poliméricos (de LACERDA *et al.*, 2023).

Dentre as diversas alternativas de fibras naturais, destaca-se a folha de vetiver como um reforço promissor. Essa planta é utilizada geralmente para a prevenção de erosão do solo, porém, como suas folhas precisam ser podadas frequentemente, acaba sendo gerado grande quantidade de resíduo sem valor agregado. Assim, as folhas de vetiver, apresentam potencial para serem reaproveitadas de forma sustentável como material de reforço para a produção de materiais compósitos (RUKSAKULPIWANT 2006). Apesar desse potencial, a aplicação do vetiver como reforço em matrizes poliméricas, especialmente em poliuretano, ainda é pouco investigada na literatura científica.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um compósito de poliuretano termofixo reforçado com fibras extraídas da folha do vetiver,

com o intuito de aprimorar as propriedades do poliuretano. A pesquisa busca não apenas desenvolver um material com propriedades mecânicas aprimoradas, mas também propõe uma alternativa sustentável para o reaproveitamento desse resíduo vegetal, contribuindo para a valorização de subprodutos agrícolas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a influência de fibras de Vetiver nas propriedades mecânicas e tribológicas de um poliuretano termofixo a partir do desenvolvimento de compósitos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar a extração manual das fibras da folha do Vetiver;
- Submeter as fibras extraídas a tratamento químico com soluções de 2% e 5% de hidróxido de sódio (NaOH) por 4 horas;
- Otimizar a formulação da matriz polimérica por meio da variação na quantidade de peneira molecular(0,5g, 1g, e 2g);
- Avaliar a influência de diferentes concentrações de fibras (1% e 1,5% m/m) sobre as propriedades mecânicas e tribológicas dos compósitos obtidos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Polímeros

A palavra polímero origina-se do grego "poli" (muitos) e "mero" (unidade de repetição). Logo, um polímero é uma macromolécula composta por dezenas de milhares de meros, ligadas através de ligações covalente (CANEVAROLO Jr., 2006).

Antes da Primeira Guerra Mundial (1914-1918), o conhecimento sobre os polímeros era extremamente restrito, uma vez que não se tinha acesso às estruturas e formas complexas das moléculas. No entanto, como apontado por José *et al.* (2018), antes mesmo deste período, os polímeros naturais, derivados de animais ou plantas, como borrachas, amidos, celulose e proteínas, eram amplamente utilizados. Apenas em 1920, um cientista alemão chamado Hermann Staudinger sugeriu a teoria sobre macromoléculas, iniciando assim a pesquisa sobre moléculas poliméricas. Em 1929, Wallace H. Carothers realizou experimentos de reações de condensação que resultaram em moléculas de poliamidas, conhecidos como Nylon.

A partir das descobertas de Carothers e da crescente demanda por novos materiais durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), os estudos voltados para o desenvolvimento dos polímeros sintéticos aumentaram (NETO *et al.*, 2007). De forma geral, os polímeros sintéticos são obtidos a partir de insumos originários do carvão, gás natural e petróleo. Esses materiais sintéticos podem ser produzidos com baixos custos de processamento e apresentam propriedades diferenciadas ou mesmo superiores às dos polímeros naturais (CALLISTER., 2016).

Além de serem definidos como naturais ou sintéticos, os polímeros podem ser classificados de acordo com o comportamento mecânico em termoplásticos, elastômeros ou termorrígidos (termofixos) (JOSÉ *et al.*, 2018).

Os termoplásticos são materiais que, quando submetidos a um aumento da temperatura e pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados nessas condições. Após a remoção do calor e da pressão, eles se solidificam, mantendo a forma do molde. Novas aplicações de temperatura e pressão reiniciam o processo, tornando-os recicláveis. Apresentam baixa densidade, boa resistência ao impacto, baixo custo de processamento e ampla aplicabilidade (CANEVAROLO Jr., 2006).

Termorrígidos (termofixos) são polímeros em rede, logo possuem uma cadeia tridimensional com ligações cruzadas, que podem ser conformados apenas uma vez, em um processo irreversível. Após a solidificação, subseqüentes aumentos de temperatura e pressão

não têm mais influência, tornando-os materiais insolúveis, infusíveis e não recicláveis. Assim, os termorrígidos são moldados quando ainda na forma de pré-polímero, ou seja, antes do processo de cura que irá causar a reticulação da cadeia polimérica e posteriormente formação das ligações cruzadas (CANEVAROLO Jr, 2006).

Os materiais elastoméricos possuem elevada capacidade de deformação e retornam à forma original após a retirada do esforço previamente aplicado. Essa propriedade está diretamente relacionada à sua estrutura molecular, composta por cadeias poliméricas longas e amorfas, com algumas ligações cruzadas, que são ligações, geralmente, covalentes que unem duas ou mais cadeias poliméricas. Essas ligações funcionam como pontos de ancoragem, limitando o deslizamento entre as cadeias e permitindo a recuperação da forma inicial após a deformação. Acredita-se que a primeira observação do comportamento de elastômero se deu através do uso da borracha natural (CALLISTER, 2016).

Diferentemente dos polímeros termofixos que possuem uma elevada densidade de ligações cruzadas e, por consequência, uma estrutura rígida e inflexível, os elastômeros apresentam uma densidade significativamente menor desses pontos de reticulação. Isso proporciona maior mobilidade às cadeias, conferindo ao material sua característica flexível e elástica (ASM INTERNATIONAL, 2001).

Dentre os polímeros termorrígidos, a resina epóxi é amplamente utilizada, composta por resina base e agentes de cura, difundida por sua adesão e alta resistência (GUANGYAO *et al.*, 2024). O sistema de formação da resina epóxi normalmente se apresenta como bicomponente, onde os dois reagentes são armazenados separadamente e a mistura deve ser feita apenas momentos antes da aplicação, quando o processo de reticulação da cadeia polimérica ocorre (MOLINARI *et al.*, 2016). Uma das maiores limitações do uso da resina epóxi está relacionada à sua origem não renovável (TUDORACHI e MUSTATA, 2020). As principais matérias-primas utilizadas para a obtenção da resina epóxi são derivadas do petróleo. As refinarias de petróleo são também responsáveis por grandes emissões de gases que provocam o efeito estufa, além do risco de vazamentos de óleo cru no ambiente (MOLINARI *et al.*, 2016).

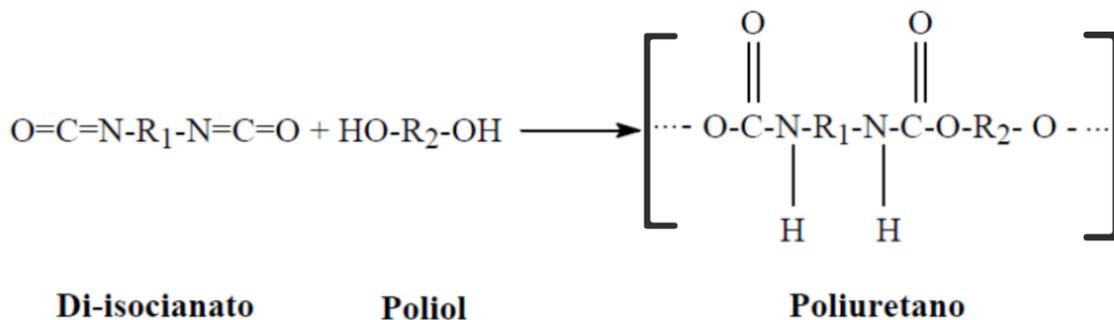
Como alternativa aos materiais de origem petroquímica, as pesquisas voltadas para o desenvolvimento de polímeros obtidos a partir de materiais naturais e renováveis apresentaram grande crescimento nos últimos anos, destacando-se os biopolímeros e os polímeros verdes. Os biopolímeros são materiais obtidos a partir de fontes como cana-de-açúcar, celulose e óleos vegetais, conhecidas como fontes renováveis por possuírem um ciclo de vida mais curto em comparação com fontes fósseis como o petróleo (BRITO *et al.*,

2011).Dentro desse contexto, destaca-se o conceito de polímeros verdes, que engloba tanto os biopolímeros quanto os polímeros sintetizados por rotas químicas menos agressivas ao meio ambiente, independentemente de serem biodegradáveis. Assim, um polímero verde pode ser de origem renovável ou fóssil, desde que seu processo de obtenção e/ou descarte cause menor impacto ambiental em comparação aos materiais convencionais (CAPELIN *et al.*, 2020).

### 3.1.1 Poliuretanos

Os poliuretanos são uma classe de polímeros versátil caracterizados por ligações -NH-CO-O-, formadas pela reação de poliadição entrediiisocianato (com grupos isocianato R-N=C=O) e polioliol (com grupos hidroxila -OH) (Figura 1). Estes polímeros podem se apresentar tanto na forma de um termoplástico, termofixo ou elastômero, nas formas expandidas (espumas) e não expandidas, dependendo da estrutura química e funcionalidade dos reagentes empregados em sua formulação (CANEVAROLO Jr, 2006).

**Figura 1 – Reação de obtenção Poliuretano**



Fonte: Ribeiro da Silva, 2013.

As resinas de poliuretano podem ser obtidas tanto a partir de matérias-primas de origem petroquímica, quanto de fontes naturais renováveis, como diversos óleos vegetais, sendo estas alternativas mais sustentáveis que vêm ganhando destaque em aplicações industriais e acadêmicas. A utilização de óleos vegetais para a obtenção de polióis tem gerado grande interesse de pesquisa devido às constituições dos óleos e às propriedades de biocompatibilidade e biodegradabilidade (ALVES *et al.*, 2021). Óleos vegetais de espécies de plantas como milho, canola, soja e mamona têm despertado grande interesse para essa aplicação. A composição desses óleos contém cerca de 95% de triglicerídeos (SILVA, 2014).

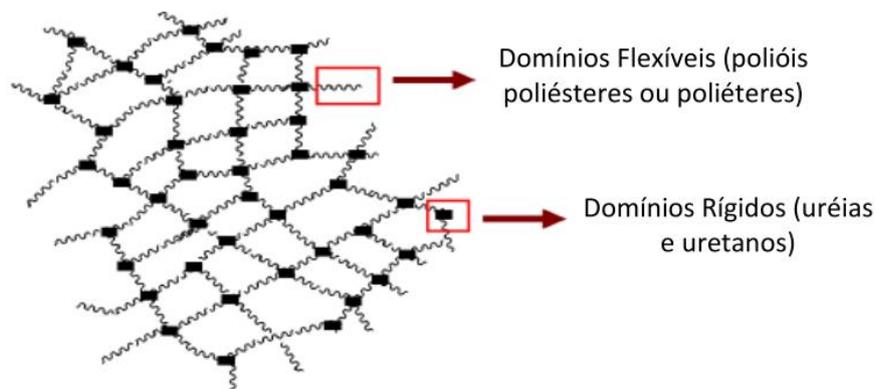
Dentre esses óleos, o óleo de mamona apresenta características químicas distintas quando comparado aos demais óleos devido à presença de ácidos ricinoleicos. A partir desses ácidos, provenientes das sementes da planta, obtêm-se moléculas de poliálcool poliéster ideais para a síntese de poliuretano, conhecidos como BIO-PURs (CANGEMI, 2006; SILVA, 2014).

Os BIO-PURs, formulados a partir de poliálcoois orgânicos, estão sendo desenvolvidos para uma ampla variedade de aplicações. As principais utilizações desses materiais incluem espumas, revestimentos e adesivos. Embora muitas pesquisas sobre os BIO-PURs estejam em andamento, ainda não foi determinada uma formulação de alto desempenho adequada para aplicações estruturais desses materiais (ECHEVERRIA-ALTUNA *et al.*, 2022).

### 3.1.2 Poliuretano termofixo

O poliuretano termofixo (PURs), apresenta estrutura polimérica com alto número de ligações cruzadas, o que irá conferir a ele boa resistência mecânica devido à presença de segmentos rígidos em sua cadeia. Outras propriedades interessantes deste material são a sua capacidade de absorção de impacto devido a presença de segmentos flexíveis (Figura 2) e baixa condutividade térmica (RIBEIRO DA SILVA *et al.*, 2013).

**Figura2– Domínios rígidos e flexíveis em espumas de poliuretano**



Fonte: Ribeiro da Silva, 2013.

O grande número de ligações cruzadas presentes nas cadeias proporciona aos PURs propriedades superiores às apresentadas pelo poliuretano termoplástico (TPU), dentre elas: resistência a compressão, abrasão, tração e ataques químicos, mantendo as características elastoméricas intrínsecas do material (LOPES *et al.*, 2016).

Os PURs possuem características de alto desempenho, maior tenacidade e resistência à fadiga, quando comparados com as resinas epóxi comumente utilizadas, assim possibilitando a utilização de PURs em compósitos estruturais (ECHEVERRIA-ALTUNA *et al.*, 2022).

Os polióis são responsáveis por conferir ao poliuretano características como a elasticidade, uma vez que são segmentos mais flexíveis na cadeia polimérica. Os isocianatos, por sua vez, contribuem para a rigidez do PU. É muito comum o uso de catalisadorestanto para possibilitar que a reação ocorra à temperatura ambiente, quanto para acelerar o processo de cura (SOUZA *et al.*, 2021).

Quando há excesso de diisocianato na formulação, o poliuretano pode apresentar grupos isocianato livres em suas extremidades, os quais podem reagir com dióis, moléculas com dois grupos hidroxila (- OH), promovendo o alongamento da cadeia polimérica, ou com trióis (três grupos hidroxila), formando mais ligações cruzadas (MOTTA, 2011). Já o aumento de isocianato favorece a formação de polímeros de baixo peso molecular, que tendem a se acumular na superfície do poliuretano, contribuindo para a adesividade do material (IVDRE *et al.*, 2020). Em contrapartida, o excesso de poliol pode reduzir a quantidade de ligações cruzadas, o que leva a uma diminuição da rigidez do polímero (SANTOS; CLARO NETO, 2015).

Durante a síntese do poliuretano, a reação do isocianato com a água pode gerar ureia e CO<sub>2</sub>, o que irá criar bolhas gasosas no material. Nesse processo, a água atua como agente expensor, influenciando diretamente na formação da estrutura celular e na morfologia da espuma (SONNENSCHNEIN, 2021; SOUZA *et al.*, 2021). Dependendo do tipo de aplicação desejada, esse efeito de expansão pode prejudicar as propriedades do material, sendo necessária a utilização de técnicas como a aplicação de vácuo para a remoção dos gases retidos (SILVA, 2003; VILAR, 1998).

Outra forma de mitigar a formação de bolhas consiste em realizar a mistura dos insumos de forma lenta e controlada, minimizando a entrada de ar no sistema. Após a mistura inicial, não há geração de novas bolhas, mas sim o crescimento e/ou fusão das bolhas já existentes (SONNENSCHNEIN, 2021). Além disso, a redução de água para reagir com o isocianato pode ser obtida com o uso de agentes secantes, como peneiras moleculares ou zeólitos, especialmente nos reagentes higroscópicos, como o poliol poliéster (VILAR, 1998). Outra abordagem mencionada por Macedo *et al.*, (2017) envolve a secagem do material em dessecador por um período de 24 horas, contribuindo para a redução do teor de umidade residual.

### 3.2 Compósitos

Compósito é a combinação de dois materiais ou mais materiais, uma matriz e um reforço, em duas fases distintas que interagem entre si para criar um novo material que apresenta propriedades diferentes dos componentes puros (ASTM, 2023).

A matriz é responsável por manter a forma do produto, transmitir e distribuir as cargas impostas sob o material e garantir aderência com o reforço, já o reforço é o responsável por suportar a carga que será imposta no compósito (DANIEL; ISHAI, 2006; LEVY NETO; PARDINI, 2016). O principal objetivo de se desenvolver um compósito é a melhoria do material, ao se adicionar uma fase dispersa (reforço) que irá alterar as propriedades da matriz, aumentando as possíveis aplicações do material (CALLISTER, 2016).

As matrizes dos compósitos são separadas em metálicas, cerâmicas e poliméricas, cada uma delas com suas características. De um modo geral, as matrizes cerâmicas apresentam elevada resistência térmica, porém são frágeis. As matrizes metálicas apresentam boa ductilidade e condutividade tanto térmica quanto elétrica. As matrizes poliméricas, geralmente, apresentam baixa densidade, boa processabilidade e resistência ao desgaste químico (SILVA *et al.*, 2010). Tais características favorecem sua aplicação em diversos setores industriais, como automotivo, embalagens e biomateriais. Além disso, a facilidade de conformação dessas matrizes permite a obtenção de peças com geometrias complexas e bom acabamento superficial.

Os compósitos são classificados de acordo com o tipo de reforço que recebem, podendo ser partículas, fibras longas ou fibras curtas (DANIEL; ISHAI, 2006). A distribuição, orientação e quantidade de reforço também irão influenciar nas propriedades do material. A distribuição está relacionada com a disposição espacial dos reforços, quanto a dispersão está relacionada ao grau de aglomeração dos reforços ao longo da matriz. A orientação é importante quando o reforço está na forma de fibras, pois caso as fibras estejam alinhadas a propriedade do material será diferente, geralmente, melhor do que um material no qual as fibras estão organizadas aleatoriamente (ASKELAND 2011).

A principal vantagem de utilizar materiais compósitos é poder aprimorar as propriedades do material a fim de aumentar as possibilidades de escolhas para produzir determinado produto. Uma grande desvantagem é a dificuldade ou impossibilidade de reciclar o material (AGARWAL *et al.*, 2006).

### 3.3 Fibras naturais

Devido à crescente necessidade e demanda de produtos verdes, os quais não agredem o meio ambiente, os estudos envolvendo fibras naturais vêm aumentando por apresentarem características ecologicamente corretas.

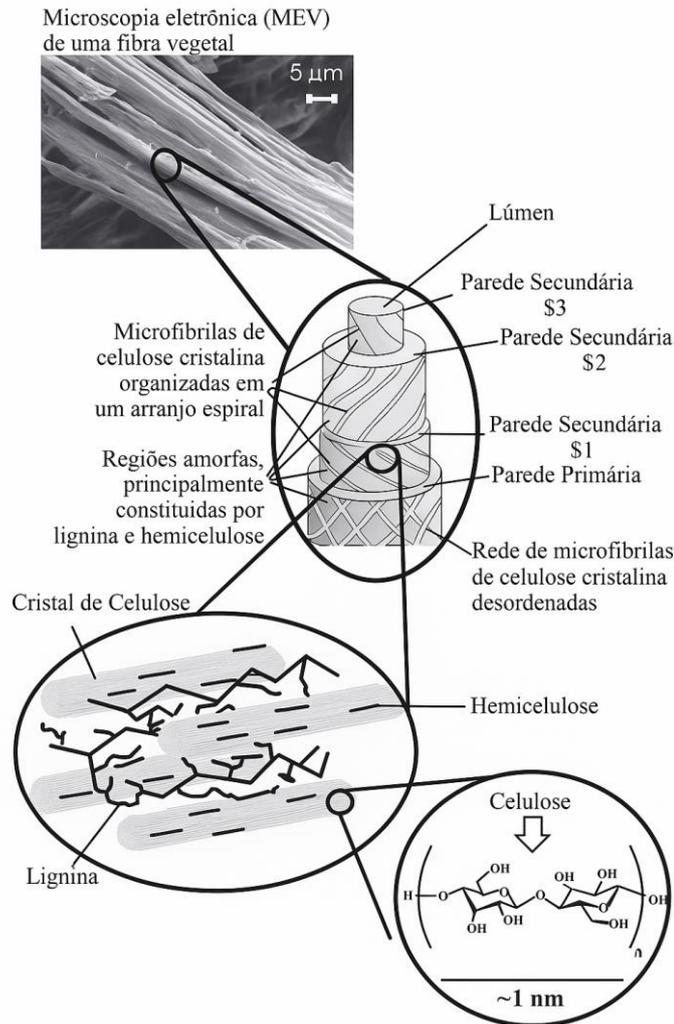
As fibras naturais podem ser de origem animal (lã, seda), vegetal (juta, sisal, coco) ou mineral (fibra de vidro, amianto). Seu uso em materiais compósitos tem como principal objetivo incorporar carga reciclável e de baixo custo ao material de modo a aprimorar as propriedades desejadas (LEVY NETO; PARDINI, 2016). Logo, possuem um papel muito importante quanto ao desenvolvimento de compósitos biodegradáveis, pois não agredem o meio ambiente, apresentam rápida degradação e podem ser obtidas a partir de resíduos agroindustriais (AHAD *et al.*, 2016).

As fibras naturais vegetais são conhecidas como fibras vegetais ou lignocelulósicas, e possuem como principais vantagens: serem biodegradáveis, renováveis e livres de carbono (PIRES *et al.*, 2009). Considerando as fibras naturais como reforço mecânico, elas irão apresentar elevada resistência a tração, baixo módulo elástico e não uniformidade na estrutura (JOSHI *et al.*, 2004). Isso ocorre devido à presença de celulose, que é o maior componente polimérico das fibras, responsável pela resistência e estabilidade das células das plantas (SREEKALA 2002).

Quimicamente, as fibras vegetais apresentam 5 constituintes: celulose, cera, lignina, hemicelulose e pectina. Já estruturalmente, elas são constituídas por 3 partes principais (LATIF *et al.*, 2018). Uma fibra vegetal se organiza de acordo com a Figura 3.

O lumen é o canal localizado no centro da fibra, responsável pelo transporte de água. Já as paredes primária e secundária compõem a parede celular da fibra vegetal (LATIF *et al.*, 2018). A parede primária consiste basicamente de celulose desordenada reforçando uma matriz de pectina, hemicelulose e lignina. A parede secundária consiste em celulose cristalina e possui três camadas, sendo S1 (camada mais externa), S2 (camada intermediária que forma o corpo principal da célula) e S3 (camada mais interna) (LATIF *et al.*, 2018).

**Figura 3 – Estrutura de uma fibra natural**



Fonte: Silva, 2009.

As fibras naturais podem ser retiradas de diferentes partes da planta, do caule, da folha, da fruta e do tronco. Assim, dependendo da parte da qual a fibra é retirada, as suas propriedades serão diferentes, pois, apesar de ser composta basicamente por celulose, lignina e hemicelulose, a concentração das mesmas irá variar de acordo com a parte da planta que está sendo utilizada para a obtenção da fibra (ROWELL *et al.*, 1997).

As propriedades mecânicas das fibras naturais dependem de diversos fatores físicos, como o diâmetro e o comprimento, densidade e o nível de absorção de umidade. Além disso, a composição química, especialmente os teores de celulose e hemicelulose também irão influenciar em suas propriedades mecânicas (LATIF *et al.*, 2018).

Como há diversos fatores que irão influenciar nas propriedades das fibras naturais, é razoável dizer que suas características apresentam uma variabilidade natural. Até mesmo

aspectos relativos ao cultivo da planta como a maturidade da fibra, a qualidade do solo, a técnica de extração da fibra e a época da colheita podem influenciar no comportamento do material (LOTFI *et al.*, 2019).

Nos compósitos reforçados com fibras naturais, as propriedades mecânicas são diretamente influenciadas pela remoção de componentes não celulósicos na superfície das fibras, pois sua presença dificulta a adesão entre as fases matriz-fibra. Outro fator que influencia nas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras naturais é o índice de cristalinidade da celulose, quanto mais cristalina a celulose for, mais resistente a fibra será (LATIF *et al.*, 2018).

A compatibilidade entre os componentes do compósito nem sempre é ideal. Isso pode ocorrer devido à superfície lisa das fibras (dificultando o acoplamento matriz-fibra) ou por diferenças nas características de molhabilidade, como hidroflicidade e hidrofobicidade. Para superar essa limitação, são aplicados tratamentos superficiais nas fibras, a fim de melhorar a interação com a matriz (LATIF *et al.*, 2018).

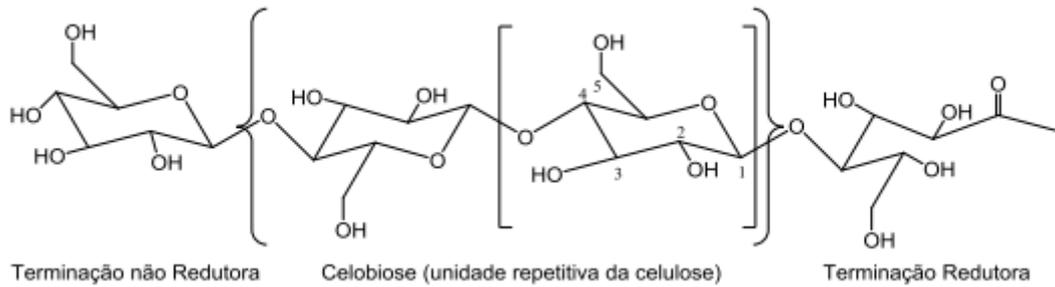
Esses tratamentos podem ser divididos em duas categorias: físicos e químicos. Os métodos físicos, como tratamento a laser, tratamento térmico ou plasma, mudam as condições superficiais das fibras sem afetar sua composição química. Por outro lado, os tratamentos químicos promovem alteração na composição química das fibras, na topografia superficial e na morfologia das fibras. Para isso, são utilizados produtos químicos como bases, silanos, ácidos, entre outros (LATIF *et al.*, 2018).

As fibras tratadas fisicamente, geralmente, apresentam propriedades mecânicas, físicas e térmicas melhores quando comparadas às fibras tratadas quimicamente. Porém, o tratamento químico apresenta menor custo e é mais simples, o que favorece sua utilização (LATIF *et al.*, 2018).

A celulose é o material orgânico mais abundante no planeta e é considerada uma fonte de matéria-prima quase que ilimitada considerando o aumento da procura de produtos verdes (baixo impacto ambiental) (KLEMM *et al.*, 2005).

A celulose é um polímero linear que possui como unidade de repetição duas moléculas de glicose. Esta combinação de moléculas é conhecida como celobiose (Figura 4) (SILVA *et al.*, 2009).

**Figura 4 – Estrutura molecular da celulose**



Fonte. Adaptado de KLEMM, 2005.

Devido às fortes ligações de hidrogênio presentes em sua cadeia, a celulose apresenta estrutura rígida e é praticamente insolúvel em água e em solventes comuns (CARVALHO, 2011). A organização das cadeias de celulose forma regiões cristalinas e amorfas ao longo da cadeia (Figura 5), sendo as regiões cristalinas mais organizadas e conseqüentemente mais resistentes, tanto mecanicamente quanto quimicamente, e a região amorfa, que não possui organização molecular, tende a ser mais frágil e mais fácil de ser degradada (FENGEL e WENEGER, 1989). O grau de cristalinidade irá variar de acordo com a origem e o processamento (SILVA *et al.*, 2009).

**Figura 5 – Representação esquemática da organização de cadeias da celulose**



Fonte. Adaptado de GURGEL, 2010.

### 3.3.1 Fibras do vetiver

O vetiver é uma gramínea característica de climas tropical e subtropical, originária da Índia, que atualmente é encontrada em mais de 100 países. Reconhecida e utilizada há mais de 5.000 anos, inicialmente pelas raízes aromáticas empregadas na produção de óleos essenciais e perfumes, atualmente é amplamente valorizada como uma ferramenta na área da engenharia devido as suas propriedades (TVNWI, 2019).

Apresenta um sistema de raízes denso e fibroso que cresce, principalmente, para baixo, podendo atingir profundidades de até 3 metros nos primeiros dois anos e até 6 metros

em condições ideais. Essa característica faz com que o vetiver atue na estabilização de encostas, controle de erosão, conservação de solo e água, gestão do escoamento superficial e mitigação de inundações. Além disso, suas raízes criam um emaranhamento subterrâneo que atua como uma cerca viva, aumentando a estabilidade do solo em até 45%. Este sistema de raízes também confere à planta resistência à tração superior à da maioria das gramíneas, entre 5 e 10 vezes maior (TVNWI, 2019).

O vetiver é altamente adaptável, tolerando solos com pH ácidos e básicos, grande variação de temperaturas, desde negativas à temperaturas acima de 50 °C, resistente a salinidade, metais pesados e a maioria dos herbicidas. A planta é certificada como não invasiva, pois não possui sementes férteis nem raízes laterais, o que limita sua dispersão natural. Além disso, é capaz de sobreviver a incêndios florestais e períodos prolongados de inundação. Esses atributos tornam o vetiver uma opção promissora para aplicações ambientais (TVNI, 2021).

Outra característica notável do vetiver é sua capacidade de fito-remediação. Ele pode absorver contaminantes como metais pesados, sendo usado no tratamento e recuperação de solos e águas contaminadas, se tornando uma alternativa sustentável, devido à sua fácil propagação, alta durabilidade e compatibilidade (TVNI, 2021).

Além de suas funções ambientais, o vetiver tem sido explorado como reforço em compósitos poliméricos. Suas fibras naturais conferem propriedades mecânicas, como maior resistência à tração e ao impacto, quando incorporadas em matrizes poliméricas, como resinas epóxi (JHA *et al.*, 2022).

As fibras das folhas do vetiver são compostas principalmente por celulose, logoapresentam boas propriedades mecânicas, como mostradas na Tabela 1, e térmicas, além do baixo custo, são biodegradáveis e renováveis (JHA *et al.*, 2022). Com isso, estudos envolvendo essas fibras estão sendo desenvolvidos.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de Vetiver e outras fibras naturais.

<b>Propriedades</b>	<b>Fibras de vetiver</b>	<b>Juta</b>	<b>Linho</b>	<b>Sisal</b>	<b>Coco</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	1,3–1,4	1,5	1,4	1,1
Diâmetro (µm)	100–220	25–200	–	50–200	100–450
Resistência à tração (MPa)	247–723	393–773	345–1100	468–640	131–175
Módulo de Elasticidade (GPa)	12,0–49,8	13,0–26,5	27,6	9,4–22,0	4,0–6,0
Alongamento na ruptura (%)	1,6–2,4	1,1–1,5	2,7–3,2	3,0–7,0	15,0–40,0

Fonte: Bledzki e Ruksakulpiwat (adaptado)

Meena *et al.*(2022) evidenciaram a capacidade de absorção de som, isolamento acústico, de compósitos utilizando as fibras do vetiver quando comparados com outros compósitos já existentes. Além de garantir isolamento térmico.

Ruksakulpiwat *et al.*(2006) estudaram as propriedades físicas e mecânicas de um compósito de vetiver com polipropileno (PP), e constataram que o compósito apresenta melhor resistência a tração e modulo de elasticidade do que o PP puro, mas apresenta menor deformação máxima e menor resistência a impacto.

Essas fibras possuem uma estrutura que permite sua utilização em materiais de construção, como blocos de argila e cimento, contribuindo para a redução de rachaduras e da condutividade térmica, melhorando o conforto térmico das edificações (EMBRAPA, 2013).

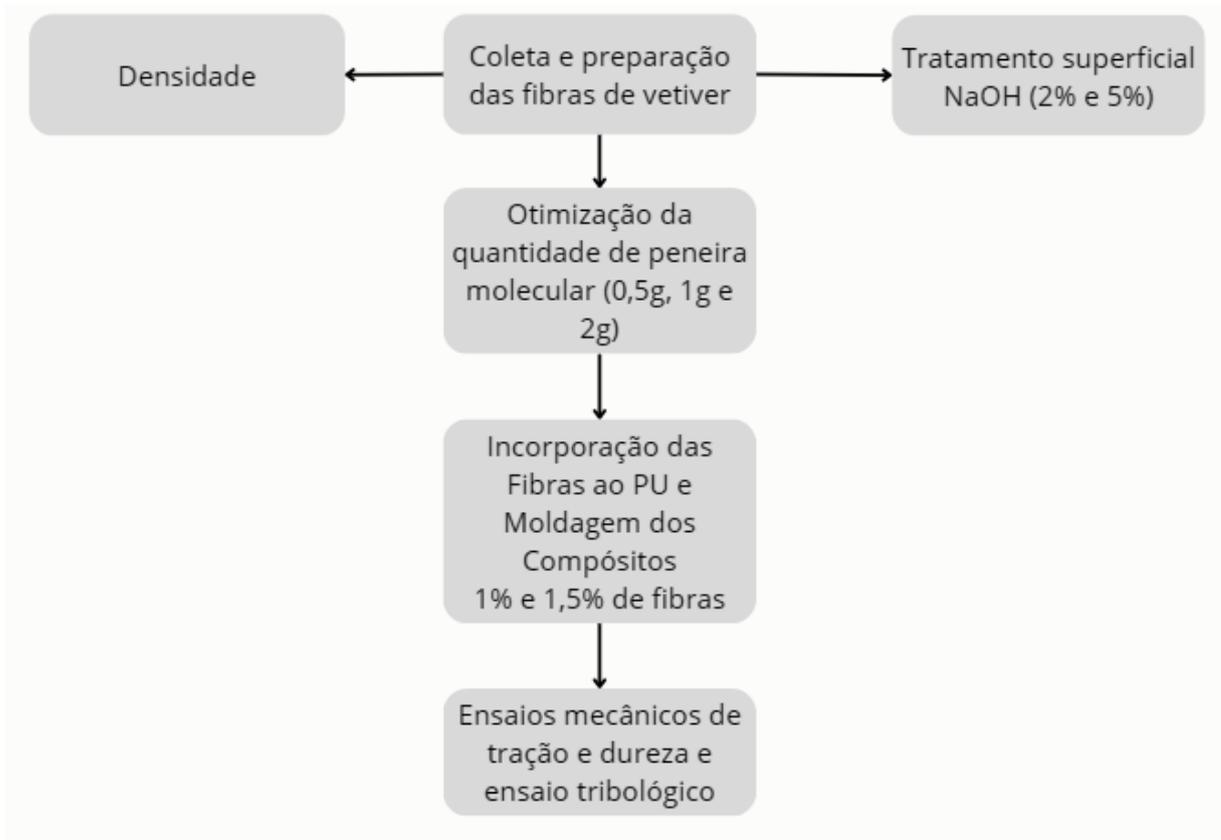
Além disso, as folhas de vetiver são empregadas em artesanatos. Na indústria de papel, a adição de 30% a 40% de fibras de vetiver contribui para a redução do consumo de madeira, tornando o processo mais sustentável (EMBRAPA, 2013).

As fibras da folha do vetiver também podem ser utilizadas como reforços em matrizes poliméricas, para melhorar as propriedades do polímero criando um novo material compósito. Segundo Ruksakulpiwat *et al.* (2007), a adição de fibras de vetiver em um compósito de matriz de polipropileno melhorou a resistência a tração e o modulo de elasticidade do material, porém menor alongamento na ruptura e menor resistência ao impacto.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos descritos neste trabalho foram realizados de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 6.

**Figura 6 – Fluxograma das etapas de trabalho.**



Fonte: Próprio autor.

### 4.1 Materiais

Para a produção do poliuretano (matriz) foram utilizados os seguintes insumos:

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

Para a obtenção das fibras do vetiver o processo foi feito manualmente, e para o tratamento foi utilizado NaOH diluído em água (2% e 5% v/v).

## 4.2 Método de obtenção das fibras

### 4.2.1 Extração das fibras de Vetiver

A extração e preparo das fibras foi realizada com modificações da metodologia reportada por Jha e colaboradores (2022). As fibras foram retiradas das folhas de vetiver (Figura 7), que foram seccionadas em segmentos menores manualmente, utilizando lâminas de estilete.

**Figura 7 – Folhas do vetiver**



Fonte: Próprio autor.

Inicialmente, as folhas de vetiver foram “abertas” para permitir melhor visualização das fibras e, em seguida foram fixadas em uma superfície plana para a extração das fibras. O processo de extração consistiu no corte longitudinal das folhas, no sentido das fibras, utilizando lâminas de estilete. As fibras obtidas foram lavadas com água para a remoção de impurezas e, posteriormente, secas em estufa a 60°C por 8 horas.

Para garantir que as fibras não absorvessem água durante o armazenamento, elas foram acondicionadas em um dessecador com sílica gel. Adicionalmente, as fibras foram secas novamente em estufa a 60°C por 8 horas antes da incorporação à matriz polimérica.

#### **4.2.2 Tratamento das fibras**

As fibras de vetiver foram submetidas a tratamento alcalino superficial, utilizando soluções de hidróxido de sódio (NaOH) nas concentrações de 2% e 5%, conforme os procedimentos descritos por Meena *et al.* (2022) e Janyakunmongokol *et al.* (2023)

Para o tratamento, as fibras foram imersas nas soluções alcalinas e mantidas em repouso, à temperatura ambiente, por 4 horas. Após o tratamento, as amostras foram lavadas com água destilada até a neutralização do pH e, posteriormente, secas em estufa a 60°C por 8 horas.

Esse tratamento tem como objetivo a remoção de impurezas presentes na superfície das fibras e da remoção de lignina e hemicelulose, que são componentes não desejados na fibra, mantendo por fim, a celulose mais pura possível.

#### **4.3 Preparo da matriz de poliuretano termofixo**

O preparo da matriz se deu a partir do estudo de Fonseca (2025) o qual apresenta a proporção mássica ideal de MDI e polioliol (1 polioliol : 1 MDI) e a melhor condição de cura que é à vácuo. Nesse estudo inicialmente, o polioliol foi misturado com 1g de peneira molecular (responsável por reduzir a formação de bolhas). Em seguida, foi adicionado MDI e o sistema foi agitado manualmente. Posteriormente, foi adicionada 1 gota de catalisador. Todo o processo de mistura foi realizado de maneira lenta para evitar a formação de bolhas e a possível expansão indesejada do PU. Após a homogeneização dos reagentes, a mistura foi vertida em um molde de silicone para obtenção de corpos de prova

Partindo da otimização já feita por Fonseca (2025), como ainda era notável a presença de bolhas na matriz, tanto na superfície quanto internamente, foi testada outras proporções de

peneira molecular na matriz, a fim de reduzir ainda mais a presença de água. As proporções testadas foram 0,5g, 1g e 2g.

#### 4.4 Obtenção dos compósitos

Para a formulação dos compósitos, foi utilizada duas proporções de aproximadamente 1% e 1,5% (m/m) de fibras de vetiver. Após a secagem das fibras, optou-se pela utilização de fibras curtas, devido a difícil incorporação de fibras longas na matriz. As fibras foram cortadas em tamanho de aproximadamente 1 mm de comprimento.

As fibras de vetiver foram adicionadas à mistura de poliol e peneira molecular e misturadas manualmente. Em seguida, foi adicionado o MDI à mistura. Os componentes foram misturados manualmente de forma lenta e em seguida foi adicionado uma gota do catalisador. Após a adição do catalisador a mistura foi vertida em um molde de silicone, o qual foi acondicionado em um saco de vácuo e submetido à remoção de ar utilizando uma bomba de ar, para posterior cura em temperatura ambiente. O compósito foi confeccionado em forma de corpos de prova de tração.

#### 4.5 Densidade das fibras de vetiver

Após a extração e secagem 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 vetiver foram adicionadas e a massa novamente pesada ( $m_{p+f}$ ) 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/cm<sup>3</sup>.

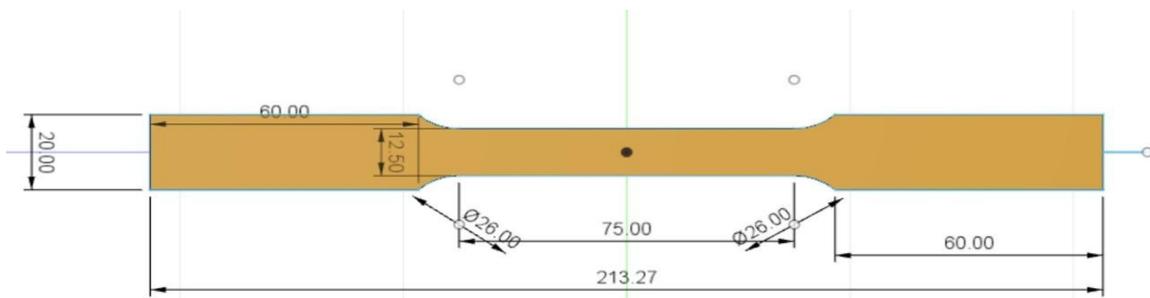
#### 4.6 Ensaio de tração do compósito

O ensaio foi realizado para verificar as propriedades mecânicas do compósito e da matriz. 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 ASTM D638-10 (2014).

A partir das informações obtidas, foi plotado o gráfico Tensão x Deformação convencional. As propriedades obtidas através do ensaio mecânico foram a resistência à tração e o módulo de elasticidade

Os corpos de prova têm dimensões de 213,27 mm x 20,00 mm x 2,50 mm, conforme apresentado na Figura 8.

**Figura 8 – Dimensões do corpo de prova**



Fonte: INJETA3D MOLDES, 2025.

#### 4.7 Ensaio de dureza do compósito

O ensaio de dureza foi realizado para avaliar a resistência superficial dos compósitos à penetração. Para isso foi utilizado um durômetro do tipo Shore D, apropriado para materiais poliméricos mais rígidos, conforme especificado na norma ASTM D2240.

As amostras utilizadas foram as mesmas que foram utilizadas nos ensaios de tração, utilizando partes com superfície plana e homogênea, respeitando o tempo mínimo de cura da matriz de poliuretano que é de 24 horas. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente

( $\pm 23$  °C), aplicando-se a força normal do penetrador do durômetro perpendicularmente à superfície dos corpos de prova. A leitura foi registrada após 15 segundos de contato, de acordo com o procedimento normativo.

Foram realizadas cinco medições em regiões distintas de cada amostra, e o valor final da dureza Shore D foi obtido pela média aritmética dos resultados.

#### **4.8 Ensaios tribológicos**

O ensaio tribológico de abrasão por roda de borracha foi realizado com o objetivo de avaliar a resistência ao desgaste superficial dos corpos de prova. Os compósitos a serem estudados foram moldados conforme formato retangular exigido nas dimensões de (25x75x12) mm<sup>3</sup>.

Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram pesados antes do teste utilizando uma balança analítica. Em seguida, foram fixados firmemente no suporte da máquina, entrando em contato com a roda abrasiva sob carga de 45N e com presença de areia como agente abrasivo. Após o tempo de ensaio de 5 minutos, as amostras foram novamente pesadas para determinação da perda de massa absoluta (em gramas) e relativa (em porcentagem). O ensaio foi realizado para a matriz de poliuretano puro e para os compósitos contendo fibras de vetiver. Os parâmetros foram definidos a partir de testes realizados anteriormente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Tratamento alcalino

O tratamento alcalino em soluções 2% e 5% de NaOH nas fibras, não foi relevante para o estudo, já que o aspecto superficial das fibras ficou prejudicado, as fibras se enovelaram, como mostrado na Figura 9, dificultando assim a incorporação delas nos compósitos. O aspecto superficial em ambos os tratamentos ficou parecido.

**Figura 9 – Fibras de vetiver tratadas com solução de 5% NaOH**



Fonte: Próprio autor.

### 5.2 Densidade das fibras de vetiver

A densidade das fibras não tratadas foi de  $0,567 \text{ g.cm}^{-3}$ . Considerando que o processo de obtenção das fibras é totalmente manual e depende das habilidades do responsável pela extração das fibras a partir da folha do vetiver, durante esse processo pode haver danos à estrutura da fibra. Os valores da densidade das fibras encontrados na literatura divergem do valor encontrado neste estudo Jena *et al.* (2020), obteve valor de aproximadamente  $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$  para a fibra sem tratamento, também analisou alguns tratamentos superficiais e na maioria dos tratamentos obteve um aumento da densidade, atribuído a densificação das fibras devido a remoção de impurezas. Já Ruksakulpiwat *et al.* (2014) encontrou o valor de  $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ , porém não é dito se esse valor foi obtido antes ou depois de algum tratamento superficial. Ambos Jena *et al.* (2020) e Ruksakulpiwat *et al.* (2014) realizaram a medição da densidade utilizando um picnômetro, mas a obtenção das fibras foi feita utilizando maquinários, logo as fibras são mais padronizadas do que as utilizadas neste estudo.

A densidade da fibra foi medida para definir a proporção de fibras a serem utilizadas na produção do compósito, porém como a densidade encontrada foi muito inferior às referências, optou-se por utilizar proporção mássica na formulação do compósito.

### 5.3 Otimização da matriz de PU

A matriz de PU contendo 0,5g de peneira molecular é mostrada na Figura 10. Alguns corpos de prova apresentaram uma textura um pouco pegajosa, indicando que possivelmente ainda estavam em processo de cura. Além disso, posteriormente, no momento de realizar o ensaio de tração, alguns corpos de prova se romperam na garra da máquina antes mesmo do início do ensaio, dificultando a avaliação das propriedades mecânicas.

**Figura 10 - Corpo de prova com 0,5g de peneira molecular. a) vista superior b) vista inferior**



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 11 está presente o corpo de prova preparado com 1g de peneira molecular o qual apresentou superfície seca ao toque (não pegajosa), e menor quantidade de bolhas visíveis na superfície.

**Figura 11 - Corpo de prova com 1g de peneira molecular a) vista inferior b) vista superior**



Fonte: Próprio autor.

Por fim a Figura 12 apresenta o corpo de prova preparado com 2g de peneira molecular, o qual apresentou em sua superfície algumas bolhas, além de notável aglomeração de peneira molecular, indicando que a peneira não foi completamente solubilizada no polioli durante a formulação do polímero.

**Figura 12 - Corpo de prova com 2g de peneira molecular a)vista inferior b)vista superior**

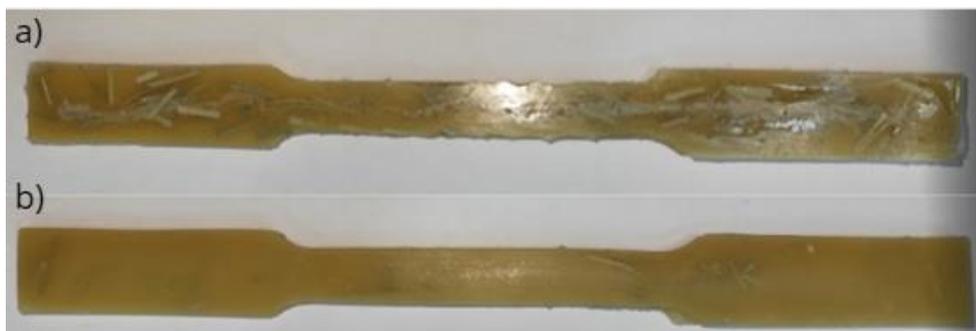


Fonte: Próprio autor.

#### 5.4 Obtenção dos compósitos

Os compósitos foram formulados utilizando 1g de peneira molecular, todos apresentaram superfície seca. Alguns corpos de prova apresentaram mais bolhas ao redor das fibras do que outros. As Figuras 13 e 14 mostram os compósitos obtidos.

**Figura 13 – Corpo de prova com 1% de fibras curtas de vetiver. a) vista superior b) vista inferior**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 14 – Corpo de prova com 1,5% de fibras curtas de vetiver. a) vista inferior b) vista superior**

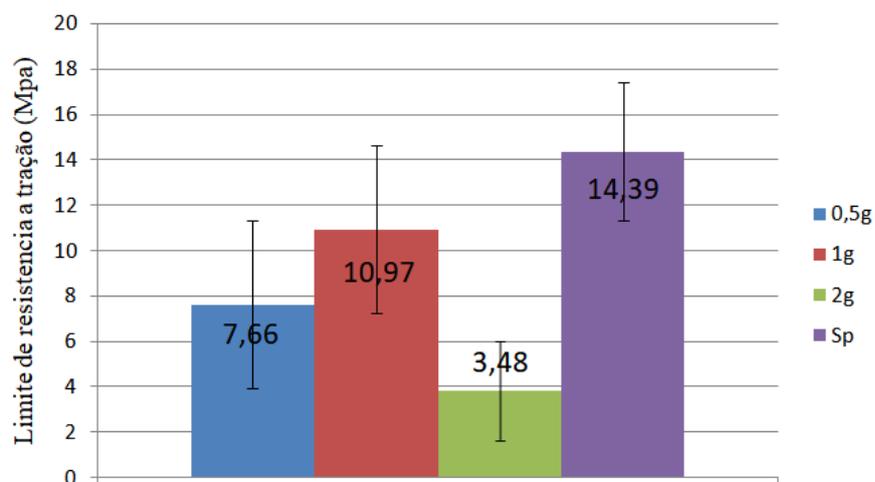


Fonte: Próprio autor.

### 5.5 Ensaio de tração

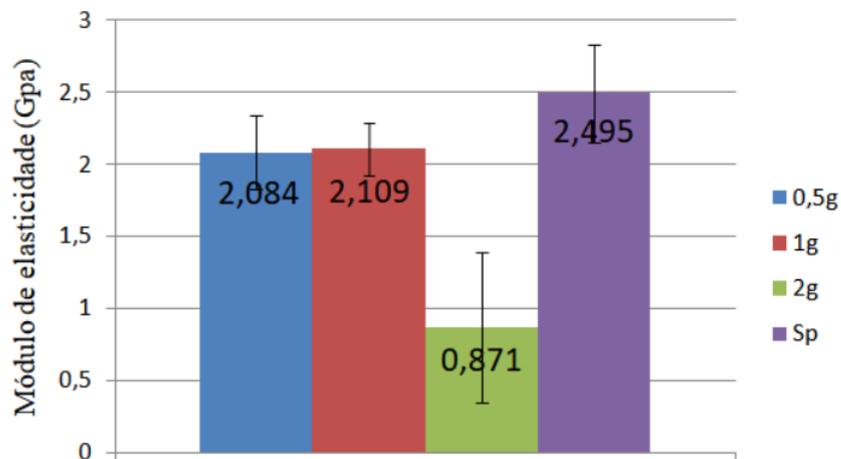
As Figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, os valores médios da resistência à tração (MPa) e do módulo de elasticidade (GPa) obtidos a partir de corpos de prova compostos exclusivamente pela matriz de poliuretano, variando a quantidade de peneira molecular adicionada (0 g – Sp, 0,5 g, 1 g e 2 g). As análises foram realizadas com base na média de três amostras para cada condição, e as barras de erro representam o desvio padrão dos resultados.

**Figura 15 – Limite de resistência à tração para matrizes com variadas proporções de peneira molecular.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 16 – Módulo de elasticidade para matrizes com variadas proporções de peneira molecular.**



Fonte: Próprio autor.

Em relação à resistência à tração, observou-se que a amostra Sp (sem peneira molecular) apresentou o maior valor, com média de 14,39 MPa, enquanto a amostra com 2 g de peneira obteve o menor desempenho, com 3,48 MPa. Esse comportamento pode ser atribuído ao excesso de cargas na matriz, o que gerou aglomerações, comprometendo a integridade estrutural do material.

Amostras com teores intermediários de peneira molecular, 0,5 g e 1 g, apresentaram valores de 7,66 MPa e 10,97 MPa, respectivamente. A formulação com 1 g foi a que apresentou o melhor equilíbrio entre rigidez e resistência, sendo, por isso, escolhida como matriz base para o desenvolvimento dos compósitos com fibras de Vetiver.

Em complemento, a análise do módulo de elasticidade, revelou que a amostra Sp também foi a mais rígida, atingindo 2,495 GPa. As amostras com 0,5 g e 1 g de peneira apresentaram valores próximos, 2,084 GPa e 2,109 GPa, respectivamente, indicando que pequenas quantidades de peneira não comprometem significativamente a rigidez da matriz. Por outro lado, a amostra com 2 g registrou uma queda acentuada no módulo, com valor de 0,871 GPa, reforçando a hipótese de que a sobrecarga de partículas pode causar falhas internas e pontos de fragilidade no material.

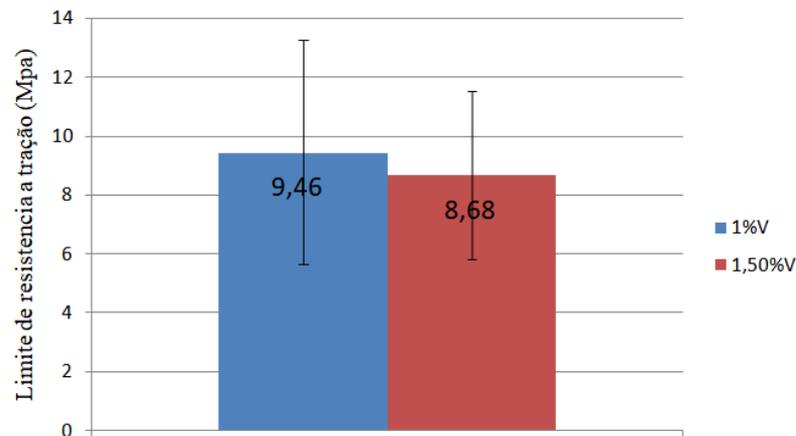
Esses resultados indicam que há uma faixa ideal de concentração de peneira molecular capaz de contribuir para a estabilidade estrutural e manutenção das propriedades mecânicas do poliuretano.

Dessa forma, os dados obtidos reforçam a decisão de utilizar a matriz com 1 g de peneira molecular como base para os compósitos, uma vez que ela apresentou boas

propriedades mecânicas e consistência no processamento, sendo adequada para aplicações que requerem materiais leves, rígidos e de fácil moldagem.

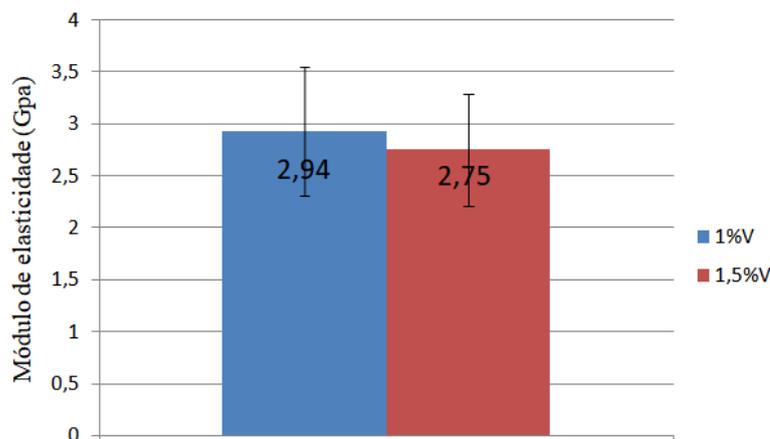
As Figuras 17 e 18 apresentam os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade e o limite de resistência à tração dos compósitos de poliuretano reforçados com fibras de Vetiver nas proporções de 1% e 1,5% em massa.

**Figura 17 - Limite de resistência à tração para matrizes com variadas proporções de fibras de vetiver.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 18- Módulo de elasticidade para matrizes com variadas proporções de fibras de vetiver.**



Fonte: Próprio autor.

A adição de 1% de fibras de Vetiver resultou em um módulo de elasticidade médio de 2,94 GPa e resistência à tração de 9,46 MPa, enquanto a formulação com 1,5% de fibras

obteve 2,75 GPa de módulo de elasticidade e 8,68 MPa de resistência à tração. Observa-se que o aumento na proporção mássica de fibras não proporcionou melhoria significativa nas propriedades mecânicas; ao contrário, ambos os parâmetros apresentaram leve queda.

Esse comportamento pode ser explicado pela má distribuição das fibras na matriz, o aumento na quantidade de fibras pode ter promovido aglomeração, prejudicando a dispersão uniforme e, conseqüentemente, a integridade estrutural do compósito.

Essas observações estão de acordo com os resultados reportados por Zaman (2024), que identificou queda nas propriedades mecânicas para compósitos com vetiver acima de 20% (v/v) em LDPE, devido à má dispersão e fraca adesão interfacial. Embora o teor aqui utilizado (1–1,5%) seja muito inferior, a tendência observada reflete o mesmo princípio de limite de saturação do reforço.

No trabalho de Babji *et al.* (2020), compósitos de polietileno com vetiver em teores mais elevados (até 25%) apresentaram queda na resistência mecânica quando a quantidade de reforço ultrapassava o nível ótimo, também atribuído a falhas de interface e excesso de fibras.

Além disso, estudos como o de Janyakunmongkol *et al.* (2023) ressaltam a importância do tratamento químico das fibras naturais para melhorar a adesão à matriz e aumentar a resistência mecânica. Como no presente trabalho as fibras de Vetiver foram utilizadas sem tratamento químico, esse fator pode ter limitado a eficiência do reforço, especialmente na formulação com maior teor de fibra (1,5%).

Devido à elevada quantidade de bolhas formadas e conseqüente interferência nas propriedades mecânicas dos materiais, observou-se um desvio padrão elevado para todas as condições de ensaio. Logo, considerando os desvios padrões, observa-se que não houve muita diferença entre as proporções de fibras utilizadas.

## 5.6 Ensaios de dureza

O ensaio de dureza foi realizado com o objetivo de avaliar a resistência à penetração superficial dos corpos de prova. Os resultados obtidos para a matriz de poliuretano puro e para o compósito reforçado com fibras de vetiver estão apresentados na Tabela 2.

A matriz de PU puro apresentou uma dureza média de 72,2 Shore D, enquanto o compósito com vetiver obteve uma dureza média de 74,1 Shore D. Observa-se um aumento na dureza média com a adição das fibras de vetiver, porém não é muito conclusivo já que o desvio padrão é bem alto.

**Tabela 2 – Dados ensaio de dureza**

Amostra	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5	Média	Desvio padrão
Matriz PU	73	69	76,5	80	62,5	72,2	6,788
PU 1% + vetiver	61	81,5	76	77	75	74,1	7,717

Fonte: Próprio autor, 2025

Esse comportamento pode ser atribuído à presença das fibras naturais, que atuam como fase de reforço, dificultando a penetração do penetrador e promovendo uma estrutura mais rígida. A distribuição e adesão interfacial das fibras na matriz são fatores determinantes nesse resultado. A literatura relata que o reforço de polímeros com fibras naturais pode melhorar propriedades mecânicas superficiais, como a dureza, desde que haja uma boa interface entre os componentes (SATYANARAYANA *et al.*, 2009).

Esses resultados podem ser comparados aos obtidos por Babji *et al.* (2020), que investigaram a dureza de compósitos de polipropileno (PP) e polietileno (PE) reforçados com fibras de vetiver e pó de casca de coco. Em seu estudo, os valores de dureza foram expressos em HRB (Rockwell B), sendo que o compósito de PP com 20% de vetiver (PPV) apresentou dureza de 43,48 HRB enquanto o PP puro apresentou dureza de 43,36 HRB o que não é uma mudança muito significativa. Já o compósito de PE com 20% de vetiver (PEV) atingiu 47,96 HRB enquanto o PE puro apresentou 49,03 HRB, logo a adição do vetiver ocasionou a redução da dureza.

Jha *et al.*(2022) obteve como resultado o aumento da dureza do compósito quando comparado com a matriz pura, em seus estudos observa-se que a dureza de um compósito com 2% de fibras de vetiver aumentou a dureza de 54 para 56,6 Rockwell B, quando comparada com a matriz sem reforço. Esse aumento na dureza se dá devido à distribuição uniforme do reforço, que consequentemente irá impedir a penetração de esforços externos na matriz.

## 5.7 Ensaios tribológico

Os ensaios tribológicos de abrasão por roda de borracha foram realizados com o objetivo de avaliar a resistência ao desgaste dos compósitos formulados. As massas medidas antes e após o ensaio estão apresentadas na Tabela 3, sendo a perda de massa adotada como critério de comparação entre as amostras. Todas as amostras foram utilizando 1% de fibras de vetiver.

**Tabela 3 – Cálculo da perda de massa durante o ensaio roda de borracha**

Amostra	Massa antes (g)	Massa depois (g)	Perda (g)	Perda (%)
VE1	15,788	15,373	0,415	2,63%
VE2	22,733	22,343	0,390	1,72%
VE3	23,350	22,728	0,622	2,66%
PU	18,986	18,077	0,909	4,79%

Fonte: Próprio autor, 2025.

A matriz de PU puro apresentou perda de massa de 0,909 g, equivalente a 4,79%. Em comparação, os compósitos com vetiver que apresentaram perdas de massa significativamente menores variando entre 0,390g e 0,622g, correspondendo a uma variação percentual de 1,72% a 2,66%. A amostra VE2 apresentou o menor índice de desgaste (1,72%), enquanto VE3 apresentou a maior perda percentual (2,66%).

A perda de massa pode estar relacionada à uniformidade de dispersão das fibras na matriz e à qualidade da interface. A amostra VE2, possivelmente apresenta melhor adesão interfacial e distribuição mais homogênea das fibras, promovendo maior resistência ao desgaste. Por outro lado, a maior perda observada em VE3 pode indicar maior fragilidade local, falhas nas interfaces, como a formação de bolhas, ou aglomerados de fibras que atuam como pontos de início de falha durante o ensaio.

Os resultados obtidos por Jena *et al.* (2022), que estudaram o comportamento tribológico de compósitos híbridos de epóxi reforçado com fibras de vetiver tratadas e lama vermelha, utilizando o ensaio de desgaste abrasivo por pino sobre disco. Os autores variaram a proporção de fibra e lama vermelha e constataram que a perda de massa e a taxa de desgaste

específica aumentam com o aumento do teor de fibras de vetiver e diminuem com a adição de lama vermelha, devido ao aumento da dureza e à melhor adesão interfacial entre os constituintes.

Enquanto os compósitos de Jena *et al.* (2022) apresentaram perdas de massa superiores a 0,8 g em algumas formulações com alto teor de fibras, os compósitos deste trabalho mostraram perdas mais baixas. Isso indica que, mesmo que os ensaios realizados tenham sido distintos, o reforço com fibras de vetiver isoladamente já contribui para resistência ao desgaste superficial.

Portanto, os resultados obtidos corroboram a literatura quanto ao efeito do teor de fibras na abrasão, reforçando a importância de uma distribuição homogênea das fibras e de uma boa adesão interfacial para melhorar o desempenho tribológico dos compósitos.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram produzidos e caracterizados compósitos de poliuretano termofixo reforçados com fibras naturais da folha de vetiver, com o objetivo de avaliar sua viabilidade como material sustentável e de bom desempenho mecânico e tribológico.

O tratamento alcalino realizado não apresentou resultado satisfatório, já que o aspecto superficial das fibras dificultou o processamento e utilização delas no compósito.

No que se refere ao ensaio de tração, observou-se que a incorporação de fibras de Vetiver influenciou as propriedades mecânicas da matriz de poliuretano. O compósito com 1% de fibras apresentou resistência à tração média de 9,46 MPa e módulo de elasticidade de 2,94 GPa, enquanto a formulação com 1,5% de fibras resultou em uma resistência de 8,68 MPa e módulo de 2,75 GPa. Esses resultados indicam que a adição moderada de fibras proporciona uma melhora ou manutenção das propriedades da matriz, mas o aumento do teor de reforço para 1,5% pode levar à redução da eficiência mecânica, possivelmente devido à formação de aglomerados. Dessa forma, conclui-se que a proporção de 1% de Vetiver é mais adequada para o reforço do poliuretano na condição avaliada, resultando em um compósito com bom equilíbrio entre rigidez e resistência mecânica.

No ensaio de dureza Shore D, observou-se preservação na dureza média da matriz com a adição das fibras devido ao alto desvio padrão, passando de 72,2 (PU puro) para 74,1 (PU + vetiver), o que deixa inconclusivo se a adição das fibras contribuiu para rigidez do material.

No ensaio tribológico de abrasão por roda de borracha, os compósitos apresentaram perda de massa entre 0,3900 g e 0,6221 g, com a menor taxa de desgaste (1,72%) associada à amostra VE2. Esses resultados mostraram que a adição de fibras de vetiver pode contribuir positivamente para a resistência ao desgaste, desde que haja uma boa dispersão e adesão interfacial.

Assim, os resultados obtidos demonstram o potencial das fibras de vetiver como reforço natural para matrizes poliméricas. Além de contribuir para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis, o sistema estudado apresentou desempenho competitivo em termos de resistência à abrasão e dureza, atributos desejáveis para aplicações em revestimentos, peças técnicas e componentes submetidos a atrito moderado.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Recomenda-se para trabalhos futuros o estudo do comportamento dos compósitos de poliuretano reforçados com fibras da folha do vetiver quando submetidos a outros tipos de carregamentos mecânicos (como flexão e impacto) bem como aperfeiçoar o tratamento químico das fibras.

Avaliar o comportamento térmico e morfológico para uma compreensão mais completa do efeito da adição de fibras na estabilidade e estrutura do material.

Explorar outras proporções de fibras, como 0,75% ou 1,25%, visando identificar a concentração ideal de reforço para a matriz de PU utilizada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. R.; CARRIELLO, G. M.; PEGORARO, G. M.; FILHO, J. F. A utilização de óleos vegetais como fonte de polióis para a síntese de poliuretano: uma revisão. **Disciplinarum Scientia - Ciências Naturais e Tecnológicas**, v. 22, n. 1, p. 99–118, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.37779/nt.v22i1.3711>.

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.

ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The science and engineering of materials**. 6. ed. Boston: Cengage Learning, 2011.

BABJI, R.; REDDY, U.; MOKSHEGNA.; SHAKTHIVEL, S. Characteristic Investigation and Comparison between Vetiver fiber -reinforced polypropylene and polyethylene with Coconut shell powder and Maleic anhydride as filler and coupling agents. **Materials Today: Proceedings**, v. 24, p. 2339–2351, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.763>.

BAVAN, D. S.; KUMAR, G. M. Tensile and thermal degradation properties of vetiver fiber composites. **Procedias Material Science**, v. 5, p. 605-611, 2014. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.306>.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: John Wiley & Sons, 2002.

CANGEMI, J. M. **Biodegradação de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2006. Tese (Doutorado em Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. doi:10.11606/T.75.2006.tde-26042007-091940.

CAPELIN, L. J.; MORAES, K. K.; ZAMPIERI, J. P.; VANDERLEI, R. D. **Evaluation of the effects of coconut fiber and microcellulose crystalline on the properties of cementitious mortars**. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0876>.

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

ECHEVERRIA-ALTUNA, O.; OLLO, O.; LARRAZA, I.; GABILONDO, N.; HARISMENDY, I.; ECEIZA, A. Effect of the biobased polyols chemical structure on high performance thermoset polyurethane properties. **Polymer**, v. 263, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125515>.

FONSECA, Ana Gabriela de Paula. **Obtenção e caracterização de compósitos de poliuretano reforçados com fibra de bananeira**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

G. F. Brito, P. Agrawal, E. M. Araújo, T. J. A. M. (2011). Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.6.2 (2011) 127-139 ISSN 1809-8797, 59(5), 289–296. <https://doi.org/10.1922/IDJ-2210-Bourgeois08>.

GRYCZAK, M.; BERNADIN, A. M. Development and characterization of sustainable agglomerated composites formulated from castor polyurethane resin and reinforced with rice husk. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 23, n. 5, p. 1655–1662, 2 fev. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-021-02036-9>.

IVDRE, A.; ABIBKUBSM A., SEVASTYANOVA, I.; KIRPLUKS, M.; CABULIS, U.; MERI, R. M. Rigid Polyurethane Foams with Various Isocyanate Indices Based on Polyols from Rapeseed Oil and Waste PET. **Polymers**, v. 12, n. 4, p. 738. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/polym12040738>.

JANYAKUNMONGKOL, K.; NHUAPENG, W.; THAMJAREE, W. Effect of alkaline treatment on mechanical properties of composites between vetiver fibers and epoxy resin. **Journal of the Mechanical Behavior of Materials**, v. 33, n. 1, 1 jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0310>.

JENA, P. K.; MOHANTY, J. R.; NAYAK, S. Effect of Surface Modification of Vetiver Fibers on Their Physical and Thermal Properties. **Journal of Natural Fibers**, p. 1–12, 12 fev. 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/15440478.1726249>.

JENA, P. K.; NAYAK, S.; MOHANTY, J.; SAMAL, P.; MOHANTY, S. D.; MALLA, C.; BEHERA, J. R.; KHUNTIA, S. K.; MOHAPATRA, J. Abrasive wear performance of vetiver grass - red mud- reinforced hybrid composites: Effect of fiber loading on various wear properties. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 15, p. 11153–11164, 18 jan. 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15440478.2021.2018086>.

JHA, K.; TAMRAKAR, P.; KUMAR, R.; SHARMA, S.; SINGH, J.; ILLYAS, R. A.; RANGAPPA, S. M.; SIENGCHIN, S. Effect of hybridization on physio-mechanical behavior of Vetiver and Jute fibers reinforced epoxy composites for structural applications: Studies on fabrication, physicomechanical, water-absorption, and morphological properties. **Journal of Industrial Textiles**, v. 51, n. 2\_suppl. Disponível em <https://doi.org/10.1177/15280837221098573>.

JOHN, M. J.; ANANDJIWALA, R. D. Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. **Polymer Composites**, v. 29, n. 2, p. 187–207, fev. 2008.

KLEMM, D.; HEUBLEIN, B.; FINK, H. P.; BOHN, A. Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 44, n. 22, p. 3358–3393. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>.

FILHO, A. J. S.; SANFELICE, R. C. Estudo bibliográfico sobre polímeros ambientalmente sustentáveis. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 3, n. 2, p. 131–148, 2018.

JOSHI, S. V.; DRZAL, L. T.; MOHANTY, A. K.; ARORA, S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 3, p. 371–376, 1 mar. 2004.

KALIA, Susheel.; THAKUR, K.; CELLI, A.; KIECHEL, M. A.; SCHAUER, C. L. Surface modification of plant fibers using environment friendly methods for their application in polymer composites, textile industry and antimicrobial activities: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 1, n. 3, p. 97–112, set. 2013. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.04.009>.

KURIEN, R. A.; KASHY, C. P.; SANTHOSH, A.; KURUP, G. B.; PAUL, D.; REJI, G. S. A study on vetiver fiber and lemongrass fiber reinforced composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 68, p. 2640–2645, 1 jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.563>.

LATIF, R. WAKEEL, S.; KHAN, N. Z.; SIDDIQUEE, A. N.; VERMA, S. L.; KHAN, Z. A. Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 38, n. 1, p. 15–30, 2 out. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0731684418802022>.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 416 p.

LOTFI, A.; LI, H.; DAO, D. V.; PRUSTY, G. Natural Fiber-reinforced composites: a Review on material, manufacturing, and Machinability. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 34, n. 2. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0892705719844546>.

MACEDO, V. DE *et al.* Obtenção de espumas flexíveis de poliuretano com celulose de *Pinus elliottii*. **Polímeros**, v. 27, n. spe, p. 27–34, 16 jan. 2017.

MEENA, K.; SINGH, M.; NAIR, A. S.; SONI, K. Influences of Various Parameters on Sound Absorption Properties of Vetiver Grass Fiber-based Developed Composite Material. **Indian Journal of Pure & Applied Physics**, v. 60, n. May 2022, p. 422–429, 6 maio 2022.

MIRACLE, D. B. DONALDSON, S. L. (EDS.), *asm handbook*, volume 21: composites, **ASM international**, 2001

MOTTA, B. C. C. **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.

NA, E.; DE, R. **Vetiver: Produção de Mudanças e Uso no Controle da Erosão**. Disponível em: <https://l1nq.com/ABuqi>.

NETO, J. R. A.; Carvalho, L. H.; Araújo, E. M. Influência da Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta. **Polímeros**, v. 17, n. 1, p. 10–15, mar. 2007. Disponível em <https://doi.org/10.1590/S0104-14282007000100006>.

RIBEIRO, V.; MOSIEWICKI, M. A.; YOSHIDA, M. I.; SILVA, M. C.; STEFANI, P. M.; MACOVICH, N. E. Polyurethane foams based on modified tung oil and reinforced with rice husk ash I: Synthesis and physical chemical characterization. **Polymer Testing**, v.32, n. 2, p. 438–445, 1 abr. 2013. Disponível em: <https://11nq.com/xFRdV>.

ROCHA, R. J.; LIMA, J. E. S.; GOMES, S. R.; IHA, K.; ROCCO, J. A. F. F. Síntese de poliuretanos modificados por óleo de mamona empregados em materiais energéticos. **Química Nova**, v. 36, p. 793–799, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000600009>.

RUKSAKULPIWAT, Y.; THOMTONG, W.; SUPPAKARN, N.; SUTAPUN, W.; PHINYOCHEEP, P. **An investigation on using vetiver grass in polypropylene composite**. Disponível em <https://11nq.com/z3w1G>.

RUKSAKULPIWAT, Y.; SUPPAKARN, N.; SUTAPUN, W.; THOMTHONG, W. Vetiver–polypropylene composites: Physical and mechanical properties. **Composites Part A Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 2, p. 590–601, 31 mar. 2006. Disponível em <https://encr.pw/RYHNJ>.

RUKSAKULPIWAT, Y.; JUNTUEK, P.; CHUMSAMRONG, P. RUKSAKULPIWAT, C. **Mechanical Properties of Polylactic acid and Natural Rubber Blends using Vetiver Grass Fiber as Filler**. Disponível em: <https://encr.pw/QA93C>.

SANTOS, A. M; CLARO NETO, S. 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. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18362/bjta.v4.i3.226>.

SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. G. C.; WYPYCH, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview. **Progress in Polymer Science**, v. 34, n. 9, p. 982–1021, set. 2009.

SILVA, R.; HARAGUCHI S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 661–671, 2009.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SIMONE, S. **Síntese e caracterização de poliuretano: espumas flexíveis puras e compósitos a partir de polióis à base de óleo de milho e adesivos à base de óleo de rícino**. Disponível em <http://hdl.handle.net/1884/43502>.

SONNENSCHNEIN, M. 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.

SREEKALA, M.S.; KUMARAN, M. G.; THOMAS, S. **Water sorption in oil palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites.** Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016> .

WIMONLAK SUTAPUN; NITINAT SUPPAKARN; YUPAPORN RUKSAKULPIWAT. Study of Characteristic of Vetiver Fiber Before and after Alkaline Treatment. **Advanced materials research**, v. 123-125, p. 1191–1194, 11 ago. 2010. Disponível em <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.123-125.1191>.

THE VETIVER NETWORK INTERNATIONAL (TVNI). Disponível em: <https://www.vetiver.org/>.

THE VETIVER NETWORK WEST INDIES (TVNWI). Disponível em: <https://tvnwi.org/>.

TUDORACHI, N.; MUSTATA, F. Curing and thermal degradation of diglycidyl ether of bisphenol A epoxy resin crosslinked with natural hydroxy acids as environmentally friendly hardeners. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 671–682, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.07.008>.

ZAMAN, H. Investigation on the Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of Vetiver Fiber Reinforced LDPE Composites. **Malaysian Journal on Composites Science and Manufacturing**, v. 14, n. 1, p. 58–72, 26 jul. 2024.