

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

GUILHERME MENDES DA SILVA

**COMPÓSITOS DE POLIURETANO TERMOFIXO COM REFORÇOS NATURAIS**  
**DERIVADOS DO MILHO**

BELO HORIZONTE

2025

GUILHERME MENDES DA SILVA

**COMPÓSITOS DE POLIURETANO TERMOFIXO COM REFORÇOS NATURAIS  
DERIVADOS DO MILHO**

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: Dra. Mayra Aparecida Nascimento

BELO HORIZONTE

2025

GUILHERME MENDES DA SILVA

**COMPÓSITOS DE POLIURETANO TERMOFIXO COM REFORÇOS NATURAIS  
DERIVADOS DO MILHO**

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: 16/07/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos, CEFET-MG.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda força e coragem para enfrentar meus problemas pessoais e garantir minha evolução psicológica, profissional e acadêmica.

Aos meus pais, irmãs e, principalmente, meus amigos por sempre darem o apoio necessário para que eu consiga viver cada dia de uma vez e fazer perceber que tenho forças para a construção de um trabalho íntegro como este.

A minha falecida tia que, onde ela está sempre aparece (*in memoriam*) nos momentos íntimos e eternos que me fazem acreditar que a vida presta e entender que estar realizando esse TCC é mais uma prova de que sou capaz.

Por fim, especialmente, a todo o CEFET e sua equipe acadêmica pelo acolhimento e, principalmente, pela prontidão em atender nossas solicitações mesmo que com dificuldades por conta de sua infraestrutura; o esforço contínuo e até mesmo o apoio pedagógico de todos fazem nós, discentes, se sentirem em casa.

## RESUMO

A preocupação crescente com os efeitos ambientais provocados pelos polímeros convencionais, em sua maioria derivados do petróleo e pouco degradáveis, tem impulsionado a busca por soluções mais ecológicas. Entre essas alternativas, os biocompósitos ganham destaque por combinarem matrizes poliméricas renováveis a reforços naturais, promovendo um uso mais responsável de recursos. Neste contexto, o presente trabalho investiga a produção de compósitos à base de poliuretano obtido a partir de fontes renováveis com reforços naturais provenientes da palha de milho. A fase reforço foi processada em três formas distintas: particulado, fibras curtas e fibras longas, sendo incorporado à matriz em proporções de 2%, 4% e 8% (v/v). Foram realizados ensaios de tração, dureza e resistência ao desgaste abrasivo. Os dados mostraram que o uso de 2% de fibras curtas resultou em melhor desempenho, com ganho de 18% na resistência à tração e uma redução de 54% na massa perdida durante o ensaio, quando comparado ao poliuretano sem aditivos. Já as maiores concentrações e o uso de fibras longas comprometeram a integridade do compósito, indicando dispersão inadequada e heterogeneidade na estrutura. Houve ainda um leve aumento na dureza geral dos materiais. De modo geral, os resultados apontam que, quando bem processada e em dosagens adequadas, a palha de milho tem potencial para agregar valor funcional ao poliuretano, além de colaborar com práticas sustentáveis na engenharia de materiais.

Palavras-chave: Biocompósitos; Poliuretano vegetal; Reforço natural; Palha de milho; Desempenho mecânico e tribológico.

## ABSTRACT

The growing concern over the environmental impacts caused by conventional polymers, mostly petroleum-derived and poorly degradable, has driven the search for more eco-friendly solutions. Among these alternatives, biocomposites stand out by combining renewable polymer matrices with natural reinforcements, promoting more responsible resource use. In this context, the present study investigates the production of composites based on polyurethane derived from renewable sources, reinforced with corn husk. The reinforcement phase was processed in three different forms: particulate, short fibers, and long fibers, and incorporated into the matrix at concentrations of 2%, 4%, and 8% (v/v). Tensile, hardness, and abrasive wear resistance tests were conducted. The data showed that using 2% short fibers yielded the best performance, with an 18% increase in tensile strength and a 54% reduction in mass loss during testing compared to the unreinforced polyurethane. Higher concentrations and the use of long fibers compromised the composite's integrity, indicating inadequate dispersion and structural heterogeneity. There was also a slight increase in the overall hardness of the materials. Overall, the results suggest that, when properly processed and used in suitable dosages, corn husk has the potential to enhance the functional value of polyurethane while contributing to sustainable practices in materials engineering.

Keywords: Biocomposites; Bio-based polyurethane; Natural reinforcement; Corn husk; Mechanical and tribological performance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Classificação hierárquica dos compósitos. ....	12
Figura 3.2 - Estrutura geral da formação do Poliuretano .....	15
Figura 3.3 - Componentes em diferentes partes do milho.....	18
Figura 4.1 - Fluxograma de Pesquisa. ....	22
Figura 4.2 - Fibras Longas da Palha de Milho .....	24
Figura 4.3 - (a) Fibra Curta e (b) Pó da palha de milho. ....	24
Figura 4.4 - Compósito produzido durante ensaio de tração.....	28
Figura 4.5 - Ensaio Roda de Borracha em execução.....	29
Figura 5.1 - Estrutura obtida para (a) PU- 8%PPM, (b) PU-4%FCPM e (c) PU-2%FLPM. ....	30
Figura 5.2 - CPs de PM para Ensaio de Tração.....	31
Figura 5.3 - Resistência a tração e Alongamento Total para PPM.....	31
Figura 5.4 - CP de PPM após ensaio. ....	32
Figura 5.5 - CPs para (a) fibra curta e (b) fibra longa da palha de milho.....	33
Figura 5.6 - Resistência à Tração e Alongamento Total para FCPM.....	33
Figura 5.7 - CPs com (a) 2%FCPM e (b) 4% FCPM após ensaio.....	34
Figura 5.8 - Resistência à Tração e Alongamento Total para PU-FLPM.....	35
Figura 5.9 - CPs com (a) 2% FLPM (b) 4% FLPM após ensaio.....	36
Figura 5.10 - Gráfico Tensão X Deformação para 2% FLPM. ....	37
Figura 5.11 - Dureza (Shore A) dos Compósitos Produzidos. ....	38
Figura 5.12 - Corpos de Prova (a) antes e (b) depois de Teste de Roda de Borracha. ....	39
Figura 5.13 – Perda de Massa obtida (g).....	39
Figura 5.14 - Fissuras ocasionadas pelo impacto das partículas. ....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Técnicas para a moldagem de Compósitos. ....	13
Tabela 3.2 - Compósitos sustentáveis à base de PU e fibras naturais. ....	16
Tabela 3.3 - Resíduo do milho como reforço. ....	19
Tabela 4.1 - Formulações para CPs conforme Tipo de Ensaio. ....	26

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

cm<sup>3</sup>: centímetro cúbico.

CP: Corpo de Prova.

FCPM: Fibras Curtas da Palha de Milho.

FLPM: Fibras Longas da Palha de Milho.

g.s<sup>-1</sup>: grama por segundo

g: grama.

MDI: Diisocianato de Difenilmetano.

mm/min: milímetro por minuto.

mm: milímetro.

MPA: Megapascal.

N: Newton.

NaOH: Hidróxido de Sódio.

NBR: Norma Brasileira.

-NCO: grupo isocianato.

°C: grau Celsius.

-OH: grupo hidroxila.

PM: Palha de Milho.

PPM: Particulado da Palha de Milho.

PU: Poliuretano.

PU-FCPM: Poliuretano reforçado com Fibra curta da palha de milho.

PU-FLPM: Poliuretano reforçado com Fibra longa da palha de milho.

PU-PPM: Poliuretano reforçado com Particulado da palha de milho.

v/v: concentração em volume.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
2.1	Objetivo geral .....	11
2.2	Objetivos específicos .....	11
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
3.1	Materiais compósitos .....	12
<b>3.1.1</b>	<b>Matrizes poliméricas .....</b>	<b>14</b>
3.1.1.1	<i>Poliuretano termofixo</i> .....	14
<b>3.1.2</b>	<b>Reforços naturais .....</b>	<b>16</b>
3.1.2.1	<i>Fibras e partículas provenientes do milho</i> .....	17
3.2	Resistência à tração e desgaste à abrasão .....	20
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
4.1	Descrição geral do trabalho .....	22
4.2	Materiais .....	23
4.3	Métodos .....	23
<b>4.3.1</b>	<b>Preparação do reforço extraído da palha de milho. ....</b>	<b>23</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Obtenção do Compósito .....</b>	<b>25</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Determinação da Densidade .....</b>	<b>26</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Determinação da Dureza.....</b>	<b>27</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Determinação da Resistência à Tração.....</b>	<b>27</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Ensaio Roda de Borracha .....</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
5.1	Análise visual da superfície .....	30
5.2	Resistência à Tração .....	31
5.3	Dureza e Ensaio Roda de Borracha .....	37
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crescente demanda por materiais sintéticos tem impulsionado notáveis avanços em diversos setores industriais, da construção civil à indústria automotiva, passando por embalagens, equipamentos médicos e bens de consumo. No centro dessa revolução estão os polímeros, cuja versatilidade, leveza e custo relativamente baixo os tornaram indispensáveis na vida moderna (Hage Jr., 2018). Contudo, essa ampla aplicação vem acompanhada de um desafio significativo: o acúmulo de resíduos poliméricos de origem fóssil, cuja tempo elevado para decomposição contribui para a sobrecarga de aterros sanitários e a poluição ambiental (Brito *et al.*, 2011).

Diante desse cenário, cresce o interesse por alternativas mais sustentáveis, em especial, pelos chamados biopolímeros. Esses materiais, obtidos a partir de fontes renováveis como o milho, a celulose e a mamona, buscam reduzir a dependência do petróleo e minimizar os impactos ambientais sem comprometer o desempenho técnico. A norma brasileira ABNT NBR 15448-2 (Requisitos e métodos de ensaio para a biodegradação e compostagem de embalagens plásticas), por exemplo, já estabelece critérios para descarte e avaliação de biodegradação dos polímeros, o que evidencia o avanço dessa abordagem no cenário técnico-normativo nacional.

Mesmo assim, ambos os polímeros costumam apresentar limitações quanto a propriedades mecânicas e térmicas. Para superar essas deficiências, uma estratégia amplamente adotada é o desenvolvimento de compósitos, materiais formados pela união de uma matriz, polimérica, cerâmica ou metálica, e uma fase de reforço, que pode ser natural, fibras de sisal, milho ou de coco, ou sintética, fibras de kevlar®, carbono ou de vidro. O uso de fibras naturais como reforço, especialmente aquelas oriundas de resíduos agroindustriais, tem se mostrado uma alternativa viável e alinhada aos princípios da economia circular e sustentabilidade.

Neste contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de biocompósitos à base de poliuretano sintetizado a partir de um composto primário vegetal que, preferencialmente, não há concorrência com o setor alimentício e será reforçado com palha de milho, sendo um subproduto agrícola de baixo custo e abundante no Brasil. A escolha da matriz e do reforço se justifica tanto por razões ambientais quanto pela compatibilidade química entre os componentes.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Produzir biocompósitos a partir de uma matriz de poliuretano derivada de fontes renováveis, reforçada com palha de milho em diferentes formatos (particulado, fibras curtas e fibras longas)

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a influência do formato e da concentração dos reforços provenientes da palha de milho na resistência à tração e dureza dos biocompósitos;
- Investigar o desempenho tribológico dos compósitos produzidos, por meio de ensaios de desgaste abrasivo;
- Avaliar visualmente a homogeneidade e dispersão dos reforços na matriz;
- Determinar o formato e a concentração do reforço com maior potencial para futuras aplicações na área de engenharia de materiais.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

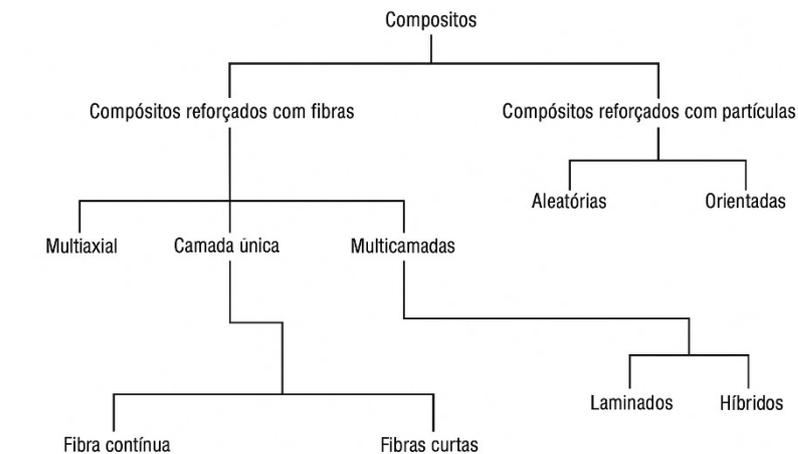
#### 3.1 Materiais compósitos

Materiais compósitos são definidos como sistemas constituídos pela combinação de duas ou mais fases com propriedades distintas, sendo geralmente uma matriz contínua e uma fase reforço dispersa. A função da matriz é manter os componentes coesos, transmitir tensões ao reforço e proteger sua integridade estrutural. Já o reforço, por sua vez, confere ao compósito melhorias específicas, como maior resistência mecânica, rigidez ou desempenho térmico, dependendo de sua natureza e orientação no material (Levy Neto *et al.*, 2018).

Embora o estudo de compósitos tenha ganhado notoriedade recente, esse tipo de estrutura é observado em diversos sistemas naturais, como madeira, osso e até em tecidos vegetais, nos quais diferentes constituintes coexistem de forma sinérgica (Callister Jr. *et al.*, 2016). A inspiração na natureza contribuiu para o avanço do design de compósitos sintéticos e sustentáveis, com aplicações que vão desde a aviação até embalagens biodegradáveis.

Para a classificação dos compósitos, é observado um descritivo quanto à geometria do reforço (partículas, fibras curtas ou contínuas), sua orientação dentro da matriz e se são constituídas por uma ou mais camadas, como observado na Figura 3.1.

**Figura 3.1 - Classificação hierárquica dos compósitos.**



Fonte: Adaptado de Levy Neto *et al.*, 2018.

No que diz respeito à morfologia dos reforços, partículas possuem dimensões aproximadamente esféricas e distribuem-se de forma aleatória na matriz, enquanto fibras, que

podem ser descontínuas (curtas) ou contínuas (longas), tendem a apresentar melhor desempenho mecânico devido a melhor distribuição de carga referente à sua maior razão comprimento/ largura, desde que bem orientadas e distribuídas (Pardini, 2018). A escolha entre esses formatos depende da aplicação final, do método de processamento e da compatibilidade entre as fases.

Adicionalmente, as fibras podem ser classificadas conforme sua origem. As fibras comerciais, como as de vidro e carbono, são produzidas a partir de matéria prima sintética e são amplamente empregadas por conta de suas elevadas propriedades mecânicas. As fibras naturais, como a de milho, coco e sisal, além de propriedades equivalentes, conferem sustentabilidade ao material devido sua origem.

Em detrimento ao processamento de compósitos poliméricos, vários métodos podem ser realizados. Dentre eles, os mais utilizados são descritos conforme mostrado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 - Técnicas para a moldagem de Compósitos.**

<b>Método</b>	<b>Matriz</b>	<b>Reforço</b>
<b>Deposição Manual (Convencional ou À Vácuo)</b>	Poliéster	Sisal, Juta e Fibras de Vidro
	Epóxi	Fibra de Juta Bidirecional
<b>Deposição por Pulverização</b>	Borracha Natural	Celulose e Papel Kraft
	Epóxi	Fibra de Bainha de Coco
<b>Enrolamento de Filamentos</b>	Polietileno de Alta Densidade	Fibra de Sisal
	Biopol	Fios de Juta
<b>Moldagem por Compressão</b>	Polipropileno	Fibras de Bagaço de Cana-de-Açúcar
	Ácido Polilático	Linho
<b>Enrolamento por Injeção</b>	Polipropileno	Fibras de Palma
		Vetiver

Fonte: Adaptado de Palanisamy *et al.*, 2024.

Pode ser observado que a moldagem por deposição manual pode utilizar o auxílio de vácuo como uma técnica complementar para melhorar a impregnação da matriz polimérica nos reforços naturais. Esse método é especialmente relevante quando se utilizam matrizes, como poliéster e epóxi, combinadas com fibras naturais, sisal e/ou juta, e até mesmo fibras de vidro, como indicado na tabela (Palanisamy *et al.*, 2024). A aplicação de vácuo durante o processo permite a remoção de bolhas de ar e melhora a aderência entre a matriz e o reforço, o que

pode resultar em compósitos com melhor desempenho mecânico e maior uniformidade estrutural.

### 3.1.1 Matrizes poliméricas

As matrizes poliméricas representam uma das principais categorias de materiais utilizados na fabricação de compósitos, devido à sua processabilidade, leveza e versatilidade. Podem ser classificadas, de forma geral, em três grupos: termoplásticas, termofixas (ou termorrígidas) e elastoméricas, cada qual com propriedades distintas que influenciam diretamente o desempenho do compósito final (Revelo *et al.*, 2021).

As matrizes termoplásticas possuem a capacidade de amolecer quando aquecidas e endurecer ao resfriar, o que permite sua reprocessabilidade. São amplamente utilizadas em aplicações que exigem moldagem repetida ou reciclagem, como em embalagens, peças automotivas e utensílios domésticos. Para as termofixas, como o epóxi e o poliéster, curam irreversivelmente após o processamento térmico, adquirindo uma estrutura tridimensional reticulada. Essa característica confere ao material final uma excelente estabilidade térmica, resistência química e elevada rigidez. No entanto, por não poderem ser remoldadas, seu descarte e reaproveitamento apresentam desafios ambientais. O terceiro grupo, os elastômeros, caracteriza-se pela elevada elasticidade, sendo empregados em aplicações que exigem deformação reversível, como pneus e amortecedores (Levy Neto *et al.*, 2018).

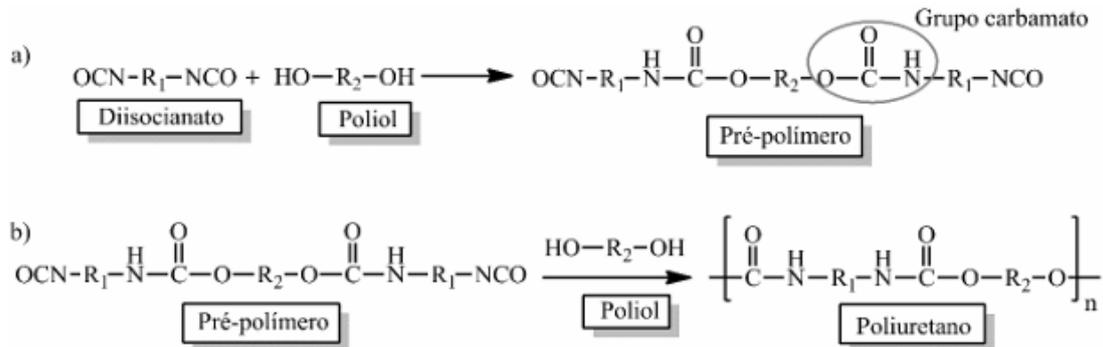
Neste trabalho, destaca-se o uso de uma matriz termofixa de poliuretano (PU) derivada de biocomponentes. Além da vantagem ecológica, essa resina apresenta propriedades como boa adesão a fibras naturais, resistência à abrasão e facilidade de moldagem (Chen *et al.*, 2021).

#### 3.1.1.1 Poliuretano termofixo

O poliuretano (PU) é um polímero amplamente utilizado em diversas aplicações industriais devido à sua notável versatilidade, que permite desde espumas flexíveis e rígidas até adesivos, vernizes e compósitos. Quando na forma termofixa, o PU apresenta uma estrutura tridimensional reticulada, adquirida por meio de reações químicas irreversíveis que ocorrem durante o processo de cura. Essa reticulação confere ao material final uma combinação de rigidez estrutural, resistência ao desgaste e durabilidade térmica e química (Chen *et al.*, 2021).

Para a reticulação oferecida, é viável o uso de alguns biopolióis com presença de grupo ésteres, por exemplo, que reagem com os grupos isocianato (-NCO) de diisocianatos formando ligações uretânicas. Esse processo resulta na formação da matriz polimérica que servirá de base para os biocompósitos (Chen *et al.*, 2021). A Figura 3.2 exemplifica a reação geral para a formação do poliuretano em questão.

Figura 3.2 - Estrutura geral da formação do Poliuretano



Fonte: Barbosa *et al.*, 2025

É observado o uso da água residual como formato de expansão química na fabricação de espumas PU. Nesse sentido, a própria água é verificada como um reagente para o diisocianato em excesso, que tem dois produtos: radicais contendo o grupo amina e a geração de gás carbônico. A partir disso, é introduzida uma nova reação com o diisocianato produzindo poliuréia, segmento rígido que também compromete as propriedades mecânicas do poliuretano (Barbosa *et al.*, 2025). Nesse sentido, a razão molar NCO/OH na resina resulta uma variável importante, a qual define o nível de reticulação do produto obtido e, conseqüentemente, propriedades intrínsecas como a dureza, rigidez e resistência mecânica (Chen *et al.*, 2021).

No sentido do emprego da resina como matriz, abordado na Tabela 3.2, é visto o uso de diversas fibras lignocelulósicas como reforço, a partir do pressuposto de melhor compatibilidade química, evidenciada pela natureza polar tanto da estrutura molecular do poliuretano como dos componentes estruturais presentes nas fibras. Isso garante a construção de uma interface matriz-carga mais bem estruturada e com certa transferência de carga entre si.

Tabela 3.2 - Compósitos sustentáveis à base de PU e fibras naturais.

Referência	Materiais Usados	Resultados Encontrados
Vilarim (2003)	PU; Fibras de Sisal e Coco	Comportamento dúctil. Melhor desempenho com Sisal Longo-Tratamento: melhora adesão, mas acomete deterioração na estrutura.
Mothé; Araújo (2004)	PU Comercial; Fibras de Curauá	Resistência à Tração menor em Compósito. Compósito com segmentos rígidos e flexíveis.
Cardoso <i>et al.</i> (2025)	PU; Fibras de Coco; Fibras de Celulose; (Proporções 50-50,60/40,70/30)	Fibra Natural: Menor Flexibilidade. Fibras aderidas à matriz PU, mas presença de bolhas

Fonte: Próprio Autor

Conforme esperado, a adição de fibras aborda modificações no comportamento dúctil da resina PU. Além disso, é verificado que o uso de fibras puramente de celuloses apresenta melhor a adesão fibra-matriz, embora os problemas inerentes à formação de bolhas (Cardoso *et al.*, 2025). Essa questão se torna ainda mais crucial ao analisar esses reforços naturais, já que podem apresentar estruturalmente, umidade interna, exigindo considerações cuidadosas ao serem incorporados nessas matrizes, especialmente, ao poliuretano termofixo estudado.

### 3.1.2 Reforços naturais

O uso de fibras naturais como reforço em compósitos tem se destacado como uma alternativa viável e sustentável frente às fibras sintéticas tradicionalmente utilizadas, como as de vidro ou carbono. Além de serem renováveis e biodegradáveis, os materiais vegetais apresentam baixo custo, densidade reduzida e razoável desempenho mecânico, o que os torna atrativos para diversas aplicações na indústria de materiais (Da Silva, 2014). As fibras naturais são, em sua maioria, compostas por celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, elementos que lhes conferem rigidez, flexibilidade e resistência (Palanisamy *et al.*, 2024).

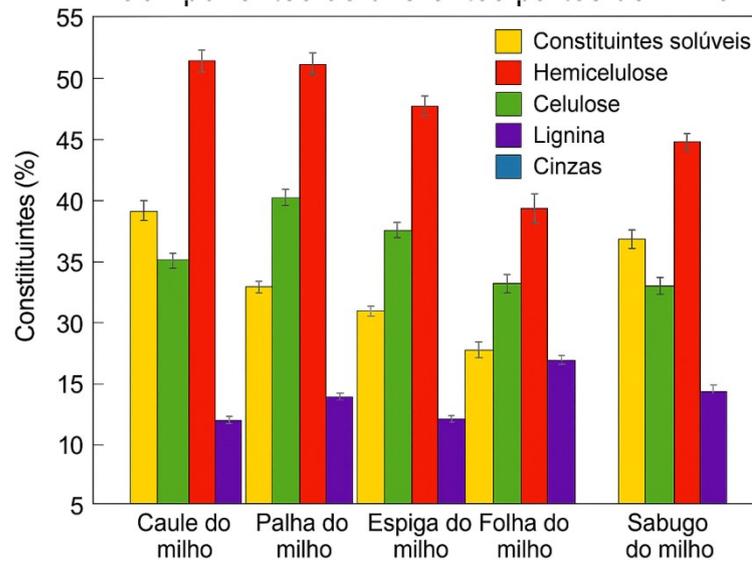
Entre as mais conhecidas estão o sisal, o coco, o linho, e a de milho, sendo amplamente utilizadas em compósitos com matrizes termoplásticas e termofixas. Seu desempenho como reforço depende de vários fatores: composição química, estrutura interna, orientação no compósito, tratamento superficial e compatibilidade com a matriz. Uma das principais

limitações dessas fibras está na sua alta afinidade por água, o que pode comprometer a adesão interfacial com matrizes poliméricas hidrofóbicas. Para minimizar esse efeito, é comum a realização de tratamentos físicos ou químicos (como alcalinização com NaOH), que expõem mais grupos reativos e melhoram a ancoragem da fibra à matriz (Bledzki e Gassan, 1999).

A escolha de utilizar resíduos agrícolas como fonte de fibras, amplia ainda mais o apelo ambiental da proposta. Em vez de utilizar fibras naturais convencionais que muitas vezes requerem cultivo dedicado, o aproveitamento de subprodutos do agronegócio permite agregar valor a resíduos antes descartados, reduzindo impactos ambientais e promovendo a lógica da economia circular.

#### *3.1.2.1 Fibras e partículas provenientes do milho*

A palha de milho se destaca como subproduto abundante da cultura de milho no Brasil, gerando impactos ambientais significativos quando descartada sem aproveitamento. Em média, para cada tonelada de grãos colhida, são produzidas entre 2,2 e 2,7 toneladas de talos e palha, além de cerca de 0,9 toneladas de sabugo (Costa *et al.*, 2020). Em efeito prático, o produto que chega ao mercado final, geralmente, é apenas a espiga de milho que é composta pelo estigma, palha e o sabugo do milho. Devido a isso, esses componentes são tratados e, porventura, utilizados para a manipulação do resíduo como reforço, bem como ao percentual considerável dos constituintes como a hemicelulose (principal responsável pela flexibilidade devido estrutura amorfa), celulose (responsável pela resistência à tração por conta de sua estrutura cristalina) e lignina (como agente de rigidez e resistência à degradação microbiana) que confere a possibilidade de funcionamento como reforço estrutural quando combinado a matrizes poliméricas (Luo *et al.*, 2017). A Figura 3.5 demonstra o percentual dos componentes em diferentes localidades do milho.

**Figura 3.3 - Componentes em diferentes partes do milho.**

Fonte: Traduzido e Adaptado de Luo *et al.*, 2017.

Como relatado, é viável seu uso, devido o percentual elevado desses constituintes, bem como, a retratação de baixos índices de lignina (constituente hidrofóbico) que, através de tratamentos químicos, é facilmente removida elevando a compatibilidade dos reforços. A Tabela 3.3 ilustra a versatilidade do milho como fonte para compósitos, evidenciado o aproveitamento integral de sua estrutura. Nesse intuito, são refletidos as melhorias significativas em diversas propriedades mecânicas, como rigidez e resistência à tração, bem como uma redução da massa específica dos materiais construídos. Essa valorização, por sua vez, justifica a relevância de estudos da matéria-prima, bem como, a expansão das aplicações dos compósitos à base de milho.

Tabela 3.3 - Resíduo do milho como reforço.

<b>Autor</b>	<b>Matriz Utilizada</b>	<b>Reforço Empregado</b>	<b>Resultados Encontrados</b>
<b>Lenhani <i>et al.</i> (2021)</b>	Filmes de Amido	Fibras de Talo, cascas e sabugos de milho.	Resistência à tração e Módulo de Young aumentados com fibras de palha e fibras de talos e sabugos.
<b>Mirițoiu; Rădoi (2024)</b>	Resina Dammar (com resina Epóxi ou Acrílica)	Sabugo de milho triturado	Compósitos reforçados apresentaram baixa resistência à tração e flexão.
<b>Fouly <i>et al.</i> (2021)</b>	Resina Epóxi	Pó de Sabugo de Milho	Melhorias no módulo de Young e na Resistência à Compressão. Redução em 35% no coeficiente de atrito e aumento de 4,8% na resistência ao desgaste.
<b>Jiang <i>et al.</i> (2023)</b>	Resina Epóxi	Palha de Milho	Aumento na resistência ao impacto, resistência à tração, à flexão e seu módulo.

Fonte: Próprio Autor.

Para certa permissibilidade de uma investigação inicial da influência da carga e identificação da otimização adequada para determinadas aplicações, é visto certo padrão para o teor de reforço utilizado. Fouly *et al.* (2021) avaliam, por exemplo, a adição do sabugo particulado na matriz epóxi nas frações entre (2 a 10) % para otimizar suas propriedades. É considerável, também, ressaltar os aprimoramentos da interface matriz-reforço como promoção de melhor resistência mecânica e estabilidade estrutural, através de ajustes durante o processamento e uso de agentes compatibilizantes como o anidrido maleico (Mirițoiu *et al.*, 2024).

A análise do impacto dessas concentrações e do formato do reforço, portanto, se torna diretamente relevante não apenas para as propriedades comumente avaliadas (como resistência à tração), mas também ao estudo de tribologia. A capacidade do material reforçado de suportar o desgaste e reduzir o atrito/ abrasão sofrida se liga, intrinsecamente, à microestrutura e a alta exigência da qualidade da interface produzida / desempenho superficial (Fouly *et al.*, 2021).

### 3.2 Resistência à tração e desgaste à abrasão

O desempenho de compósitos em aplicações reais depende não apenas de sua resistência mecânica, mas também de sua capacidade de resistir ao desgaste quando submetidos a atrito. Tais características determinam a durabilidade e a eficiência funcional dos materiais em contextos de uso que envolve movimentação, abrasão e contato entre superfícies (Menezes *et al.*, 2013).

A resistência à tração, por exemplo, está diretamente relacionada à habilidade do material em suportar cargas sem sofrer ruptura. Em compósitos, essa propriedade é fortemente influenciada pelo tipo de matriz, pelo reforço e, principalmente, pela qualidade da interface entre eles. Uma boa adesão entre as fases garante melhor transferência de tensões, resultando em maior resistência e menor propagação de falhas internas (Callister *et al.*, 2016). Já as propriedades tribológicas, que envolvem o estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação entre superfícies em contato, são cruciais para aplicações em que o material estará sujeito ao movimento relativo contínuo ou intermitente. O desgaste abrasivo, em particular, é uma forma comum de deterioração, ocorrendo quando as superfícies mais duras, na presença de partículas, desgastam mecanicamente a superfície do compósito.

Usualmente, os mecanismos de desgaste são influenciados diretamente pela estrutura interna do material. Dentre os mecanismos possíveis, destaca-se a abrasão e, conceitualmente, a delaminação da superfície. Essa delaminação, por sua vez, se descreve como um processo em que a remoção progressiva de camadas ou partículas da superfície de contato resulta em tensões cíclicas ou de propagação de trincas (Zum Gahr, 1987).

Em relação aos compósitos, esse mecanismo é afetado, a partir do momento que o local do fenômeno pode ser ocorrente na matriz, no reforço ou em ambos, simultaneamente. Para os reforçados com fibras vegetais, como é o caso deste estudo, a natureza, o formato e a distribuição do reforço impactam diretamente os comportamentos descritos. Fibras bem distribuídas e com boa adesão à matriz tendem a absorver melhor as tensões e resistir à propagação de ranhuras ou sulcos, reduzindo a taxa de desgaste. Em contrapartida, reforços mal dispersos ou com interfaces fracas podem atuar como pontos de falha, facilitando a degradação do material sob atrito (Menezes *et al.*, 2013).

Conforme relatado por Penagos (2024), o processo tribológico a ser estudado pode ser exemplificado por meio do ensaio roda de borracha. Nesse ensaio, as amostras do material produzido são fabricadas em formato retangular e passam por uma simulação hipotética sendo a areia nacional como o particulado erosivo (ASTM G65 – Teste de Roda de Borracha).

De forma a quantificar o desgaste, sua expressão pode ser dada pela taxa específica de desgaste ou a perda de massa. A taxa do volume total de material retirado pode ser conferida pela equação 1.

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (1)$$

Onde,

Q: Volume Total,

K: proporção de eventos que produzem os *débris* (*material perdido durante desgaste*),

W: Força Normal

H: dureza do material macio.

Com base na mesma, consideramos que para o ensaio realizado, a variável K é uma constante pré-estabelecida e o W tomado como uma força peso aplicada que, matematicamente, é visto que o seu aumento é proporcional à taxa de volume retirado. No mesmo contraponto, é válido avaliar que, indiretamente, a dureza por si só se torna uma variável predatória para uma análise do comportamento esperado para o ensaio realizado.

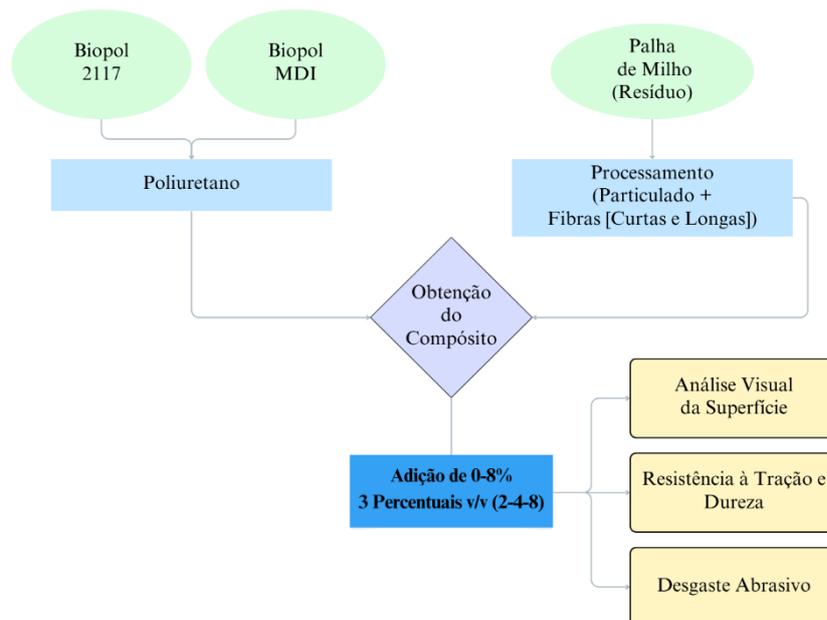
Por essa razão, a investigação das propriedades tribo-mecânicas no presente trabalho busca não apenas quantificar o desempenho dos biocompósitos produzidos, mas também compreender a influência da morfologia e da concentração da palha de milho na formação de um material viável e ambientalmente responsável.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Descrição geral do trabalho

O desenvolvimento deste trabalho envolveu a produção de compósitos com matriz de poliuretano (PU) à base do poliálcool éster de origem vegetal, reforçados com palha de milho em diferentes formatos e concentrações. O fluxograma da Figura 4.1 resume as principais etapas do processo experimental, desde a coleta e preparação dos materiais até a realização dos ensaios tribo-mecânicos. Foram investigadas três morfologias da palha, particulado, fibras curtas e fibras longas, nas concentrações de 2%, 4% e 8% (v/v), com o intuito de avaliar o impacto dessas variáveis no desempenho dos compósitos.

Figura 4.1 - Fluxograma de Pesquisa.



Fonte: Próprio Autor.

O fluxograma ilustra as etapas de criação de obtenção da resina de poliuretano (PU), os formatos do reforço a serem utilizados e esquematiza os tipos de análises realizadas. Adicionalmente, é indicado os traços empregados para melhor análise comportamental do compósito, espelhando os conceitos e discussões discutidos na seção 3.

## 4.2 Materiais

A matriz polimérica foi sintetizada a partir de dois componentes fornecidos pela POLYURETHANE™, o Biopol® 2117 (poliol éster vegetal) com densidade de, aproximadamente, 1,05 g/cm<sup>3</sup> e Ecopoly Iso Biopol® MDI (diisocianato de difenil metano) com densidade aproximada de 1,24 g/cm<sup>3</sup>. Para a formulação da resina, foi utilizada peneira molecular GK3 com o objetivo de reduzir a umidade e evitar formação excessiva de bolhas. Um catalisador à base de dibutil dilaurato de estanho (5%) foi adicionado para acelerar o processo de cura.

As palhas de milho foram coletadas em mercados locais e não passaram por tratamentos químicos. Foram processadas manualmente em três formatos: particulado (PPM) obtido por trituração, fibras curtas (FCPM) com cortes de aproximadamente 1mm e fibras longas (FLPM) mantidas no comprimento dos corpos de prova.

## 4.3 Métodos

### 4.3.1 Preparação do reforço extraído da palha de milho.

Para a preparação dos reforços, as palhas de milho (PM) brutas foram secas ao ar livre durante o período de uma semana. Após secas, foram submetidas à separação das fibras através do corte com o auxílio de uma faca. Após processo de retirada, essas fibras foram secas em estufa a 90 °C durante 10 horas. A partir disso, se obteve as fibras longas da palha de milho (FLPM) que são manipuladas para o tamanho do comprimento total dos corpos de provas com o uso de uma tesoura, conforme mostrado na Figura 4.2.

**Figura 4.2 - Fibras Longas da Palha de Milho**

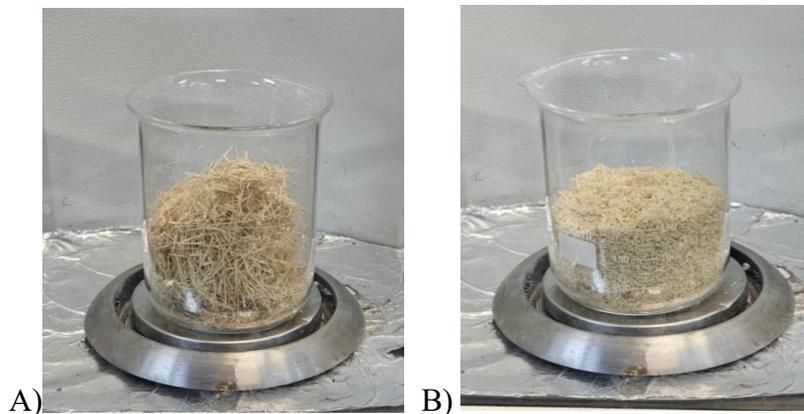


Fonte: Próprio Autor.

Após o processo de extração das FLPM, o montante foi dividido em três partes: a primeira parte preservada para obtenção dos compósitos de PU com FLPM (PU-FLPM), enquanto as demais seguiram com etapas de corte e trituração.

Para a preparação do particulado, as FLPM passaram por processo de trituração. Neste, as fibras são colocadas em um *mixer* e, após o tempo de 01 minuto, são peneiradas. Para a preparação das FCPM, além das extraídas do processo do PPM, as fibras longas também foram cortadas manualmente para o tamanho de 1 cm. A Figura 4.3 apresenta a (a) FCPM e (b) PPM obtidos.

**Figura 4.3 - (a) Fibra Curta e (b) Pó da palha de milho.**



Fonte: Próprio Autor.

A densidade média das fibras obtidas foi de  $0,830 \text{ g/cm}^3 (\pm 0,017)$  conforme o método de densidade por deslocamento líquido alinhado com o realizada por Sari *et al.* (2017). Para o formato em pó, é encontrada uma densidade entre  $0,82$  e  $0,85 \text{ g/cm}^3$  (Fouly *et al.*, 2021). A pequena alternância entre os valores pode ser atribuída a dois fatores: a presença de componentes não removidos (como a própria palha) e a forma de retirada das fibras, uma vez que é encontrada, na matéria-prima, fibras de espessuras diferentes. Em detrimento às densidades respectivas para o polioli e o MDI de  $1,05$  e  $1,238$  é verificada que a proximidade entre o peso específico possibilita uma melhor dispersão do reforço dentro da matriz.

#### 4.3.2 Obtenção do Compósito

Previamente à construção dos corpos de provas para o ensaio, foi analisada a formulação para adequação do percentual de fibras, bem como, a proporção ideal dos componentes utilizados na produção da resina PU em questão. Experimentalmente, estudos preliminares relataram a proporção sendo de 1:1 em decorrência de melhor aspecto superficial, a qual é verificada menor quantidade de bolhas, melhor qualidade da moldagem e expansão (Fonseca, 2025).

Em conformidade com esses estudos, é utilizada à otimização com  $0,03$  gramas de catalisador e  $1,0$  gramas de peneira para o conteúdo utilizado na moldagem dos corpos de provas (CPs) para o ensaio de tração que se considera uma massa total de  $18$  gramas. Sendo realizada essa otimização para os corpos de prova corresponde ao de tração, o valor da peneira foi ajustado para  $1,22$  gramas na formulação dos compósitos utilizados para o ensaio tribológico, uma vez que a massa final é de  $22$  gramas (respeitando o aumento de  $22\%$  em relação à massa utilizada para os corpos de prova produzidos para o ensaio de tração).

Para a formulação do compósito, foram mensuradas as concentrações em volume para consideração da diferença observada entre as densidades. Para os compósitos de PU com PPM (PU-PPM), o polioli foi inicialmente pesado e o PPM foi incorporado nas proporções de  $2\%$ ,  $4\%$  e  $8\%$  (v/v) juntamente com a peneira molecular, conforme mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Formulações para CPs conforme Tipo de Ensaio.

% Obtido (v/v)	Tipo Ensaio	Massa da Resina (g)	Massa da Carga (g)
0 %	Tração	18,00	0,00
2 %		17,74	0,26
4 %		17,47	0,53
8 %		16,93	1,07
0 %	Roda de Borracha	22,00	0,00
2 %		21,68	0,32
4 %		21,36	0,64
8 %		20,72	1,28

Fonte: Próprio Autor.

A mistura obtida foi adicionada ao MDI e, após homogeneização manual e adição de catalisador, o material foi vertido nos moldes de silicone para a cura a frio e a vácuo, através do processo *bag vacuum*, durante o período de 24 horas.

Para as amostras do PU-FCPM, as proporções foram selecionadas com base nos testes realizados com o PU-PPM. O processo de obtenção se seguiu o mesmo realizado para a produção dos compósitos com PPM, a qual as fibras curtas se encontraram com orientação aleatória após processo de reticulação.

No caso das FLPM, a metodologia incluiu a prévia mistura do polioliol com o MDI. Após a homogeneização, a combinação foi vertida em molde de silicone nos quais as fibras longas já estavam posicionadas e com orientação alinhada ao esforço mecânico, permitindo a cura nas mesmas condições dos demais. As proporções também foram selecionadas após os resultados com o PU-PPM.

#### 4.3.3 Determinação da Densidade

A densidade das fibras foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 17233 (Determinação de densidade real por picnômetro de vidro). A densidade das fibras de milho ( $\rho_f$ ) foi estimada utilizando um picnômetro através da Equação 2, em que  $m1$  é a massa do picnômetro seco,  $m2$  a massa do picnômetro com a fibra,  $m3$  é a

massa do picnômetro com a fibra e água,  $m_4$  é a massa do picnômetro com água e  $\rho_w$  é a densidade da água em temperatura ambiente. Todas as medições foram realizadas em triplicata.

$$\rho_f = \frac{(m_2 - m_1)}{[(m_4 + m_2) - (m_1 + m_3)]} * \rho_w \quad (2)$$

#### 4.3.4 Determinação da Dureza

A dureza do compósito foi determinada conforme ASTM D-2240 (Método para Teste de Dureza em Borrachas), especificando a dureza Shore A. Para cada amostra, a dureza média foi registrada em quintuplicata com o Durômetro escala Shore A da CV™ - modelo 3805B. Como descrito pela norma, para medições acima de 90 na escala A, é recomendado mudança para a escala D, que são excepcionalmente para plásticos duros. Por conta da não possibilidade do ensaio por via do Durômetro nessa escala, a medição foi realizada de forma comparativa.

#### 4.3.5 Determinação da Resistência à Tração

Para as propriedades macroscópicas, houve a execução do ensaio de tração, quantificando a resistência à tração e alongamento na ruptura do produto. Os compósitos formulados foram moldados conforme os corpos de provas previstos pela norma ASTM D3039 (Método de Ensaio para propriedades de tensão em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de alto módulo) com comprimento útil de 75 mm, largura útil de 12 mm e espessura de 05 mm. Após a cura, foi realizado o ensaio na máquina de ensaio universal SHIMADZU® modelo MWG-20KNA Autograph AG-X com célula de carga de 10KN, conforme ilustrado pela Figura 4.4.

**Figura 4.4 - Compósito produzido durante ensaio de tração.**



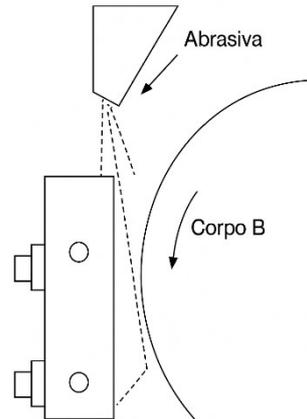
Fonte: Próprio Autor.

A mensuração desses resultados foi realizada através da interpretação dos dados gerados e utilizando como parâmetro uma taxa de deformação de 05 mm/min com temperatura ambiente de 22 °C, sendo realizado em quintuplicata.

#### 4.3.6 Ensaio Roda de Borracha

Para a determinação da resistência dos biocompósitos frente ao desgaste abrasivo, foi realizado o ensaio conhecido como Roda de Borracha calculando a diferença de massas. Os compósitos a serem estudados foram moldados conforme formato retangular exigido nas dimensões de 25x75x12 mm<sup>3</sup>. Depois de curados, para determinação dos, foi realizada uma duplicata em corpos de prova testes com a variação de dois esforços mecânicos, 45 e 85 N, durante um intervalo de 05 minutos com a presença da areia como abrasivo como ilustrado na Figura 4.5.

**Figura 4.5 - Ensaio Roda de Borracha em execução.**



Fonte: Próprio Autor.

A partir dessa rodada teste, verificou-se que o esforço de 45 N demonstrou resultados satisfatórios para uma análise comparativa. Em detrimento de uma melhor análise das superfícies produzidas, o teste é realizado em duplicata e a avaliação para o desgaste abrasivo é feito a partir da equação 03, demonstrando a perda de massa total dos biocompósitos produzidos.

$$m_f - m_o = \Delta \quad (3)$$

Onde,

$m_f$ : massa do corpo de prova após ensaio.

$m_o$ : massa do corpo de prova antes do ensaio.

$\Delta$ : perda de massa do corpo de prova.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise visual da superfície

De certo modo, são encontrados alguns percalços delimitados para cada formato utilizado. Em relação ao PPM, é possível obter certa viscosidade favorável até o teor de 8%. Entretanto, é evidenciado durante o processo de produção do compósito, que a pré-mistura entre o polioliol e o particulado já apresenta aglomerações do reforço. Essa aglomeração se torna menos visível com a inserção do MDI. Para o formato fibroso, a dificuldade já se torna visível para os teores de 4%. A quantidade de massa da resina PU obtida se torna crivelmente pequena no momento de incorporação dos reforços; é indicado que, possivelmente, devido à preservação por parte da estrutura porosa natural do milho (Ndeke; Tambo, 2019), a resina parece passar por um processo de absorção ocorrendo certa impregnação das fibras. Esse fator acaba que confecciona compósitos com adesão superficial não tão favorável e a presença de bolhas na sua estrutura, conforme mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Estrutura obtida para (a) PU- 8%PPM, (b) PU-4%FCPM e (c) PU-2%FLPM.



Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de PU-FLPM, devido à alteração necessária no processo de moldagem dos compósitos, é observada diferenças em seu aspecto visual. Além da presença maior de bolhas, é perceptível a mudança de cor dos compósitos curados, bem como, uma pega mais úmida da resina caracterizando possibilidade da não reticulação total das ligações cruzadas; o contato imediato entre a resina formulada e as fibras longas pode justificar essa cura não sucedida. Uma maior dificuldade para a dispersão das fibras, também, é observada, devido a não linearidade das fibras extraídas. Apesar disso, a concentração maior de fibras, nesse contexto, se torna benéfica devido ao fato da disposição do teor de 4% de FLPM se apresentar de forma mais compacta frente a 2% de FLPM.

## 5.2 Resistência à Tração

Foram realizados, a priori, os testes para os corpos de provas produzidos para PU-PPM, englobando os teores de 2,4 e 8%, apresentados através da Figura 5.2.

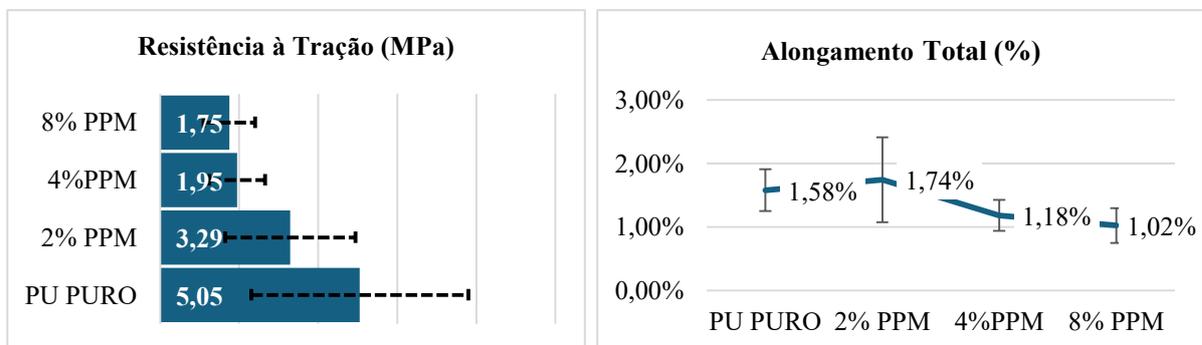
Figura 5.2 - CPs de PM para Ensaio de Tração.



Fonte: Próprio Autor

Os CPs confeccionados apresentam coloração amarelada e opaca, indicando a presença e uma distribuição homogênea do reforço particulado na matriz. Visualmente, são verificadas as imperfeições nos corpos com teores mais altos, comparado ao corpo com 2% PPM. Conseqüentemente, o incremento em maiores teores, como os de 4% e 8% podem representar impactos negativos nos resultados. A figura 5.3 apresenta os valores obtidos para resistência à tração e alongamento total obtido para o formato de reforço apresentado.

Figura 5.3 - Resistência a tração e Alongamento Total para PPM.



Fonte: Próprio Autor.

Para a resistência à tração, é verificado que as amostras de PU-PPM apresentam resultados inferiores ao analisado para o polímero puro. Como demonstrado, é verificado a existência de

desvios padrões elevados. Essa ocorrência é justificada pela disposição dos moldes de silicone em caixas de impressão 3D que estão sutilmente torcidas reproduzindo esse aspecto aos corpos de prova produzidos.

Apesar disso, o resultado ecoa diretamente ao relatado por Miritoiu *et al.* (2024), o qual retrata o comportamento para o particulado de concentrador de tensão, ao passo que o teor aumenta. Isso é observado pela decorrência de sua má distribuição, do espaçamento existente entre a matriz e reforço, além do formato irregular, como é observado na Figura 5.4.

**Figura 5.4 - CP de PPM após ensaio.**



Fonte: Próprio Autor.

Nesse contexto, é possível ter uma relação para com a ausência de tratamento no particulado. Com o processo de modificação química do reforço, é relatado aumento a resistência ao impacto, por exemplo (Jiang *et al.*, 2023). Além disso, assim como relatado na seção 4.3.2, é observado que o uso de altos teores de carga aumenta a formação de vazios conforme visto no aspecto visual do PU- 8%PPM.

A partir dessa análise, foi verificado que a construção dos CPs com teor de 8% para as FCPM e FLPM se tornaria equivocadas por conta da similaridade dos resultados obtidos entre os teores de 4% e 8%. Para uma análise mais crucial desses formatos, se realizou o desenvolvimento para os dois primeiros teores como mostrado na Figura 5.5 (a) e (b).

**Figura 5.5 - CPs para (a) fibra curta e (b) fibra longa da palha de milho.**

A)



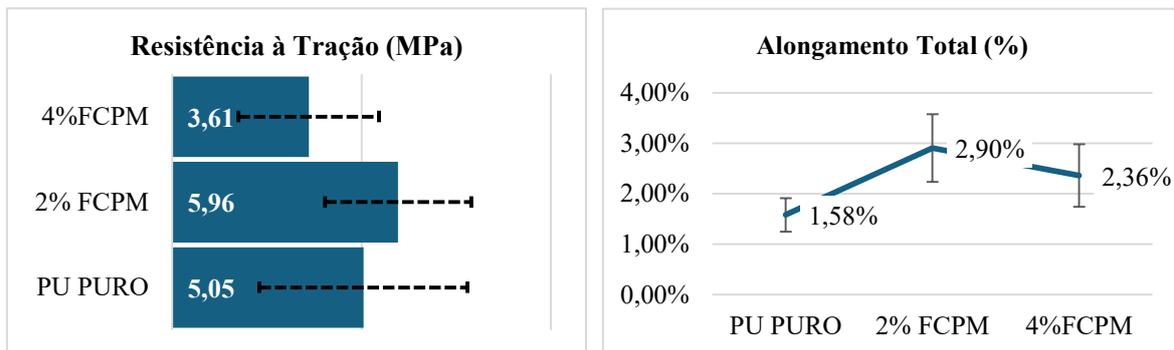
B)



Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de PU-FCPM, as cargas são dispostas em mais de uma direção e sentido, conforme pressuposto na Seção 4.3.2. Nesse sentido, as amostras de PU-FLPM apresentaram certo alinhamento do reforço ao longo do corpo, embora a possibilidade da presença de vazios entre as FLPM. A Figura 5.6 apresenta os resultados encontrados para o PU-FCPM.

**Figura 5.6 - Resistência à Tração e Alongamento Total para FCPM**



Fonte: Próprio Autor.

Para as FCPM, é indicado um aumento da resistência à tração para o teor de 2%. Para teores mais altos, é observada uma redução da propriedade podendo ser ocasionada pela má adesão fibra-matriz, constatada na Figura 5.7 (b).

Figura 5.7 - CPs com (a) 2%FCPM e (b) 4% FCPM após ensaio.

A)



B)

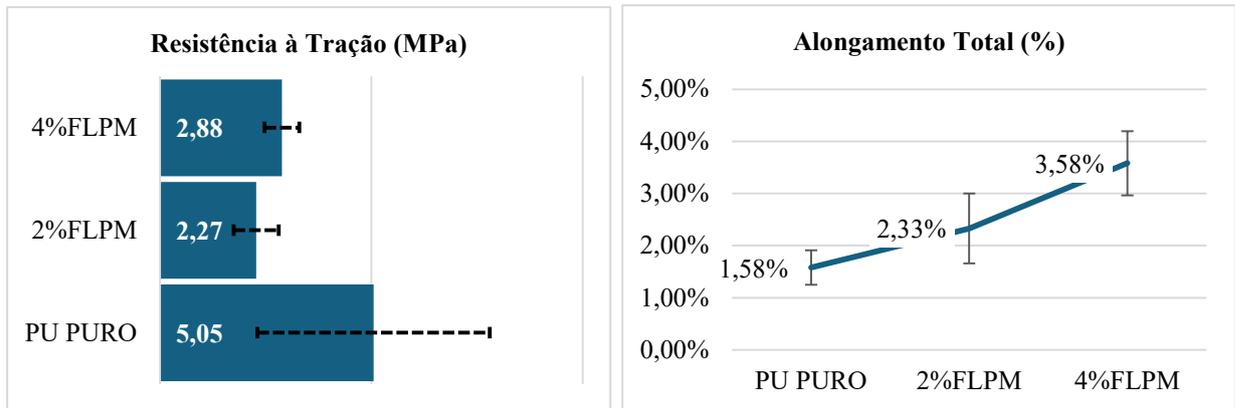


Fonte: Próprio Autor.

Além da otimização encontrada para 2% FCPM, a boa compatibilidade da fibra utilizada é notada pelo aspecto visual da falha, resultado coerente com o observado por Flandez *et al.* (2012), encontrando aumento de 14% em compósitos com a palha de milho modificada com compatibilizante em matrizes de origem petroquímicas. Em sistemas de PU, é destacada a preferência por reforços fibrosos no sentido de manter a homogeneidade e reduzir os pontos frágeis (Fouly *et al.*, 2021).

Em relação ao PU-4%FCPM, os resultados não podem ser ditados como os otimizados para o teor empregado. Embora a aglomeração ocorrente pela viscosidade e a má aderência, é verificado por Jiang *et al.* (2023) e Herlina Sari *et al.* (2017), que processos de tratamento como Hidróxido de Sódio (NaOH) ou a acetilação corroboraram para uma limpeza da superfície das fibras, favorecendo a adesão e aumentando significativamente a resistência à tração e o módulo de elasticidade. A Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos para as amostras de PU-FLPM.

**Figura 5.8 - Resistência à Tração e Alongamento Total para PU-FLPM.**

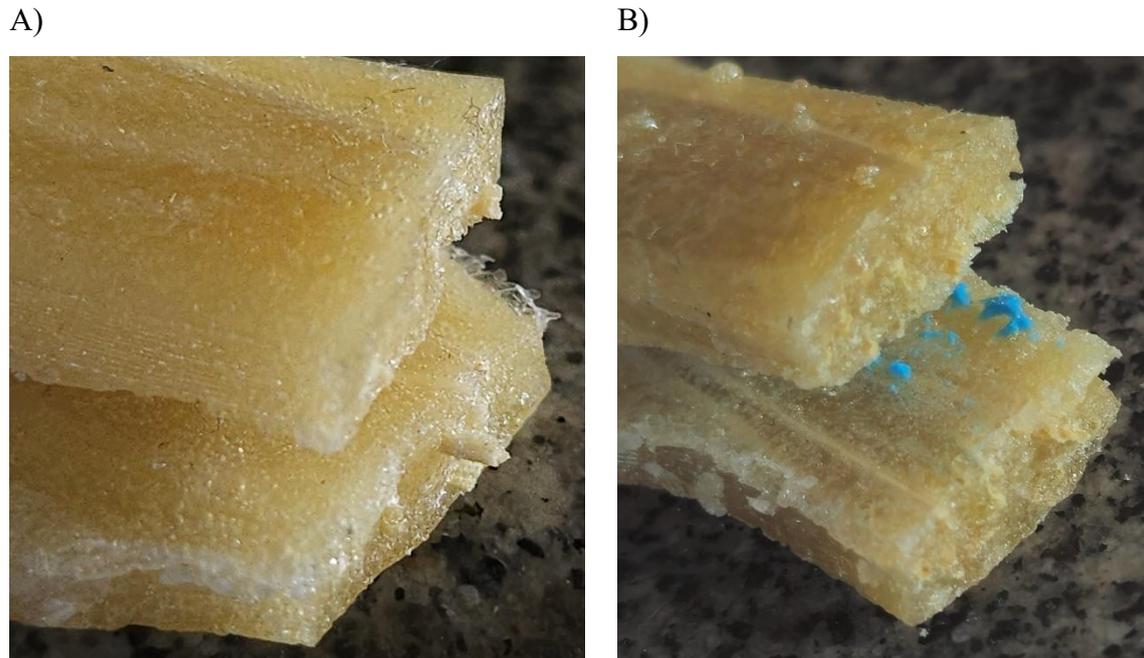


Fonte: Próprio Autor.

Em relação ao reforço no formato de fibras longas, é indicado resultados inferiores ao PU Puro, apesar do aumento moderado de na resistência mecânica para as amostras de PU-4% FLPM. Apesar da expectativa de melhor distribuição da carga e resultados superiores ao PU-FCPM, a grande variabilidade associada às dificuldades abordadas na seção 4.3.2 explica a resistência encontrada. Adicionalmente, é observado que o aumento no comprimento de fibras naturais, sem o controle correto de alinhamento e modificação superficial, leva a heterogeneidade do compósito ocasionando na dispersão e em pontos concentradores de tensão (Herlina Sari *et al.*, 2017).

De forma alinhada com a distribuição de carga com o teor das fibras dentro da matriz, o comportamento com o percentual de 4% das fibras longas se tornou melhor com a alteração do comprimento das fibras explicada pela densidade superior de fibras paralelas ao sentido do esforço realizado. A Figura 5.9 demonstra os CPs após ensaio de tração para 2% e 4% de FLPM, respectivamente.

**Figura 5.9 - CPs com (a) 2% FLPM (b) 4% FLPM após ensaio..**



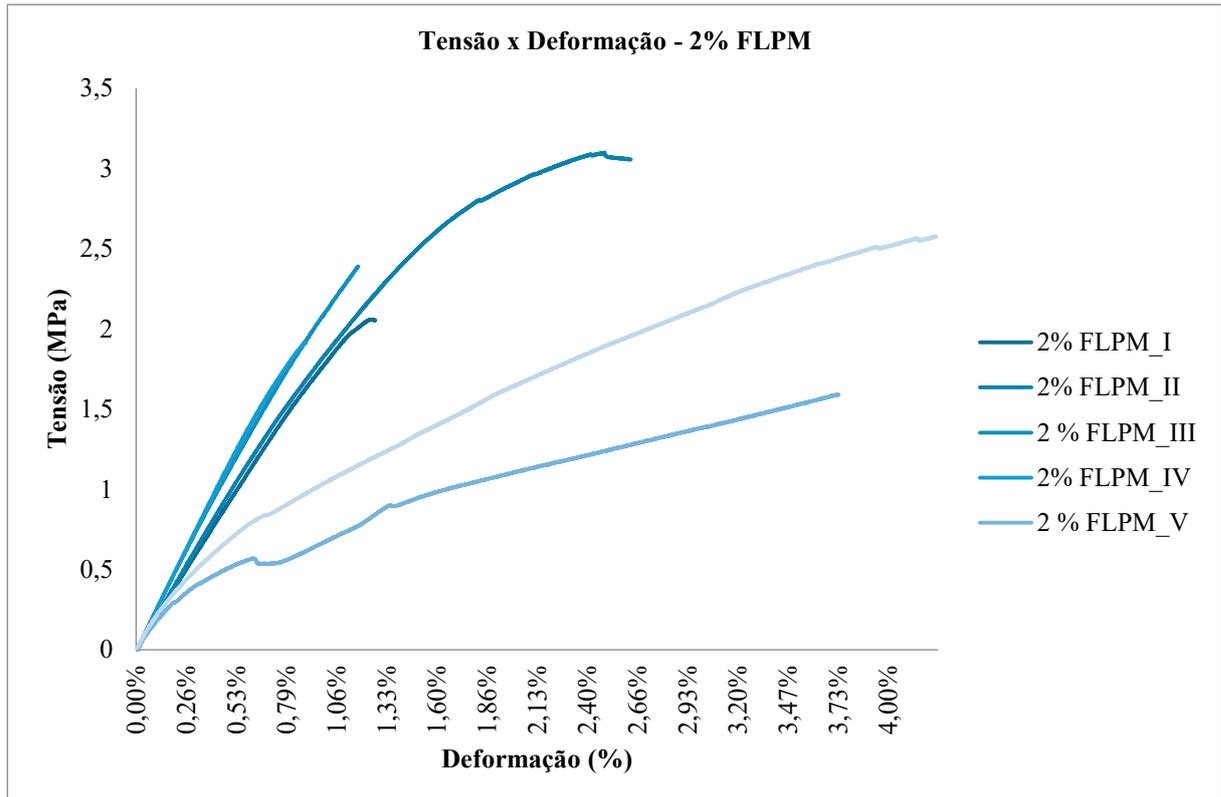
Fonte: Próprio Autor.

Conforme relatado, é apresentada uma estrutura com maior quantidade de bolhas. É visto, também, a presença de fibras com menor interação com a matriz formada para corpos de provas com 2% FLPM. Para os compósitos com 4% FLPM, não é notado a presença de fibras soltas após a quebra.

Os ensaios de tração realizados nas amostras de PU reforçadas com os diferentes formatos da palha de milho evidenciaram diferenças de comportamento mecânico em função do tipo e teor de reforço usado. Como apresentado, a amostra de PU-2%FCPM evidência melhor resistência à tração e corrobora para um demonstrativo de melhora significativa na capacidade de suportar cargas com a introdução controlada do reforço mesmo sem tratamento químico. O alongamento total, por sua vez, houve uma tendência de aumento com a adição das fibras, indicando um compósito mais dúctil em comparação ao PU Puro. Esse resultado sugere certa absorção de energia antes da fratura pelos reforços e é apoiado nas literaturas como em Lenhani *et al.* (2021) e Jiang *et al.* (2023), associando a atuação do reforço como elemento de travamento na propagação das trincas.

De certo, em teores mais elevados, bem como para as amostras de fibras longas, é observado queda na resistência e aumento significativo dos desvios padrões. Esse comportamento está associado com os problemas relatados na Seção 4.3.2 e é visto através dos gráficos de Tensão X Deformação, como observado na Figura 5.10.

**Figura 5.10 - Gráfico Tensão X Deformação para 2% FLPM.**



Fonte: Próprio Autor.

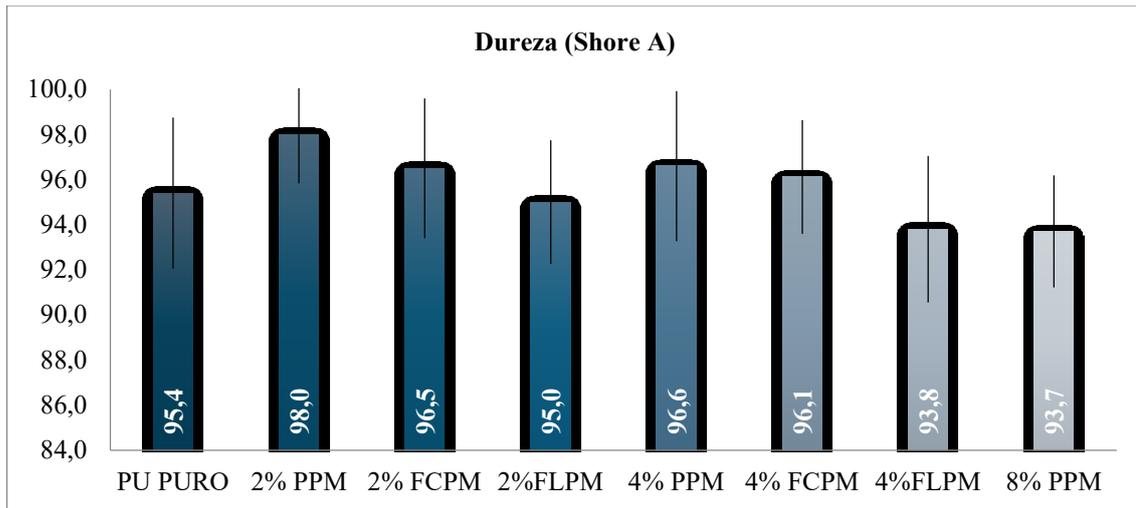
Usualmente, as amostras que representam menores valores de tensão e maiores deformações demonstraram uma maior quantidade de bolhas em sua estrutura, se alinhando ao relatado por Chen *et al.* (2021).

### 5.3 Dureza e Ensaio Roda de Borracha

Com base nas determinações encontradas no ensaio mecânico, foi avaliado como as variações na formulação dos compósitos podem se comportar frente ao desgaste abrasivo. Tendencialmente, aqueles que representaram uma melhora na resistência mecânica, como a amostra PU-2% FCPM, indica uma melhor transferência de carga entre matriz e fibras.

Adicionalmente, é pressuposto que os compósitos com alongamento total maior quando submetidos ao desgaste, categoricamente podem acomodar as deformações locais, retardando o surgimento das microtrincas (Fouly *et al.*, 2021). A Figura 5.11 apresenta os valores de dureza obtidos.

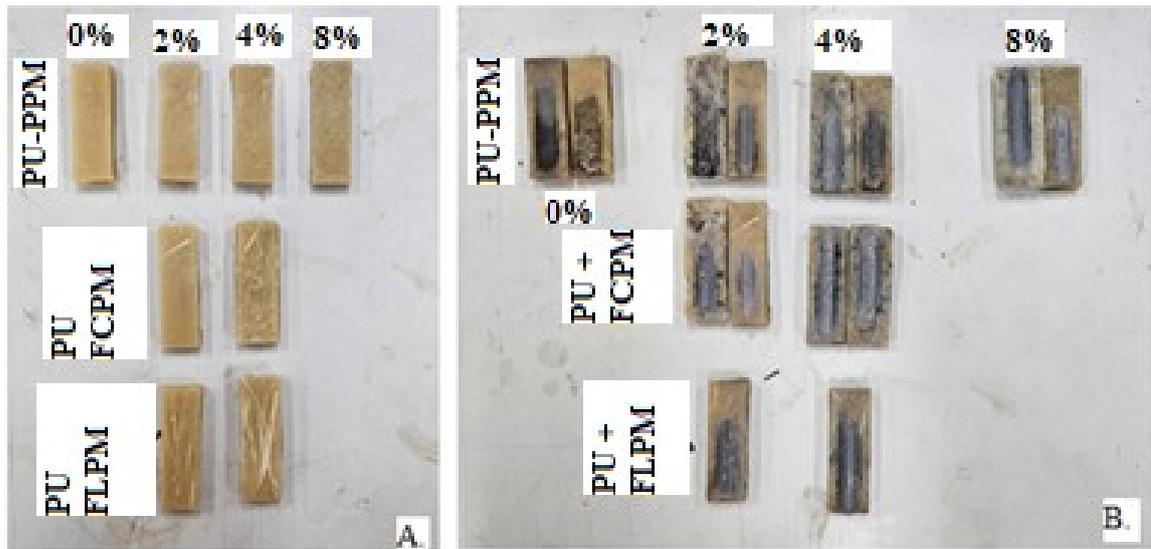
**Figura 5.11 - Dureza (Shore A) dos Compósitos Produzidos.**



Fonte: Próprio Autor.

Em relação à dureza Shore A das amostras, é apresentado comportamento similar aos observados na Seção 5.1. Os compósitos de PU-FCPM apresentaram um aumento significativo para a dureza em relação ao PU puro. Para 2% FCPM, é adquirido um aumento, em média, de 15%, indicando a produção de um material mais rígido. Em teores mais elevados (4% e 8%), existe certa constância nos valores para a dureza, todavia contendo maiores dispersões nos valores – o que indicia a heterogeneidade da superfície. Embora seja evidenciado que a maior dureza se relaciona com uma maior resistência ao desgaste (Bakry *et al.*, 2013), deve-se atentar que valores excessivos para a propriedade podem levar a falhas por fragilidade e/ou a má adesão fibra-matriz (Baria *et al.*, 2016 e Napiórkowski *et al.*, 2018). A Figura 5.12 evidencia as superfícies das amostras antes e após o ensaio.

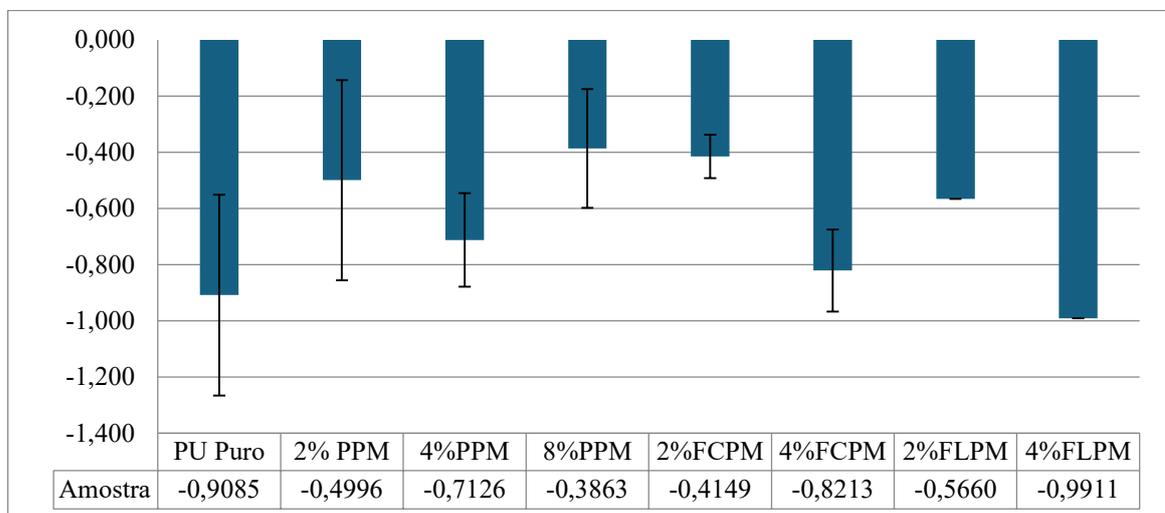
Figura 5.12 - Corpos de Prova (a) antes e (b) depois de Teste de Roda de Borracha.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 5.12b evidencia certa diferença de comportamento frente às duplicatas realizadas. As amostras de PU-FLPM foram confeccionadas em menor quantia, devido à similaridade de resultados obtidos às fibras curtas. Usualmente, os corpos de prova posicionados à direita de cada conjunto representam superfícies de melhor aspecto (sem a presença de bolhas). Nestas, é possível o favorecimento a resistência à abrasão, especialmente, para os traços de 2% e, excepcionalmente, para o de 8% que mostram, visualmente, menor perda de massa. A figura 5.13 apresenta, matematicamente, a diferença apresentada das massas com seus respectivos desvios padrões.

Figura 5.13 – Perda de Massa obtida (g).



Fonte: Próprio Autor.

Os resultados estão de acordo com as análises de Baria *et al.* (2016) e Bakry *et al.* (2013), que destacam o favorecimento a resistência ao desgaste de uma maior homogeneidade e melhor adesão fibra-matriz. A presença de bolhas em algumas amostras, de praxe, pode ter contribuído para um maior desgaste, como visto no PU-4% FLPM. Analiticamente, a perda calculada confirma as observações visuais, onde as amostras com 2% PPM e 2% FCPM apresentam menores perdas. Para os compósitos com teores de 4% de reforço, é evidenciado a má adesão e o aumento excessivo de reforço.

Ao analisar os resultados para a dureza e massa retirada, é perceptível o comportamento contraditório da amostra PU-8%PPM. Embora a menor dureza, ela exibe um desempenho interessante para a resistência à abrasão. É sugerido, dessa forma, que com a adição do reforço, de forma controlada, a palha pode oferecer proteção à matriz polimérica funcionando como pontos de impacto (Menezes *et al.*, 2013). Ainda nesse contexto, é evidenciado pela Figura 5.14, a atuação mais direta do reforço para a formação e propagação das fissuras promovidas pelo desgaste.

**Figura 5.14 - Fissuras ocasionadas pelo impacto das partículas.**



Fonte: Próprio Autor.

A análise integrada evidencia que os compósitos reforçados com 2% FCPM indicam melhor desempenho frente ao desgaste abrasivo, conciliando dureza elevada, homogeneidade e baixa remoção de massa. Sobretudo as amostras de PU-4% FCPM e PU-4%FLPM, confirmam a dificuldade de dispersão e formação de bolhas citadas na formulação dos compósitos. As

diferenças superficiais dos corpos de prova após ensaio reforçam a ideia de que, mesmo em durezas menores, compósitos com estrutura interna uniforme tendem a apresentar resultados satisfatórios para resistência ao desgaste, minimizando os pontos concentradores de tensão.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como propósito investigar o potencial da palha de milho como reforço em compósitos de poliuretano de origem vegetal, avaliando diferentes morfologias (particulado, fibras curtas e longas) e concentrações (2%, 4% e 8% v/v). A proposta buscou aliar desempenho funcional à sustentabilidade, aproveitando um resíduo agrícola amplamente disponível no Brasil.

A partir dos ensaios realizados, foi possível concluir que os compósitos com 2% de fibras curtas (FCPM) evidenciaram um melhor equilíbrio entre resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste abrasivo, com aumento de até 18% na resistência à tração e redução de 54% na perda de massa, em comparação ao PU puro. Esses resultados reforçam que uma baixa concentração de reforço, quando bem distribuída, favorece a transferência de tensões e melhora o desempenho do compósito.

Por outro lado, concentrações mais elevadas e o uso de fibras longas resultaram em queda nas propriedades, atribuída à formação de bolhas, má dispersão e heterogeneidade da matriz. A análise visual dos corpos de prova confirmou que a qualidade da interface entre fibra e matriz é um fator determinante, influenciando diretamente na integridade estrutural e na resposta aos esforços.

Assim, os objetivos propostos foram atingidos: foi possível caracterizar e comparar o efeito do tipo e teor de reforço nas propriedades tribo-mecânico dos compósitos formulados. Como contribuição prática, o estudo aponta que a incorporação modesta e otimizada da palha de milho pode viabilizar aplicações técnicas em materiais sustentáveis com propriedades reforçadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAKRY, Ahmed; MOHAMED, Ahmed; ABDEL-MAGID, Basma; ABDEL-AZIZ, Mohamed. **Mechanical properties of corn husk fiber reinforced polymer composites.** *Polymer Composites*, v. 34, n. 5, p. 825–831, 2013. Acesso em: 20 jun. 2025.

BARBOSA, Rennan Filipe Santos; SILVA, João Paulo Ribeiro; SILVA, Luana Araújo; SOUSA, Gabriel Costa. **Espumas poliuretanas: fundamentação, sustentabilidade e inovações tecnológicas.** São Paulo: Artliber Editora, [20--?]. Disponível em: <https://artliber.com.br/amostra/espumas.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2025.

BARIA, Mayur; TATED, Rohan; TIWARI, Ankit; JAIN, Abhinav. **Experimental investigation of the wear behavior of natural fiber reinforced composites.** *Materials Today: Proceedings*, v. 3, n. 10, p. 3891–3897, 2016. Acesso em: 20 jun. 2025.

BLEDZKI, Andrzej Krzysztof; GASSAN, Jürgen. **Composites reinforced with cellulose based fibres.** *Progress in Polymer Science*, Oxford, v. 24, p. 221–274, 1999.

BRITO, George Franklin; AGRAWAL, Pankaj; ARAÚJO, Edson Manoel; MÉLO, Tereza J. A. **Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes.** *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 127–139, 2011. Disponível em: <http://www.dema.ufcg.edu.br/revista>. Acesso em: 15 jun. 2025.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Acesso em: 22 jul. 2024.

CHEN, Yi-Hung; WU, Chia-Hao; CHEN, Yu-Cheng. **Optimized condition for eco-friendly wood composites manufactured from castor oil-based polyurethane.** *Construction and Building Materials*, v. 306, p. 124789, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124789>. Acesso em: 20 jun. 2025.

COSTA, Gabriela; SILVA, Arthur; OLIVEIRA, Mariana; SOUSA, Renan. **Aproveitamento de agroresíduos: caracterização físico-química e provável potencial energético.** [S. l.]: [s. n.], 2020. Acesso em: 19 jul. 2025.

FLANDEZ, Jorge; ANDRÉS, Alejandro; SEPÚLVEDA, Felipe; CÁCERES, Cristian. **Management of corn stalk waste as reinforcement for polypropylene injection moulded composites.** *BioResources*, v. 7, n. 2, p. 1836–1849, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.7.2.1836-1849>. Acesso em: 20 jun. 2025.

FONSECA, Ana Gabriela Pereira de. **Estudo do comportamento mecânico de compósitos de poliuretano com reforço de fibras naturais.** 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2025. Acesso em: 30 jun. 2025.

FOULY, Ahmed; IBRAHIM, Mohamed; ISMAIL, Mohamed; SAAD, Hani. **Evaluation of mechanical and tribological properties of corn cob-reinforced epoxy-based composites: theoretical and experimental study.** *Polymers*, v. 13, n. 24, p. 4407, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13244407>. Acesso em: 5 mar. 2025.

GONÇALVES, Vanderlei de Oliveira; OSSES, Marcelo; PARDINI, Luiz Claudio. **New jig adapted for compression fatigue tests on composite materials.** *Journal of Composite Materials*, v. 57, n. 2, jan. 2023. Acesso em : 21 jun 2025.

GUO, Yongsheng; LI, Jie; LI, Yuanyuan; ZHANG, Wenjing; WANG, Xuefeng. **A mechanically robust superhydrophobic conductive coating based on aminopropyltriethoxysilane and fluorosilane modified carbon nanotubes.** *Materials Research Express*, v. 11, n. 6, p. 065504, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/add4cd>. Acesso em: 21 jun. 2025.

HAGE JUNIOR, Eduardo. **Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros.** *Polímeros*, v. 8, n. 2, p. 6–9, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14281998000200003>. Acesso em: 15 jun. 2025.

JIANG, Shiyu; LI, Huanyu; WANG, Xiaoxiao; ZHANG, Xinyu; LIU, Yujie. **Biobased epoxy composites reinforced with acetylated corn straw.** *ACS Omega*, v. 8, n. 14, p. 12644–12652, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06947>. Acesso em: 15 jun. 2025.

LENHANI, Gabriela Cristina; FERREIRA, Lucas; LIMA, Rafael; OLIVEIRA, Tiago. **Application of corn fibers from harvest residues in biocomposite films.** *Journal of Polymers and the Environment*, v. 29, n. 9, p. 2813–2824, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02078-6>. Acesso em: 5 jun. 2025.

LEVY NETO, Francisco; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018. Acesso em: 22 jul. 2024.

LUO, Zhiwen; LI, Qing; WANG, Xiaoli; WU, Zhiqiang. **Comparison of performances of corn fiber plastic composites made from different parts of corn stalk.** *Industrial Crops and Products*, v. 95, p. 521–527, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.005>. Acesso em: 5 jun. 2025.

MENEZES, Pradeep L.; RAHMAN, Mohammad M.; SELVADURAI, Andem; STACHOWIAK, Gwidon W. **Tribology for scientists and engineers: from basics to advanced concepts.** New York: Springer, 2013. Acesso em: 5 jun. 2025.

MIRIȚOIU, Cornelia Mariana; RĂDOI, Ana Ioana. **Mechanical properties for composites with dammar resin reinforced with crushed corn cob.** *BioResources*, v. 19, n. 1, p. 1757–1776, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.1757-1776>. Acesso em: 5 jun. 2025.

MOTHÉ, Carolina Gomes; ARAUJO, Cláudia Regina de. **Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de Curauá.** *Polímeros*, v. 14, n. 4, p. 274–278, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000400014>. Acesso em: 5 jun. 2025.

NAPIORKOWSKI, Jan; LIGIER, Karolina. **Investigation of wear resistance of polyurethanes in abrasive soil mass.** *AIP Conference Proceedings*, v. 1946, p. 020010-1–020010-5, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.5030314>. Acesso em: 5 jun. 2025.

NDEKE, Vincent; TEMBO, Loveness. **Genetic analysis of tolerance to aluminum toxicity in maize (Zea mays).** Zâmbia, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/339828406>. DOI: 10.13140/RG.2.2.25640.93449. Acesso em: 21 jun. 2025.

PALANISAMY, Subramanian et al. **The prospects of natural fiber composites: a brief review.** *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, v. 7, n. 4, p. 496–506, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.01.003>. Acesso em: 5 jun. 2025.

PENAGOS, José Jimmy; NINS, Bárbara Diniz; COSTA, Rafael Nunes; et al. **Desgaste abrasivo de borrachas de correias transportadoras de minério de ferro: aplicação do ensaio roda de borracha para ranquear produtos disponíveis no mercado.** *Anais do Congresso Anual da ABM*, v. 77, p. 3251–3262, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/2594-5327-41401>. Acesso em: 21 jul. 2025.

REVELO, Carlos Fernando; PÉREZ, Diana Carolina; GARCÍA, Jorge Enrique; et al. **Composite materials made of waste tires and polyurethane resin: a case study of flexible tiles successfully applied in industry.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, p. e00681, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00681>. Acesso em: 24 jul. 2024.

SANTOS, José Carlos dos; SILVA, Maria Laura Nunes da; SOUZA, José Carlos de; et al. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de materiais revestidos por HVOF.** *Journal of Nanomaterials*, v. 2017, p. 1–9, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/4319389>. Acesso em: 21 jun. 2025.

SILVA, Isabela Leão Amaral da. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ. Disponível em: [https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-de-Doutorado\\_Isabela-Leao.pdf](https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-de-Doutorado_Isabela-Leao.pdf). Acesso em: 21 jul. 2025.

SILVA, João Carlos da; OLIVEIRA, Maria Fernanda de; SOUZA, Pedro Henrique. **Influência do tratamento químico na fibra de coco**. Contagem: Universidade Federal de Minas Gerais, 2025.

VILARIM, Rodrigo Vieira. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Área Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Acesso em: 5 jun. 2025.

ZUM GAHR, Klaus-Henning. **Microstructure and wear of materials**. v. 10, p. 80–131. Elsevier, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(08\)70722-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(08)70722-3). Acesso em: 22 jul. 2024.