



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITARIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ROCHELLE MORAES MATOS

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO TERMOPLÁSTICO DE  
AMIDO DE MILHO COM FIBRAS DE SISAL CURTAS**

ANANINDEUA-PA

2023

ROCHELLE MORAES MATOS

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO TERMOPLÁSTICO DE  
AMIDO DE MILHO COM FIBRAS DE SISAL CURTAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, Campus de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinicius da Silva  
Paula

Coorientador: Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa  
Cunha

ANANINDEUA-PA

2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M425o Matos, Rochelle.  
Obtenção e caracterização de compósito termoplástico de amido de milho com fibras de sisal curtas / Rochelle Matos. — 2023.  
72 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula  
Coorientador(a): Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2023.

1. Fibras de sisal curtas. 2. Amido de milho. 3. Compósito polimérico. 4. Amido termoplástico. I. Título.

CDD 541.2254

---

ROCHELLE MORAES MATOS

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO TERMOPLÁSTICO DE  
AMIDO DE MILHO COM FIBRAS DE SISAL CURTAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, pela Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

DATA DA AVALIAÇÃO: 12/12/2023

CONCEITO: Excelente

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula

(FEMat/ CANAN/UFPA – Orientador)

---

Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha

(FEMat/ CANAN/UFPA – Coorientador)

---

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva  
(FEMat/ CANAN/UFPA – Examinador interno)

---

Prof. Dra. Verônica Scarpini Candido  
(FEMat/ CANAN/UFPA – Examinador interno)

*Dedico este trabalho a minha mãe que foi  
o meu sustento, minha força e a maior  
incentivadora dos meus sonhos.*

## AGRADECIMENTOS

Para chegar até aqui, tive que passar por várias etapas e em cada uma delas tive pessoas que foram cruciais para a realização deste sonho. Então, neste ciclo concluído, agradeço primeiramente a Deus por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo de toda a minha vida acadêmica, permitindo que os meus objetivos fossem alcançados e que o sonho de me tornar engenheira fosse realizado.

Agradeço a minha mãe e ao meu pai por todo amor e apoio que me deram ao longo da vida, vocês são meu maior exemplo de força e determinação. Todo incentivo e dedicação valeram a pena. Amo vocês mais que tudo nessa vida.

A minha irmã e aos meus amados sobrinhos Henrico e Eduarda que com o olhar de admiração me estimularam a continuar, para mim seria tudo incompleto se não existisse vocês.

Agradeço em especial e com todo amor a Anny Débora que desde que entrou na minha vida sempre fez de tudo por mim e compartilhou comigo inúmeros momentos de ansiedade e preocupação, você e a Liz são a minha paz e felicidade.

Ao Prof. Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula pela orientação, apoio, por acreditar em mim e ter me incentivado a fazer mais do que eu acreditava que seria capaz. Sempre serei grata por ter me apresentado o mundo da ciência e por ter me concedido uma bolsa de Iniciação Científica. Muito obrigada.

Agradeço aos meus tios e tias por sempre me apoiarem e incentivarem e em especial a minha tia Carmen e tio vilas por me acolherem como uma filha quando eu precisei e a minha tia Rosi por sempre me fazer sorrir e me apoiar.

Meu muito obrigada a minha professora Ariana Quaresma que sempre acreditou em mim e foi essencial para o meu desenvolvimento como estudante.

Agradeço aos amigos que fiz durante a minha trajetória, que sempre me fazem feliz e que compreenderam a minha ausência no período da realização deste trabalho. Muito obrigada Carla, Rayssa, Thais, Pedro e Erick vocês são os melhores amigos que eu poderia ter.

Agradeço as minhas escreventes preferidas Andressa, Bruna e Raphaela por sempre me ajudarem no cartório quando eu tinha apresentação na faculdade, durante o período online. A ajuda de vocês foi fundamental para que eu continuasse na faculdade.

Agradeço aos amigos que fiz durante essa graduação Jennifer, Michele, Douglas, Valéria, Andreza, Maria, Luiz, Andrio e João. Obrigada pelos momentos felizes e conversas profundas, vocês tornaram essa graduação mais leve.

Agradeço aos amigos que fiz no laboratório de polímeros Bianca, Gilberto e Heloise. Obrigada pelo apoio demonstrado.

E em especial agradeço a Taiana por toda contribuição e apoio que me deu ao longo da confecção deste e de outros trabalhos, suas dicas foram fundamentais.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), por todo suporte ao longo da graduação e ao corpo docente da Faculdade de Engenharia de Materiais (FEMAT) por todo ensinamento compartilhado.

A todos que vibraram comigo a cada etapa vencida, meus sinceros agradecimentos.

“Nenhuma engenharia constrói caráter, mas com caráter se faz os melhores engenheiros”.

(Jordan Lucas)

## RESUMO

Devido a crescente preocupação que os polímeros convencionais têm causado ao meio ambiente, a busca por alternativas de substituição por materiais sustentáveis é uma das principais preocupações da sociedade atual. Uma alternativa promissora são os materiais à base de amido, que podem trazer bons resultados devido à sua capacidade de biodegradação. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo a obtenção e caracterização de compósitos biodegradáveis feitos com fibras de sisal curtas que passaram por tratamento químico e branqueamento. Os filmes de amido termoplástico foram obtidos utilizando a técnica de evaporação por solvente e avaliados nas proporções de 5% e 10% de fibras de sisal em relação ao amido. Foram realizadas análises qualitativas, como análise visual, e caracterizações, como análise termogravimétrica (TGA) para avaliar a estabilidade térmica das amostras, espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) para avaliar os grupos funcionais presentes nos filmes, espessura e propriedades mecânicas para avaliar o módulo de elasticidade, tensão de ruptura e deformação. Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência das fibras de sisal tratadas nas propriedades dos filmes de amido termoplástico. No aspecto visual, todos os filmes obtidos apresentaram transparência óptica, na espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier é possível identificar as mudanças nas bandas de absorção devido ao tratamento. Observou-se melhorias nas propriedades mecânicas dos filmes, como aumento da resistência à tração e rigidez. Além disso, a análise termogravimétrica mostrou que os filmes com fibras de sisal apresentaram maior estabilidade térmica em comparação com o filme sem fibras de sisal. Dessa forma, ao avaliar todos os resultados, os filmes com 5% de fibras de sisal curtas apresentaram resultados indicados para aplicações quando comparados com as amostras restantes.

**Palavras-chave:** fibras de sisal curtas; amido de milho; compósito polimérico; amido termoplástico.

## ABSTRACT

Due to the growing concern that conventional polymers have caused to the environment, the search for alternatives to replace them with sustainable materials is one of the main concerns of today's society. A promising alternative is starch-based materials, which can bring good results due to their biodegradation capacity. In this context, the present study aims to obtain and characterize biodegradable composites made with short sisal fibers that have undergone chemical treatment and bleaching. Thermoplastic starch films were obtained using the solvent evaporation technique and evaluated in proportions of 5% and 10% of sisal fibers in relation to starch. Qualitative analyzes were carried out, such as visual analysis, and characterizations, such as thermogravimetric analysis (TGA) to evaluate the thermal stability of the samples, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) to evaluate the functional groups present in the films, thickness and mechanical properties to evaluate the modulus of elasticity, rupture stress and deformation. The results obtained made it possible to evaluate the influence of treated sisal fibers on the properties of thermoplastic starch films. In the visual aspect, all the films obtained showed optical transparency, in infrared spectroscopy with Fourier transform it is possible to identify the changes in the absorption bands due to the treatment. Improvements in the mechanical properties of the films were observed, such as increased tensile strength and stiffness. Furthermore, thermogravimetric analysis showed that films with sisal fibers presented greater thermal stability compared to the film without sisal fibers. Therefore, when evaluating all the results, the films with 5% short sisal fibers presented results suitable for applications when compared with the remaining samples.

**Keywords:** short sisal fibers; maize starch; polymer composite; thermoplastic starch.

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1- Fontes de origem dos polímeros biodegradáveis .....	20
Figura 2- Arquitetura molecular dos grânulos de amido .....	22
Figura 3- Modelo de Clauster da amilopectina .....	23
Figura 4- Estrutura da amilose e amilopectina .....	25
Figura 5- Grânulos de amido padrão .....	26
Figura 6- Estrutura do glicerol .....	28
Figura 7- Tipos de compósitos: (a) partícula, (b) fibra, (c) plaqueta.....	29
Figura 8- Classificação geral das fibras.....	31
Figura 9- Classificação de algumas fibras vegetais.....	32
Figura 10- Estrutura da fibra vegetal.....	33
Figura 11- Estrutura da celulose.....	35
Figura 12- Interação entre os três principais componentes das fibras vegetais.....	36
Figura 13- Estrutura da hemicelulose.....	37
Figura 14- Estrutura hipotética da lignina.....	38
Figura 15- Mapa do Território do sisal no estado da Bahia .....	39
Figura 16- Exportação brasileira de sisal .....	39
Figura 17- (a) planta agave sisalana, (b) fibra de sisal .....	40
Figura 18- Diagrama esquemático do tratamento alcalino.....	45
Figura 19- Diagrama esquemático do branqueamento .....	46
Figura 20- Diagrama esquemático da produção dos filmes .....	46
Figura 21- Ensaio de tração do Amido termoplástico (TPS).....	49
Figura 22- Aspecto visual dos filmes: a) T, b) C-1 e c) C-2. ....	50
Figura 23- (esquerda) curvas TGA dos filmes: (a)TPS, (b) 5% de fibras, (c) 10% de fibras e (direita) curvas DTG dos filmes: (a)TPS, (b) 5% de fibras, (c) 10% de fibras. ....	52
Figura 24- FTIR das fibras: a) naturais e b) com tratamento alcalino e branqueamento. ....	53
Figura 25- FTIR dos filmes: a) TPS, b) 5% de fibras e c) 10% de fibras. ....	55
Figura 26- espessura média dos filmes obtidos dos corpos de prova do ensaio de tração .....	57
Figura 27- Resistência à tensão de ruptura do amido termoplástico (T), compósito com 5% de fibras (C-1) e com 10% de fibras (C-3). Médias seguidas por letras iguais não apresentaram diferença estatística significativa.....	58

Figura 28- Módulo de elasticidade do amido termoplástico (T), compósito com 5% de fibras (C-1) e com 10% de fibras (C-3). Médias seguidas por letras iguais não apresentaram diferença estatística significativa.....	59
Figura 29- Deformação do amido termoplástico (T), compósito com 5% de fibras (C-1) e com 10% de fibras (C-3). Médias seguidas por letras iguais não apresentaram diferença estatística significativa. ....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparação entre a composição química e propriedades dos amidos .....	23
Tabela 2- Composição de celulose em algumas fibras vegetais.....	34
Tabela 3- Composição de hemicelulose em algumas fibras vegetais.....	36
Tabela 4- Composição de lignina em algumas fibras vegetais.....	37

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Resultados obtidos a partir da análise visual dos filmes .....	50
Quadro 2- Relação entre bandas e grupos funcionais das fibras sem tratamento.....	53
Quadro 3- Relação entre bandas e grupos funcionais das fibras com tratamento. ....	53
Quadro 4- Relação entre bandas e grupos funcionais do amido termoplástico e dos filmes com 5% e 10% de fibras tratadas. ....	55
Quadro 5- Relação entre bandas e grupos funcionais dos filmes com 5% de fibras tratadas. .	55
Quadro 6- Relação entre bandas e grupos funcionais dos filmes com 10% de fibras tratadas.	56

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	18
1.1.2 Objetivo geral .....	18
1.1.3 Objetivos específicos .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
<b>2.1 Polímeros Biodegradáveis</b> .....	19
2.1.1 Amido .....	21
2.1.2 Amilose e amilopectina .....	23
<b>2.2 Amido de milho</b> .....	25
2.2.1 Amido termoplástico .....	26
2.2.1.1 Plastificante .....	27
2.2.1.2 Glicerol .....	28
<b>2.2 Compósitos Poliméricos</b> .....	29
2.3.1 Fibras vegetais .....	30
2.3.1.2 Principais componentes químicos das fibras vegetais .....	34
2.3.1.3 Celulose .....	34
2.3.1.4 Hemicelulose .....	35
2.3.1.5 Lignina .....	37
2.3.2 Fibras de sisal .....	38
2.3.3 Tratamento das fibras .....	41
2.3.5 Processo alcalino .....	42
2.3.6 Branqueamento .....	43
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	44
<b>3.1 Materiais</b> .....	44
<b>3.2 Metodologia</b> .....	44
Processamento das fibras de sisal .....	44

3.2.1 Tratamento alcalino .....	45
3.2.2 Branqueamento .....	45
3.2.3 Obtenção do amido termoplástico .....	46
<b>3.3 Caracterização do Compósito de Amido Termoplástico .....</b>	<b>47</b>
3.3.1 Aspecto visual .....	47
3.3.2 Testes de análise termogravimétrica (TGA).....	47
3.3.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	47
3.3.4 Confeção dos corpos de prova .....	48
3.3.5 Espessura .....	48
3.3.6 Teste mecânico de tração.....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1 Aspecto visual.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2 Testes de análise termogravimétrica (TGA) .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....</b>	<b>52</b>
<b>4.4 Espessura.....</b>	<b>56</b>
<b>4.4 Teste mecânico de tração .....</b>	<b>58</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>6 SUGESTÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os polímeros convencionais são criados a partir de elementos não renováveis e causam danos ambientais significativos, se tornando um dos maiores problemas da humanidade. Os plásticos à base de petróleo não são biodegradáveis mesmo depois de cem anos e por apresentarem propriedades desejadas nos setores industriais são amplamente usados no mundo todo, o que causa uma grande preocupação com as condições ambientais e ecológicas em relação à deposição desenfreadas desses materiais plásticos que recebem grandes investimentos na busca por alternativas de substituição por materiais ecológicos (Esmaeili; Pircheraghi; Bagheri, 2017; De Almeida Nascimento *et al.*, 2021; Estrada-Monje *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2021).

A partir desta problemática, muito tem sido discutido sobre as principais políticas de gestão de resíduos de materiais utilizados na indústria em geral, porém, a maior reflexão atual é sobre o desenvolvimento sustentável. A necessidade de viabilizar a continuidade do desenvolvimento, racionalizar o consumo, optar por soluções e produtos sustentáveis em todo o seu ciclo de vida e buscar o equilíbrio entre o homem e a natureza passaram a ser considerações fundamentais no desenvolvimento de produtos (Lemos; Martins, 2014; De Almeida Nascimento *et al.*, 2021).

Há uma busca crescente pelo desenvolvimento de embalagens utilizando polímeros naturais biodegradáveis com o objetivo de reduzir os impactos causados ao meio ambiente pelos plásticos, principalmente derivados de petróleo (De Almeida Nascimento *et al.*, 2021; Hadimani *et al.*, 2023).

Os artefatos plásticos convencionais produzidos a partir de polímeros sintéticos são inertes ao ataque imediato de microrganismos. Embora esta propriedade faz com que esses materiais apresentem um tempo longo de vida útil, por outro lado, ocasionam sérios problemas ambientais após o seu descarte, devido ao grande tempo necessário para a sua degradação (Beltrán-sanahuja *et al.*, 2021). A adição de um substrato biodegradável a uma matriz polimérica sintética induz a digestão de tal aditivo por microrganismos, o que favorece o esfarelamento da matriz polimérica sintética (Souza; Andrade, 1999).

O amido é um dos polímeros naturais mais abundantes na natureza devido ao seu baixo custo, abundância, biodegradabilidade, biocompatibilidade e sustentabilidade (Cui *et al.*, 2021). Portanto, há razões significativas para considerar o amido, como uma alternativa de um material novo e alternativo em comparação aos polímeros à base de petróleo. (Falua *et al.*, 2022)

No entanto, as aplicações dos polímeros a base de amido são limitadas em larga escala por apresentarem baixa processabilidade, propriedades mecânicas fracas e hidrofobicidade severa. Por esse motivo, diferentes estratégias têm sido exploradas, incluindo a utilização de um material de reforço, como fibras adicionadas ao amido (Pereira *et al.*, 2021; Pinto; César; Fernandes; 2022).

Os materiais compósitos oferecem uma variedade de vantagens em comparação com materiais homogêneos, incluindo a capacidade de exercer um controle considerável sobre as propriedades dos materiais, melhorando a fase matriz e a fase reforço (Pereira *et al.*, 2021; Pinto; César; Fernandes; 2022; Litaiff, 2023).

Atualmente, intensas pesquisas estão sendo realizadas para o desenvolvimento desta nova classe de compósitos verdes (biocompósitos) combinando fibras naturais com polímeros biodegradáveis. O maior destaque destes biocompósitos é o caráter ecologicamente correto, totalmente degradáveis e sustentáveis (Lemos; Martins, 2014).

A abundante disponibilidade de cargas e fibras naturais em quase todas as plantas, a sua flexibilidade durante o processamento, a sua biodegradabilidade, a baixa densidade relativa, a boa resistência e rigidez, e os seus baixos custos e alto desempenho mecânico das matérias-primas são algumas vantagens consideráveis dos compósitos de fibras naturais (Abera Betelie *et al.*, 2019; Alrefai *et al.*, 2022).

Entre as fibras naturais, as fibras de sisal têm produção de 97% no estado da Bahia e se destaca em termos de qualidade por apresentar uma maior resistência mecânica e um dos maiores módulos de elasticidade, tornando-a atraente para ser utilizada como um material de reforço (Araújo *et al.*, 2009; Lopes *et al.*, 2010; Campos *et al.*, 2012; Pinto; César; Fernandes; 2022).

Contudo, existem outras características importantes relacionadas as propriedades de compósitos reforçados por fibras dentre os quais a adesão entre a fibra e a matriz, a fração volumétrica e a orientação das fibras, estão entre as mais significativas. O desempenho de um compósito depende fortemente da qualidade da interface fibra/matriz, uma vez que a transferência de tensões mecânicas da matriz polimérica para a fibra que atua como elemento de reforço ocorre por meio da interface. A adesão fibra/matriz, que pode ser fomentada por compatibilização química é, portanto, fundamental para obtenção de compósitos de alta qualidade. Desta forma, para melhorar o desempenho de compósitos reforçados por fibras vegetais, é comum a realização de tratamentos superficiais nas fibras (Araújo *et al.*, 2009).

Em vista disso, o desenvolvimento deste trabalho se concentra na produção de filmes biodegradáveis reforçados com fibras de sisal e análise dos efeitos da modificação química superficial da fibra (tratamento alcalino).

## **1.1 OBJETIVOS**

### 1.1.2 Objetivo geral

O presente estudo objetiva a obtenção e caracterização de compósitos biodegradáveis feitos a partir do amido de milho e fibras de sisal que passaram por tratamento alcalino e branqueamento.

### 1.1.3 Objetivos específicos

- Obter fibras de sisal curtas após o tratamento alcalino e branqueamento
- Obter filmes de compósitos formados por amido de milho termoplastificado e fibras de sisal curtas
- Obter filmes de amido termoplástico e filmes compósitos utilizando 28% de glicerol em relação ao amido de milho
- Obter filmes compósitos nas quantidades de 0, 5 e 10% de fibras de sisal curtas em relação ao amido de milho
- Estudar a influência da adição das fibras curtas de sisal na matriz polimérica sobre as propriedades térmicas e mecânicas dos filmes dos compósitos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Polímeros Biodegradáveis

Os polímeros biodegradáveis são definidos como polímeros que se degradam devido a ação de microrganismos como bactérias, fungos e algas. Essa manipulação resulta na formação de fragmentos de baixa massa molecular, os quais são utilizados como fonte de carbono ou nitrogênio para esses microrganismos (Carmona, 2011; Šolek-Tryznowska; Kaluša, 2021).

Segundo a norma ASTM D-6400, os materiais biodegradáveis sofrem degradação em dióxido de carbono, metano, água, compostos inorgânicos ou biomassa. Esse processo é predominantemente impulsionado pela ação enzimática de microrganismos e pode ser avaliado por meio de testes padrão realizados ao longo de um período específico de tempo (Carmona, 2011).

O desenvolvimento da atual geração de polímeros biodegradáveis está com foco em aplicações específicas, que beneficiam sua vida útil curta. Um exemplo disso são os filmes e sacos de lixo biodegradáveis para jardim, que podem ser usados para armazenar materiais compostáveis, eliminando assim a necessidade de remoção desses materiais dos sacos (Callister Junior; Rethwisch, 2016; Rop *et al.*, 2019; Estrada-Monje *et al.*, 2021).

Se todos os pratos, copos, embalagens, e assim por diante, forem feitos de materiais biodegradáveis, eles poderão ser misturados e triturados juntamente com os resíduos de alimentos e compostados em operações de grande escala. Isso se baseia na prática de realizar uma triagem prévia de materiais, onde os resíduos orgânicos são triturados, peneirados e duradouros para a compostagem. Essa abordagem permite que os materiais biodegradáveis sejam processados de forma eficiente e sustentável, contribuindo para a redução do volume de resíduos e a produção de composto orgânico que pode ser utilizado como fertilizante na agricultura (Callister Junior; Rethwisch, 2016; Syafri *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2022).

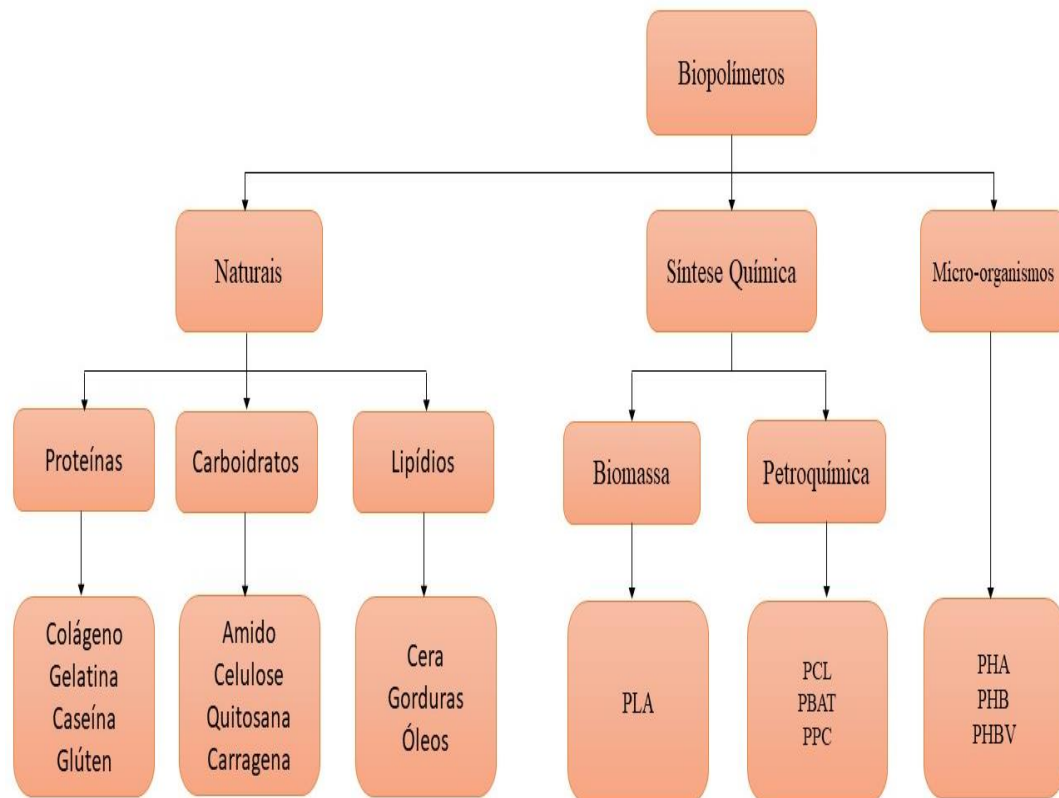
Os polímeros biodegradáveis são também conhecidos como polímeros naturais por serem produzidos por plantas, animais e microrganismos. Esses polímeros são considerados biodegradáveis devido à estrutura química formada principalmente por átomos de oxigênio e nitrogênio, que são facilmente reconhecidos e decompostos pelo meio ambiente (Mohd Nizam *et al.*, 2021). Os biopolímeros se tornaram uma alternativa atraente para a produção de plásticos sustentáveis e ambientalmente seguros (Rocha, 2019; Hadimani *et al.*, 2023).

Contudo, ao comparar com os plásticos convencionais, os polímeros biodegradáveis possuem baixas propriedades mecânicas. Em vista disso, diferentes estratégias têm sido

exploradas para melhorar essas propriedades. Uma dessas estratégias é a alteração da estrutura química por meio da adição de aditivos, como plastificantes, fibras e ácidos cítricos. Esses aditivos melhoram a resistência, a flexibilidade e outras propriedades mecânicas dos polímeros biodegradáveis, tornando-os mais adequados para diversas aplicações (Othan, 2014; Esmaili; Pircheraghi; Bagheri, 2017; Abdillah; Charles, 2021).

Dentre os diversos biopolímeros pesquisados os polissacarídeos e as proteínas despertam interesse no meio acadêmico e na indústria, por possuírem propriedades únicas e versáteis, o que os torna alvos de estudo e aplicação em diversas áreas (Carmona, 2011; Oliveira, 2015). As fontes de origem dos polímeros biodegradáveis são apresentadas no fluxograma da figura 1.

Figura 1- Fontes de origem dos polímeros biodegradáveis



Fonte: Adaptado de Sanchez-Salvador *et al.*, (2021).

Entre os biopolímeros, os amidos e seus derivados são uma alternativa atraente e são os mais estudados para aplicações em embalagens de alimentos e para reduzir os resíduos plásticos que levam anos para se degradarem no meio ambiente (Nordin *et al.*, 2023). Os amidos são considerados materiais comestíveis e seguros, o que significa que podem entrar em contato com os alimentos sem causar danos à saúde. Além disso, esses materiais são completamente degradáveis, o que significa que se decompõem naturalmente no meio ambiente, reduzindo o

impacto ambiental em comparação com os plásticos convencionais (Sanchez-Salvador *et al.*, 2021; Adewale; Yancheshmeh; Lam, 2022).

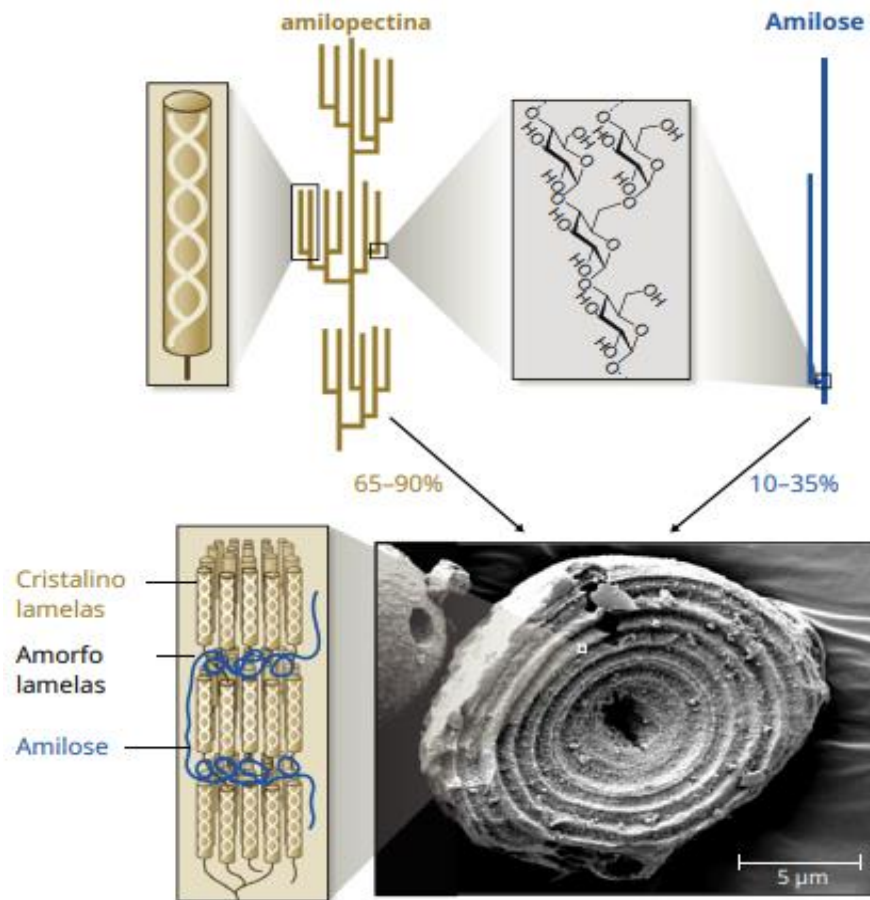
### 2.1.1 Amido

O amido é um polissacarídeo natural e biodegradável que pode ser encontrado em diferentes formas de grânulos que variam de tamanho e formato, sendo constituído por um grande número de unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas (Cao *et al.*, 2022). A maioria dos amidos naturais são semicristalinos e podem ser encontrado em culturas como leguminosas, milho, batata, arroz e mandioca. A fonte do amido influencia em suas propriedades, ao ser extraído de plantas é denominado amido nativo, enquanto o amido que sofreu uma transformação (biológica, química ou física) é denominado amido modificado (Mendes, 2017; Adewale; Yancheshmeh; Lam, 2022).

Em sua forma nativa o amido é insolúvel em água fria devido às fortes ligações que mantêm suas cadeias unidas. Porém, com o aumento da temperatura e plastificantes, as partículas incham até que uma transformação irreversível seja induzida, rompendo as ligações de hidrogênio entre as moléculas de amilose e amilopectina. À medida que a estrutura cristalina é rompida e a integridade das partículas é perdida, a água combina-se com os grupos hidroxila das moléculas, resultando em perda de birrefringência, aumento da viscosidade, lixiviação de amilose, resultando na fusão do cristal e na solubilização do amido (Ramirez, 2011).

Suas composições consistem principalmente em duas macromoléculas glicosídicas: amilose e amilopectina. A amilose tem peso molecular inferior ao da amilopectina; entretanto, o alto peso relativo da amilopectina reduz a mobilidade das cadeias poliméricas, resultando em alta viscosidade, enquanto a linear estrutura da amilose demonstra comportamento mais semelhante ao do convencional polímeros sintéticos (Furtado *et al.*, 2020; Mohammed *et al.*, 2021; Adewale; Yancheshmeh; Lam, 2022). Isso também pode ser observado através da arquitetura molecular dos grânulos de amido representados na figura 2.

Figura 2- Arquitetura molecular dos grânulos de amido



Fonte: Seung, (2020).

Dependendo do recurso do amido, a cristalinidade do amido é de cerca de 20–45%. As cadeias curtas ramificadas da amilopectina são principalmente responsáveis pela recuperação cristalina e aparecem como hélices duplas com comprimento de cerca de 5 nm. Nas áreas cristalinas, a amilopectina os segmentos são todos paralelos ao eixo da grande hélice. Como as proteínas e os polissacarídeos são os componentes primários dos polímeros naturais, as relações estrutura-propriedade nestes materiais são determinadas por suas interações com a água e entre si em um ambiente aquático (Mohammed *et al.*, 2021). A tabela 1 apresenta a composição química entre as propriedades dos amidos.

Tabela 1- Comparação entre a composição química e propriedades dos amidos

Parâmetro	Amido de trigo	Amido de milho	Amido de arroz	Fécula de batata
Amilose (%)	16,0-30,5	20,0-28	20-28	25-31
Amilopectina(%)	68,5-75	75-83	65-85	76-83
Cinzas(%)	0,20-0,29	0,32-0,62	0,17-0,19	15,95-16,05
Proteínas (%)	0,40-0,46	0,38-7,7	0,33-0,38	4,26-4,82
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	1.356-1.4029	1.282	0,763
Teor de umidade(%)	10,65-13	10h45-10h82	3,60	15,98±0,36

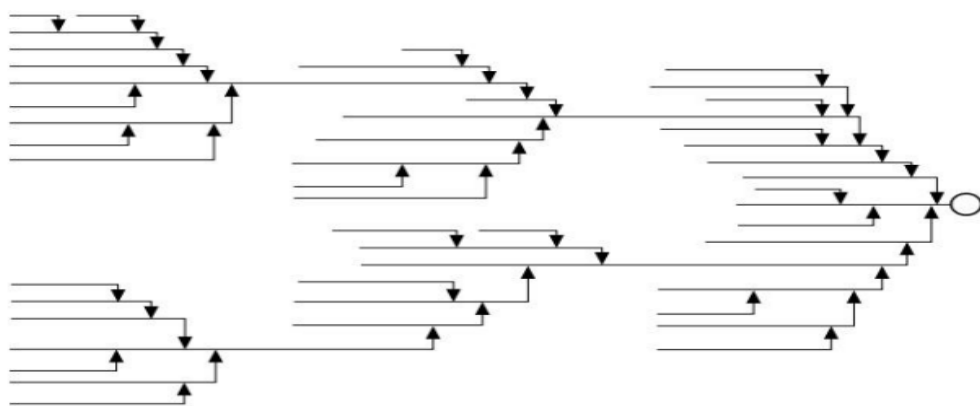
Fonte: Adaptado de Mohammed et al., (2021).

### 2.1.2 Amilose e amilopectina

O amido é composto de resíduos de anidroglicose e é um polímero de carboidrato existente naturalmente. Os amidos compreendem amilase, um polímero de cadeia linear e amilopectina, que é um polímero de glicose com estrutura de cadeia ramificada (Oliveira, 2017).

Os grânulos de amido possuem regiões cristalinas e amorfas que são formadas por rearranjos moleculares dessas duas frações de amido. A zona cristalina é mais compacta e atribuída à formação de duplas hélices entre as cadeias de amilopectina designadas como A, B e C (Seung, 2020). A cadeia linear da amilopectina é representada através do modelo de clauster e pode ser observada na figura 3.

Figura 3- Modelo de Clauster da amilopectina



Fonte: (Falua *et al.*, 2022).

As cadeias de amido apresentam o final redutor conectado à uma cadeia B ou C por intermédio de ligações  $\alpha$ -(1→6) e não são ramificadas. As cadeias B são aquelas conectadas à uma cadeia C ou à uma outra cadeia B por meio de uma ligação  $\alpha$ -(1→6) e possuem uma ou mais cadeias A ou B ligadas a elas por meio de ligações  $\alpha$ -(1→6).

Cada uma das cadeias das moléculas de amilopectina tem a mesma conformação de  $\alpha$ -hélice direita encontrada nas moléculas de amilose; no entanto, as cadeias B e C têm monômeros de glicose conectados por ligações  $\alpha$ -D-(1 $\rightarrow$ 4) e ligações  $\alpha$ -D-(1 $\rightarrow$ 6) nos pontos de ramificação (Parker; Ring, 2001; Donmez *et al.*, 2021; Medeiros; Niro, 2022).

Amilopectina é um componente do amido e é uma das maiores moléculas da natureza devido às suas substanciais unidades de glicose e características funcionais vitais. Um dos elementos essenciais na distribuição do comprimento da cadeia de amilopectina são as características do amido, que variam muito dependendo da fonte botânica (Falua *et al.*, 2022).

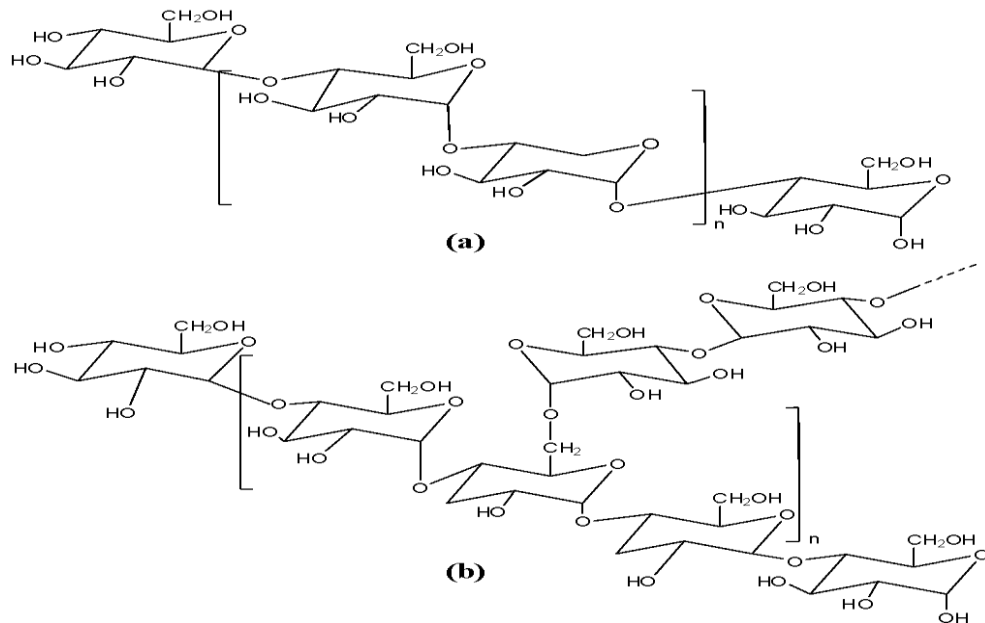
A amilopectina é formada por moléculas de D-glicose em ligações  $\alpha$ (1- 4), porém, diferentemente da amilose, é bastante ramificada devido a unidades de glicose em ligações  $\alpha$ (1-6) glicosídicas aproximadamente a cada 22 unidades de glicose (Adewale; Yancheshmeh; Lam, 2022). A proporção entre amilose e amilopectina é variável e depende da origem botânica do amido (Cunha, 2016). A estrutura ramificada da amilopectina permite que cadeias adjacentes formem duplas hélices que se agrupam em lamelas cristalinas, enquanto os pontos de ramificação residem em lamelas amorfas. Lamelas cristalinas e amorfas alternadas dão origem à matriz de grânulos de amido semicristalino (Falua *et al.*, 2022).

As cadeias de amilose se orientam paralelamente aproximando-se de forma sinérgica, devido à sua linearidade, mobilidade e grupos hidroxila. Essa aproximação forma ligações de hidrogênio e hidroxilas de polímeros adjacentes, reduzindo sua afinidade pela água e favorecendo a obtenção de filme resistente (Mendes, 2017).

Devido ao tamanho volumoso das cadeias de amilopectina ocorre a redução da mobilidade das cadeias e previne a aproximação dos polímeros de amilopectina que formam as ligações de hidrogênio. Como resultado, as soluções aquosas de amilopectina são translúcidas e mais resistentes a formação de géis (Mendes, 2017).

A amilose é um polímero linear composto por ligações glicosídicas, onde as unidades de D-glicose estão ligadas por ligações  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4), com menos de 1% de suas ramificações em  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6). A cristalinidade dos filmes de amido é atribuída principalmente à amilopectina e não à amilose. Apesar de ser linear, a amilose apresenta uma conformação que dificulta sua associação regular com outras cadeias (Medeiros, 2022). Na figura 4, é possível observar a estrutura da amilose e amilopectina.

Figura 4- Estrutura da amilose e amilopectina



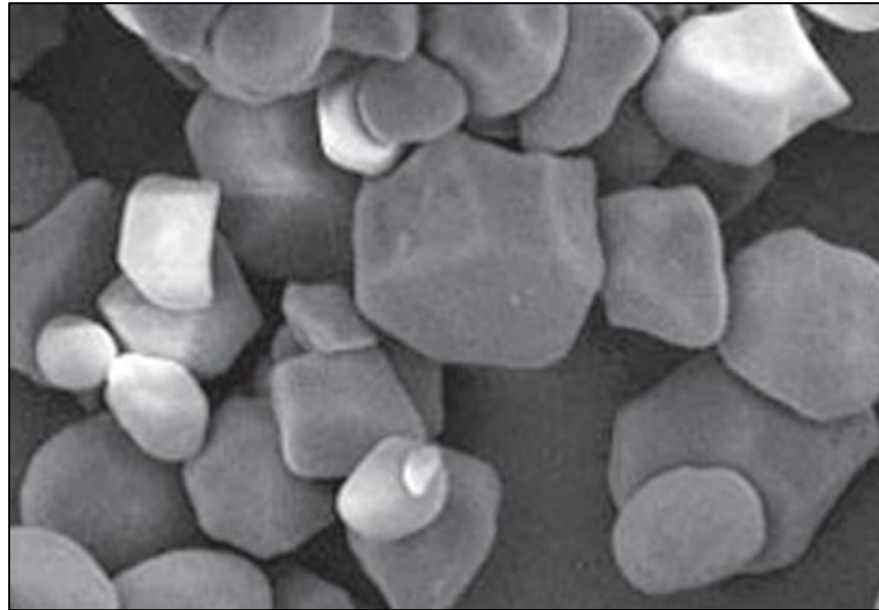
Fonte: Falua *et al.*, (2022)

## 2.2 Amido de milho

O amido de milho é um polissacarídeo que apresenta 25% de amilose e 75% de amilopectina na sua composição e apresenta diversas possibilidades de aplicações por apresentar propriedades favoráveis (Oliveira, 2017). O amido de milho não modificado é caracterizado por formar um gel consistente e possui ampla gama de utilizações, sendo responsável por cerca de 70-80% da energia calórica consumida mundialmente, possuindo um papel comercial importante (Weber *et al.*, 2009).

Para produtos que necessitam de armazenamento sob refrigeração, esse amido não é muito indicado devido à sinérese (exsudação de água), consequência do fenômeno de retrogradação. Nesses casos, é mais indicado o uso do amido de milho ceroso que apresenta maior estabilidade a baixas temperaturas, pelo fato de praticamente não possuir amilose. Os géis feitos com esse amido são fracos, altamente viscosos no cozimento, claros e coesivos (Parker; Ring, 2001). A morfologia dos grânulos de amido padrão podem ser observadas na figura 5.

Figura 5- Grânulos de amido padrão



Fonte: Weber et al., (2009)

### 2.2.1 Amido termoplástico

A termoplastificação dos grãos de amido ocorre ao ser submetido a altas temperaturas e campos de cisalhamento, na presença de plastificantes. Isso resulta na conversão do amido em um material homogêneo, denominado amido termoplástico (TPS) que é composto por regiões amorfas macias. Durante esse processo, a organização granular do amido é rompida, o que leva a modificações nas características morfológicas, na arquitetura cristalina e na estrutura química do amido nativo (Castillo *et al.*, 2019).

Durante a gelatinização, os divisores de amido absorvem água e sofrem um aumento de volume, resultando em uma estrutura gelatinosa. Em seguida, ocorre a fusão dos cruzamentos, onde as cadeias de amido se fundem e formam uma matriz contínua. Esse processo de destruição da estrutura granular é essencial para obter um material termoplástico a partir do amido (Alashek; Keshe; Alhassan, 2022).

A água é o principal fator responsável pela gelatinização do amido, atuando como um agente plastificante nos grãos de amido, reduzindo a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão dos cristais. Além disso, propriedades como inchamento e gelatinização são influenciadas pela estrutura molecular da amilopectina, composição do amido e arquitetura granular. A presença de amilose reduz o ponto de fusão das regiões cristalinas e a energia necessária para a gelatinização, resultando em temperaturas de gelatinização mais baixas. A

estrutura molecular da amilopectina, incluindo o comprimento da cadeia e a extensão de ramificações, também desempenha um papel importante nas propriedades de inchamento e gelatinização do amido (Denardin; Silva, 2009).

Quando os grânulos entram em contato com água fria, eles incham ligeiramente devido à absorção de água nas regiões amorfas. No entanto, esse processo é reversível após a secagem, ao serem submetidos ao aquecimento, os grânulos aumentam de volume irreversivelmente, resultando na gelatinização, que é a perda da organização estrutural e fusão dos cristais (Cyras *et al.*, 2008). A cristalização da amilose e recristalização da amilopectina ocorre após o processamento do amido. Essas interações moleculares que ocorrem após o resfriamento são chamadas de retrogradação (Mina; Joje, 2012).

#### 2.2.1.1 Plastificante

Plastificantes são aditivos adicionados a certos polímeros para melhorar as propriedades de processamento, aumentar a flexibilidade, alterar a viscosidade do sistema e aumentar a mobilidade das macromoléculas (Milfont, 2021).

Quando um plastificante é adicionado a um polímero, suas moléculas geralmente apresentam massa molar baixa, penetram na fase polimérica, difundem-se entre as macromoléculas do polímero, aumentam o espaçamento intermolecular e aumentam a mobilidade entre as cadeias (Milfont, 2021; Dalagnol; Francisquetti; Santana, 2022).

A estrutura cristalina do amido é destruída no processo de plastificação devido a substituição de ligações intra e intermoleculares de hidrogênio por parte do agente plastificante.

Entretanto, para que isso ocorra, o agente plastificante deve apresentar algumas características importantes, como ser polar, hidrofílico e compatível com o amido, formando pontes de hidrogênio com os grupos hidroxilas do amido. Além disso, o plastificante deve ser estável durante o processamento, não degradar o amido e também é importante que o plastificante seja seguro para o meio ambiente e para os seres humanos, além de fornecer boas propriedades mecânicas aos materiais à base de amido. Isto resulta no aumento da mobilidade molecular e na diminuição do grau de cristalinidade (Milfont, 2021).

Alguns agentes que apresentam essas características e são utilizados no processamento são os polióis, no caso, o glicerol e a água, pois apresentam hidroxilas em suas respectivas estruturas, o que os tornam compatíveis com o amido, são solúveis entre si, são de natureza hidrofílica e possuem excelência na plastificação do amido (Fernandes *et al.*, 2019; Milfont, 2021).

### 2.2.1.2 Glicerol

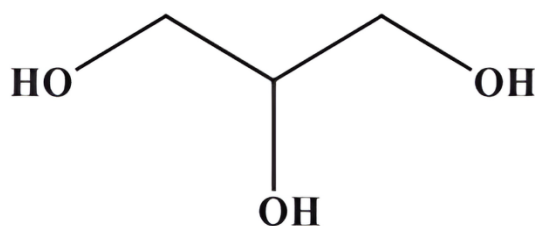
O glicerol tem sido utilizado como plastificante para a produção de filmes à base de amido devido à sua compatibilidade com a amilose, que estimula melhores propriedades mecânicas ao interferir no empacotamento da amilose pelas forças que diminuem entre as moléculas de amido (Tarique; Sapuan; Khalina, 2021).

Os aspectos mais importantes para definição dos plastificantes a serem utilizados são: ser compatível com o solvente e com o polímero utilizado, ter pouca migração para a superfície e a baixa toxicidade (Vieira, *et al.*, 2011). A incorporação de plastificante influencia diretamente a permeabilidade aos gases e ao vapor de água nos filmes. Por isso, eles devem ser adicionados em determinadas concentrações para se obter filmes com melhor flexibilidade, porém, sem a perda das propriedades de barreira. A diferença na composição, forma e estrutura dos plastificantes, também podem influenciar de modo direto a capacidade de formar a rede polimérica (Padilha, 2019).

Água, glicerol, sorbitol, açúcar, líquidos iônicos e compostos que possuem grupos funcionais como uréia, formaldeído, anidrido ou acetamida são aplicáveis como plastificantes. Embora os amidos termoplásticos sejam biodegradáveis, eles possuem propriedades mecânicas pobres e alta suscetibilidade à água que restringem seu uso em muitas aplicações. Uma forma de superar essas desvantagens é misturar com outro polímero biodegradável que melhore as propriedades mecânicas da mistura final (Estrada-Monje *et al.*, 2021).

Estudos recentes mostram que o glicerol pode melhorar as propriedades de processamento das cadeias poliméricas de amido e aumentar sua flexibilidade, por apresentar bons requisitos para atuar como plastificante do amido (Kundurur *et al.*, 2023). Além disso, observou-se que pequenas alterações na concentração de glicerol utilizado como plastificante de amido são relevantes para as características morfológicas, temperatura de transição vítrea e cristalinidade dos filmes de amido termoplástico obtidos por extrusão. Na figura 6 é apresentado a estrutura molecular do glicerol.

Figura 6- Estrutura do glicerol



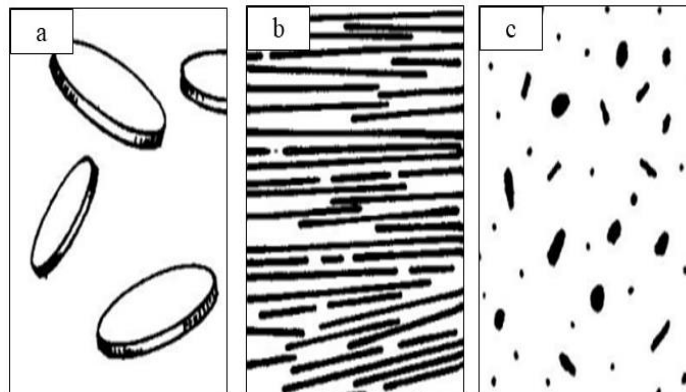
Fonte: Alashek; Keshe; Alhassan, (2022).

## 2.2 Compósitos Poliméricos

Compósitos poliméricos são materiais estruturalmente formados por uma matriz polimérica (fase contínua) e reforço (fase dispersa), onde o reforço é envolvido pela matriz. Após o processo de cura as reticulações são formadas e conferem propriedades intrínsecas ao material final que determinará sua ampla aplicabilidade (Litaiff, 2023).

Os materiais de reforço são geralmente mais resistentes e contribuem para a resistência mecânica do produto final. Os compósitos poliméricos são divididos em três partes principais e podem ser reforçados com partículas, fibras ou plaqueta, essa divisão de estruturas é representada na figura 7 (Litaiff, 2023).

Figura 7- Tipos de compósitos: (a) partícula, (b) fibra, (c) plaqueta



Fonte: Adaptado de Park; Bronzino (2002).

Dentre as opções, as fibras são mecanicamente mais eficazes na obtenção de um compósito polimérico rígido e forte do que as partículas, sendo possivelmente ideal para substituir polímeros de base fóssil (Park; Bronzino, 2002; Mohammed *et al.*, 2021).

O uso de fibras naturais como agente de reforço no setor plástico tem se revelado bastante promissor devido à sua abundância, caráter renovável e sustentabilidade ao meio ambiente além de proporcionarem materiais de alto desempenho mecânico (De Campos *et al.*, 2011).

As aplicações de compósitos com fibras naturais têm aumentado rapidamente desde as últimas duas décadas como substituto potencial dos materiais à base de fibra sintética em diversos campos dos setores de engenharia, incluindo automotivo, aeroespacial, marítimo, construção avançada, dispositivo de armazenamento de energia e até mesmo em materiais biomédicos (Pereira *et al.*, 2021; Cavalcanti, 2022).

### 2.3.1 Fibras vegetais

As fibras são classificadas de acordo com a sua origem, podendo ser obtidas através de sementes, fruto, folha, caule, casca, grama e madeira. As fibras procedentes do caule ou das folhas são denominadas de “fibras duras” e são as mais comumente usadas como reforço em compósitos poliméricos (Machado; Menchise; Bandeira, 2021; Litaiff, 2023).

O emprego de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras naturais lignocelulósicas vem tendo um crescente desenvolvimento nos últimos anos (Demosthenes *et al.*, 2020). Os grandes atrativos desses materiais incluem o fato das fibras serem biodegradáveis, serem um recurso natural renovável, terem geralmente baixo custo e produzirem menor desgaste nos equipamentos de fabricação quando comparadas com as fibras sintéticas (Lemos; Martins, 2014; Abera Betelie *et al.*, 2019).

A utilização das fibras naturais pode ser empregada em diversas áreas, desde as aplicações clássicas na indústria têxtil até o reforço de matrizes poliméricas termoplásticas e termofixas (Lemos; Martins, 2014; Abera Betelie *et al.*, 2019).

Dentre as pesquisas feitas pelo meio acadêmico e industriais, as fibras naturais oferecem a possibilidade de entregar maior valor agregado ao produto final em razão da diminuição de custos de sua fabricação, sustentabilidade e renovação, além de apresentarem um impacto ambiental reduzido durante o processamento (Lemos; Martins, 2014).

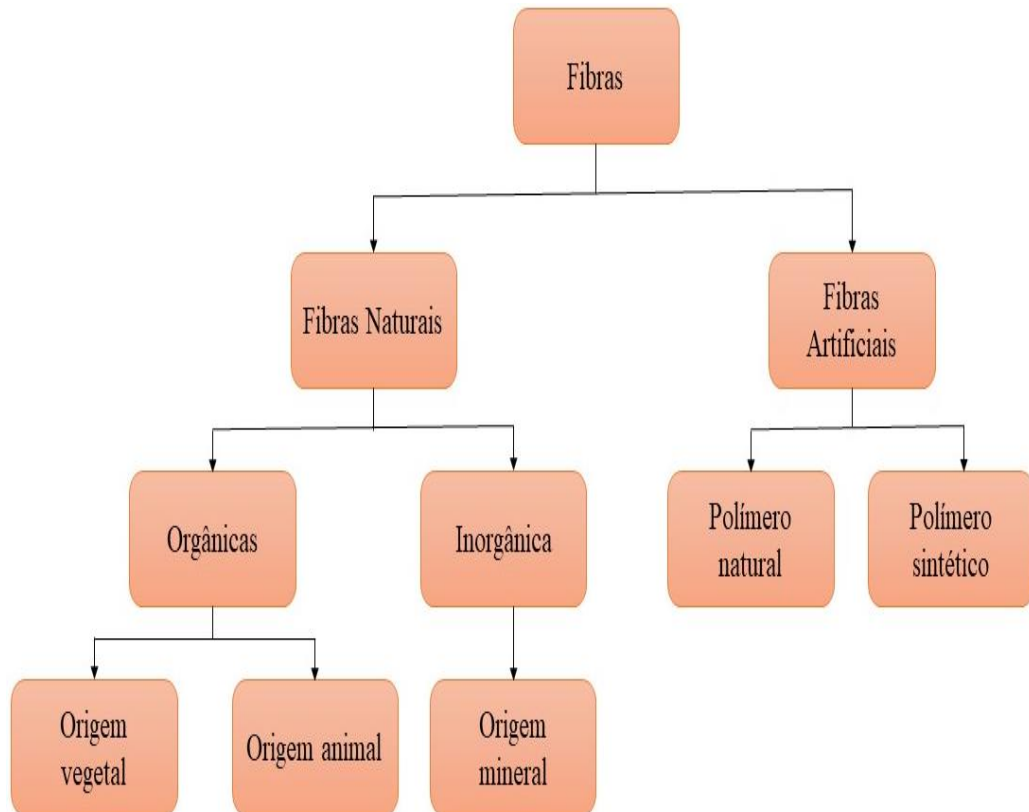
Resíduos agrícolas, como palhas de trigo e de arroz, bagaço e talos de milho também são fontes de origem vegetal, embora as suas fibras tenham menor teor de celulose em comparação à madeira (Lemos; Martins, 2014).

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, o emprego de fibras de culturas como sisal, cana-de-açúcar, juta e curauá, na indústria, pode levar uma melhoria de vida das comunidades produtoras que em sua maioria têm nessas fibras, uma forma de sobrevivência, o cultivo e o processamento dessas fibras podem gerar empregos e renda para as comunidades locais. Essas fibras naturais podem ser utilizadas como matéria-prima para a produção de diversos produtos, como cordas, tecidos, papel, entre outros (Lopes *et al.*, 2010).

A utilização de fibras vegetais, como juta, algodão, sisal e coco, como reforço em comparação às cargas inorgânicas possui muitas vantagens, tais como: fornecimento de materiais de baixa densidade, menor abrasão durante o processamento, altos níveis de densidade que resultam em aumento na rigidez, elevado módulo específico, aumento na durabilidade. Além de possuírem essas especificações, as fibras naturais são biodegradáveis, provenientes de fontes renováveis de grande disponibilidade e de baixo custo (Teixeira *et al.*, 2011).

Com estruturas alongadas e finas, as fibras podem ser categorizadas como naturais ou produzidas artificialmente pelo homem, sendo subdivididas em outras categorias, conforme a figura 8 (Oliveira, 2017).

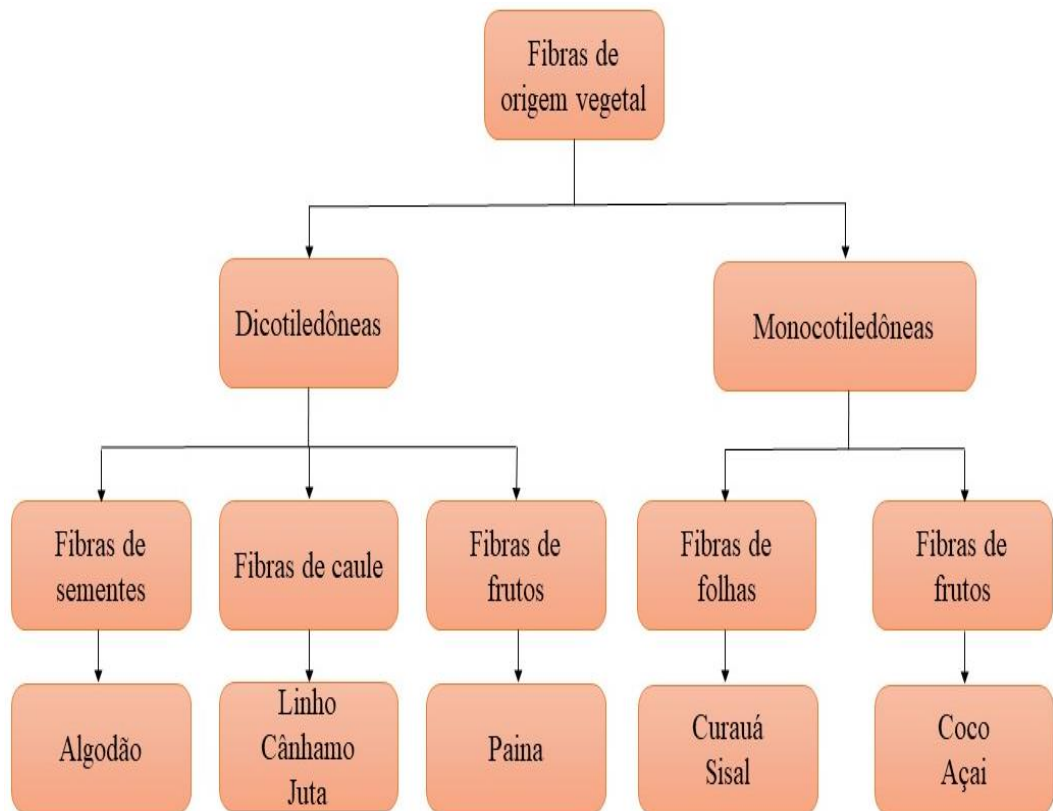
Figura 8- Classificação geral das fibras



Fonte: Adaptado de Oliveira, (2017).

As fibras naturais podem ser classificadas de acordo com a estrutura da planta de origem. Elas possuem cadeias moleculares mais longas e podem apresentar maior ou menor grau de orientação molecular. Quando as fibras apresentam uma orientação elevada, formam zonas cristalinas, onde os polímeros estão alinhados longitudinalmente e de forma paralelamente. Por outro lado, quando as moléculas das fibras possuem baixa orientação, formam-se zonas amorfas, com orientação indefinida. Esses fatores influenciam diretamente nas propriedades das fibras (Oliveira, 2017). As classificações das fibras vegetais podem ser observadas na figura 9.

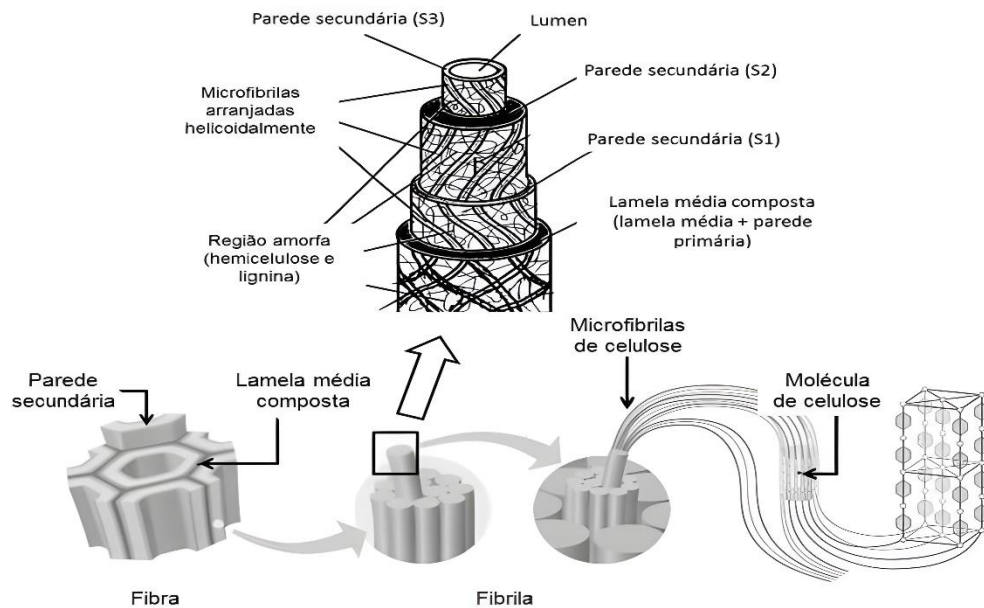
Figura 9- Classificação de algumas fibras vegetais



Fonte: Adaptado de Oliveira, (2017)

Segundo Lopes *et al.* (2010) as fibras vegetais, além de serem provenientes de fontes renováveis e serem biodegradáveis, apresentam um bom conjunto de propriedades mecânicas, não são tóxicas ou abrasivas aos equipamentos de processo, exigem temperaturas de processamento relativamente baixas, o que reduz o consumo energético durante o processamento e possuem baixa densidade e baixo custo se comparadas com as fibras sintéticas. O conhecimento da estrutura interna das fibras lignocelulósicas e da sua composição química é importante para compreensão de sua influência nas características do compósito e também na escolha dos seus tratamentos químicos e físicos (Araújo *et al.*, 2009; Lopes *et al.*, 2010). Assim, observando a figura 10 é possível ver a estrutura das fibras lignocelulósicas

Figura 10- Estrutura da fibra vegetal



Fonte: Adaptado de Oliveira, (2017).

Os constituintes contribuem para a resistência mecânica, permitindo a utilização das fibras como reforço na produção de compósitos. As estruturas das fibras são compostas por um feixe de células individuais denominadas fibrilas, que são compostas de microfibrilas dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação. Cada fibrila é composta por diversas paredes celulares que determinam as propriedades mecânicas, físicas e químicas da fibra (Furtado *et al.*, 2020; Lopes *et al.*, 2010).

As camadas das paredes celulares são conhecidas por lamela média, parede primária e parede secundária. Essas camadas são formadas por microfibrilas de celulose semicristalina impregnada por uma matriz com variados teores de hemicelulose e lignina. As moléculas de hemicelulose estão ligadas às microfibrilas de celulose por meio de ligações de hidrogênio formando uma rede de hemicelulose e celulose, enquanto a lignina é geralmente distribuída nos espaços entre as microfibrilas atuando como agente aglutinante das microfibrilas e fibrilas. Já a lignina é o terceiro componente fundamental das plantas, um polímero totalmente amorfo ligado quimicamente às hemiceluloses (Oliveira, 2017).

### 2.3.1.2 Principais componentes químicos das fibras vegetais

#### 2.3.1.3 Celulose

A celulose é o material de origem vegetal mais abundante da terra, sendo o componente orgânico principal das fibras naturais, consistindo de uma cadeia linear de unidades de celobiose interligadas. É um polissacarídeo com fórmula geral (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>) (Megiatto Junior, 2006).

A celulose é o principal componente da parede celular da fibra vegetal responsável pela resistência das fibras, por seu alto grau de polimerização e orientação linear (Lopes *et al.*, 2010).

A molécula da celulose possui elevada massa molecular e um considerável grau de cristalinidade e insolubilidade em água, pertence à função química dos carboidratos, mais especificadamente, dos glicídios, um polissacarídeo linear, constituído por um único tipo de unidade de açúcar, a glicose. A presença de moléculas de celulose presentes em algumas fibras vegetais é apresentada na tabela 2 (Oliveira, 2017).

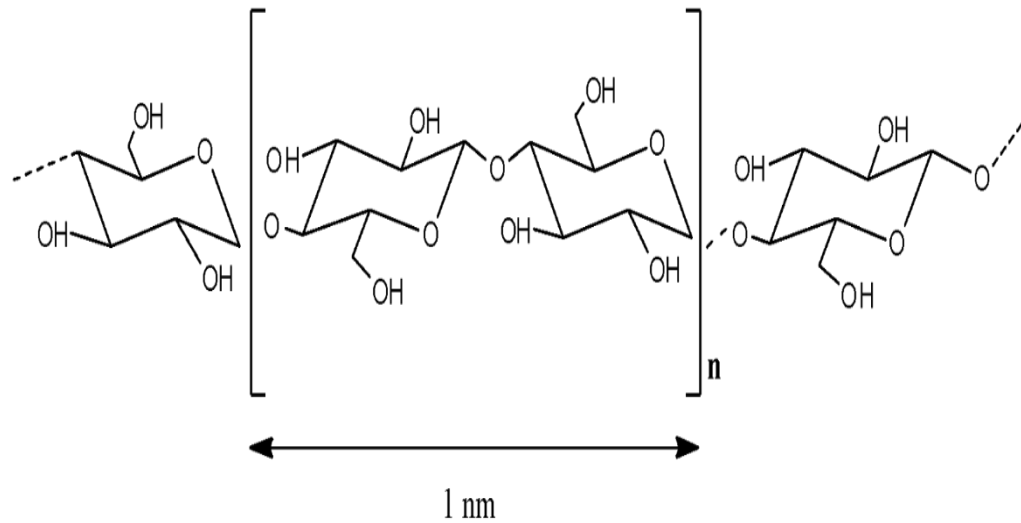
Tabela 2- Composição de celulose em algumas fibras vegetais

Fibra	Celulose (%)
Bagaço de cana	52,2
Bambu	26-43
Juta	61-71
Carauá	73,6
Kenaf	72
Sisal	65
Coco	32-43

Fonte: Adaptado de Faruk *et al.*, (2012).

A celulose é um polissacarídeo de cadeia linear composta por unidades de Danidroglicopiranosose ligados com  $\beta$ -1,4-glicosídicos, conhecidos como celobiose, no qual contêm grupos de hidroxilas, responsáveis por estabelecer ligações de hidrogênio intra e intermolecular. É o componente estrutural mais importante de todas as plantas e o polímero natural existente em maior abundância, constituindo de 40 a 50% de sua composição, sendo altamente hidrofílica devido suas fortes ligações de hidrogênio (Brito *et al.*, 2011; Barros, 2017). A estrutura da celulose é apresentada na figura 11.

Figura 11- Estrutura da celulose



Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2022).

A celulose apresenta estruturas microcristalinas e está localizada nas paredes secundárias das células vegetais com regiões amorfas e cristalinas e por possuir alto grau de cristalinidade tem influência nas propriedades mecânicas das fibras (Litaiff, 2023).

#### 2.3.1.4 Hemicelulose

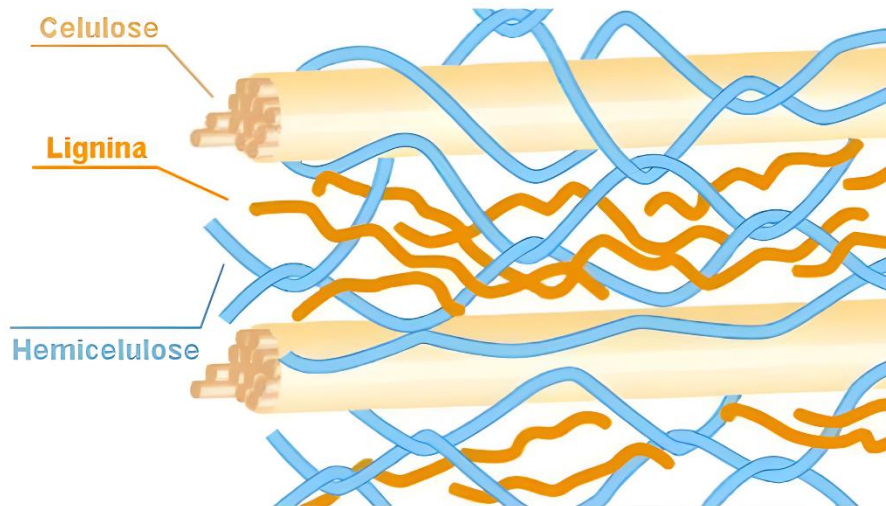
A hemicelulose é um polissacarídeo complexo, de baixa massa molar que inclui carboidratos poliméricos com cinco a seis átomos de carbono na estrutura das suas unidades de açúcar. A complexidade estrutural das hemiceluloses é responsável por propriedades como a ausência de cristalinidade, baixa massa molar e alta absorção de água. A hemicelulose atua como matriz para a celulose e aumenta a densidade de empacotamento da parede da célula (Lopes *et al.*, 2010; Furtado *et al.*, 2020; Sanchez-Salvador *et al.*, 2021).

Devido as suas propriedades, a hemicelulose possui diversas aplicações e vem despertando um interesse crescente na produção de biofilmes, pois a baixa permeabilidade ao oxigênio, a resistência mecânica e a flexibilidade da hemicelulose são propriedades muito importantes para tal aplicação e fornecem uma alternativa sustentável aos plásticos sintéticos, que atualmente são amplamente utilizados como materiais de embalagem de alimentos (Oliveira, 2017).

As hemiceluloses correspondem a polissacarídeos com grau de polimerização menor (da ordem de 10 a 100 vezes) com relação ao da celulose. Em sua composição podem aparecer, condensadas em proporções variadas, unidades de vários monossacarídeos, representados na

figura 12, a composição da hemicelulose presentes nas fibras é apresentada na tabela 3 e a estrutura molecular da hemicelulose é representada na figura 13 (Megiatto Junior, 2006).

Figura 12- Interação entre os três principais componentes das fibras vegetais



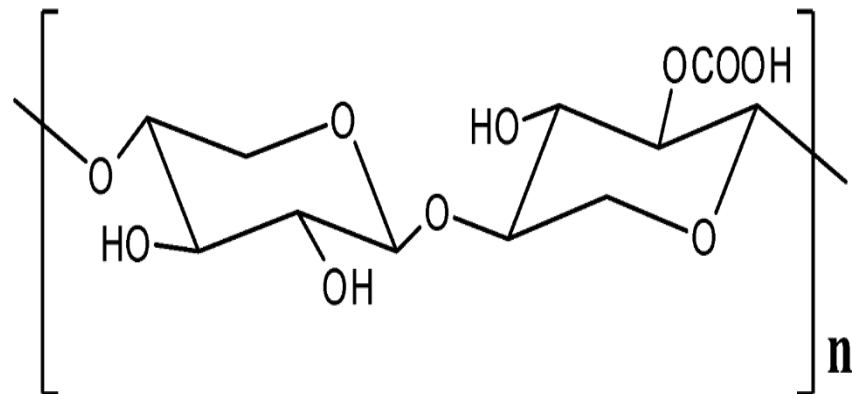
Fonte: Oliveira, (2017).

Tabela 3- Composição de hemicelulose em algumas fibras vegetais

Fibra	Hemicelulose (%)
Bagaço de cana	16,8
Bambu	30
Juta	14-20
Carauá	9,9
Kenaf	20,3
Sisal	12
Coco	0,15-0,25

Fonte: Adaptado de Faruk *et al.*, (2012).

Figura 13- Estrutura da hemicelulose



Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2022).

### 2.3.1.5 Lignina

A lignina é um polímero complexo de estrutura amorfa constituída por componentes aromáticos e alifáticos, que se une as fibras lignocelulósicas e forma paredes celulares. É uma substância hidrofóbica, com estrutura tridimensional e alto grau de ramificação. É o terceiro componente principal das plantas, representando aproximadamente de 20-30% da sua composição. A lignina além de manter as fibras unidas, enrijece a parede celular das fibras, gerando uma estrutura resistente ao impacto, à compressão e à dobra. Possui influência na estrutura, propriedades, morfologia, flexibilidade e taxa de hidrólise nas fibras (Lopes *et al.*, 2010; Suryanto *et al.*, 2018; Litaiff, 2023).

Tabela 4- Composição de lignina em algumas fibras vegetais

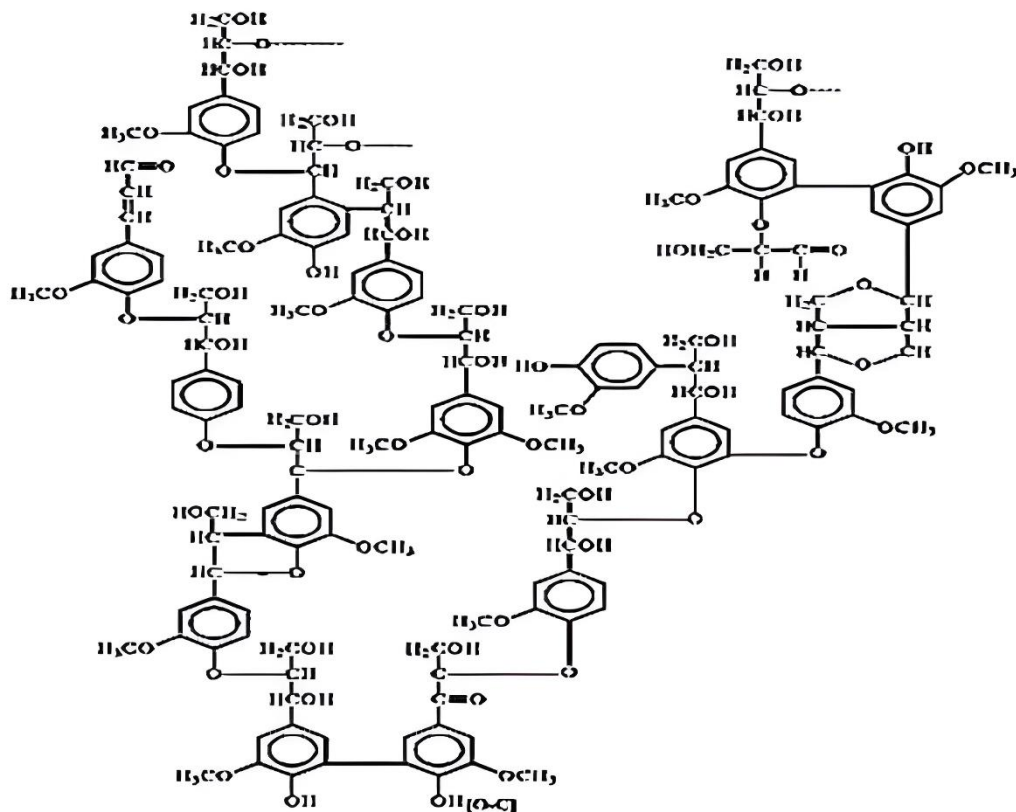
Fibra	Lignina (%)
Bagaço de cana	25,3
Bambu	21-23
Juta	12-13
Carauá	7,5
Kenaf	9
Sisal	9,9
Coco	40-45

Fonte: Adaptado de Faruk *et al.* (2012)

A lignina é constituída por macromoléculas de fenilpropano tridimensionais. Por apresentar estrutura complexa e de alta massa molar a lignina apresenta-se predominantemente amorfa, variando de 26 a 34% de teor de lignina nas plantas.

A estrutura química da lignina não é totalmente conhecida, designando a celulose e hemicelulose suporte estrutural, conforme é representado na figura 14 (Mussatto *et al.*, 2007).

Figura 14- Estrutura hipotética da lignina



Fonte: Mussatto; Fernandes; Roberto, (2007).

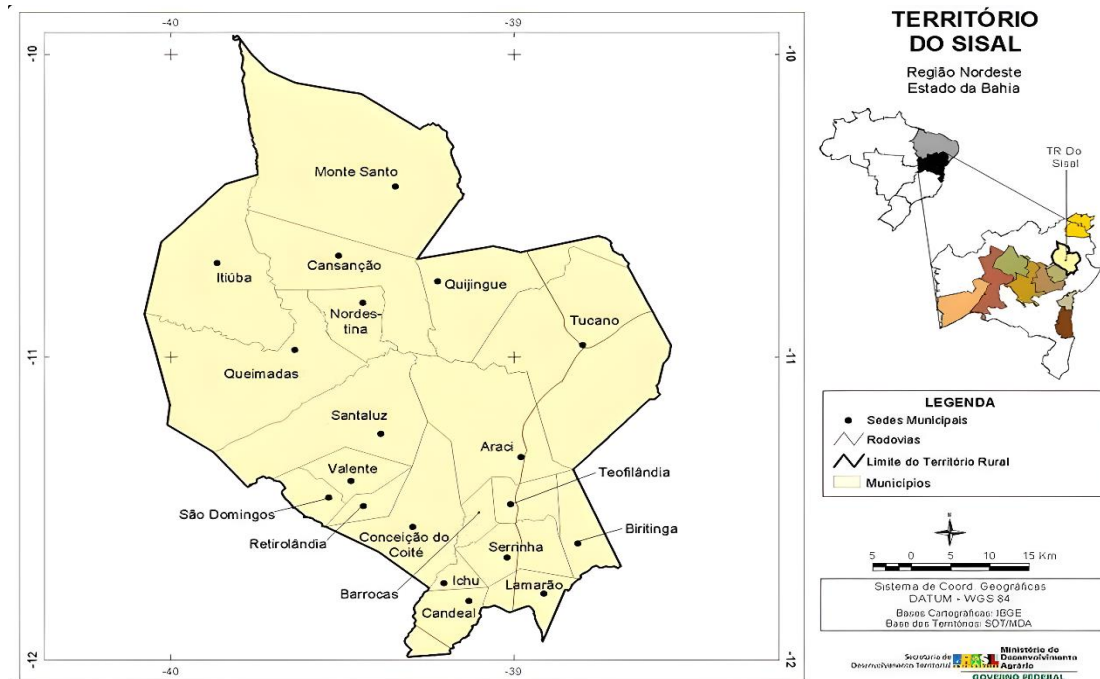
### 2.3.2 Fibras de sisal

Popularmente conhecida como sisal, a planta *Agave sisalana Perrine*, popularmente conhecida como sisal é originário de Yucatan (México) e é amplamente cultivado em regiões semiáridas no Brasil. (Megiatto Junior, 2006; Martin *et al.*, 2009).

O sisal foi plantado no Brasil em 1903 no estado da Bahia, e posteriormente foi levado para outros estados nordestinos. Atualmente, o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de fibras de sisal, sendo a Bahia e a Paraíba os principais estados produtores, onde

aproximadamente um milhão de pessoas dependem desta cultura para sobrevivência. Na figura 15 pode ser observado as regiões que produzem sisal, no estado da Bahia.

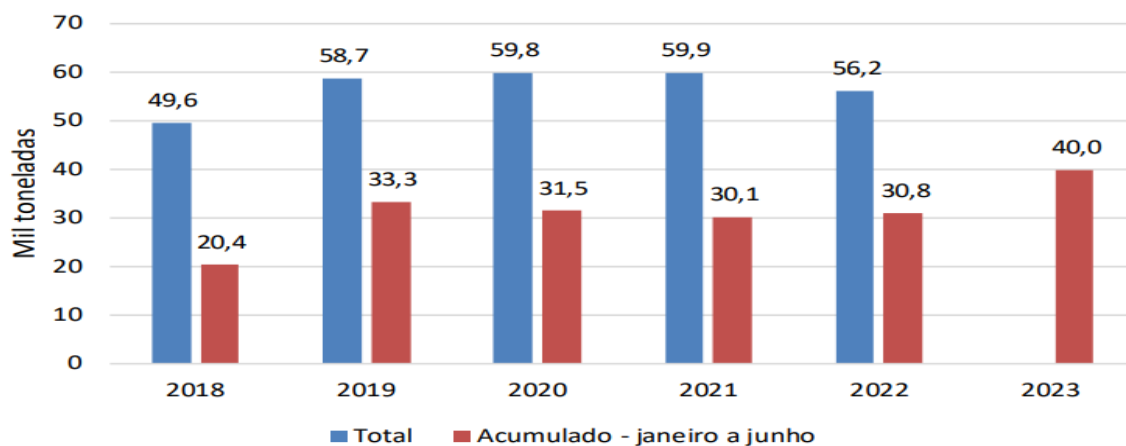
Figura 15- Mapa do Território do sisal no estado da Bahia



Fonte: Embrapa (2021).

Segundo o Conselho Nacional de Abastecimento-CONAB, órgão vinculado ao Ministério da Agricultura e Abastecimento, o Brasil produziu 40,0 mil toneladas de fibras de sisal no primeiro semestre de 2023 e a exportação dessa produção pode ser observada na figura 16 (Conab, 2023; Megiatto Junior, 2006).

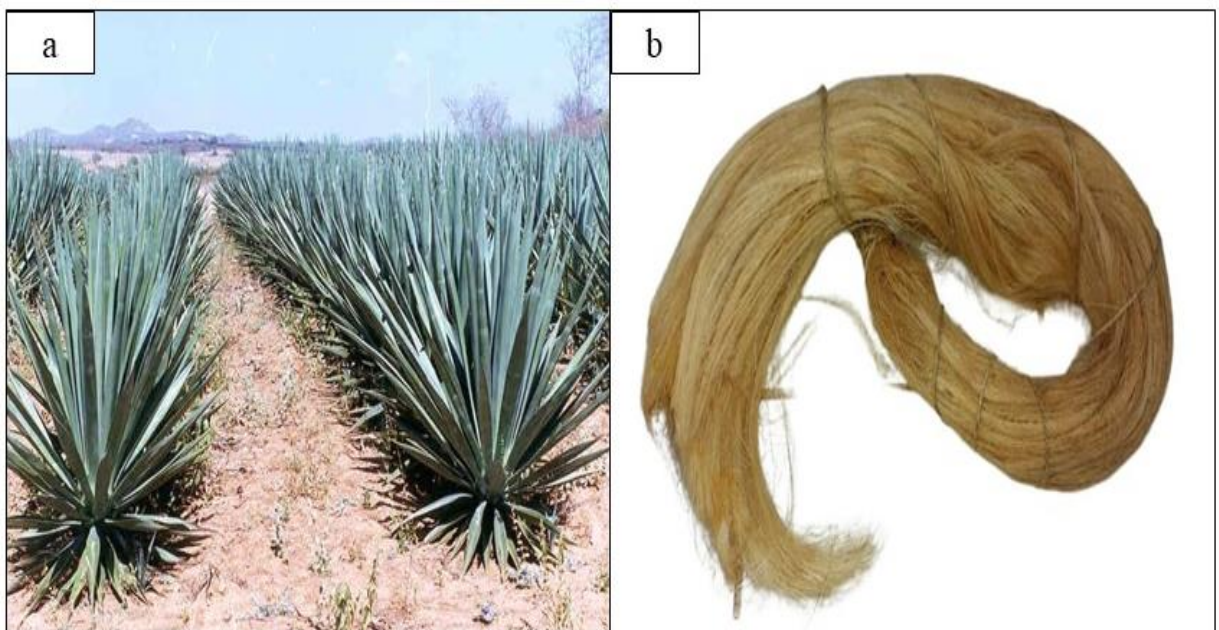
Figura 16- Exportação brasileira de sisal



Fonte: Conab (2023).

As fibras são extraídas das folhas, que possuem de 8 a 10 cm de largura e de 150 a 200 cm de comprimento. Da folha se obtém de 3 a 5% do seu peso em fibra. Os 95 a 97% restantes constituem os chamados resíduos do beneficiamento, que são utilizados como adubo orgânico, ração animal e pela indústria farmacêutica (Martin *et al.*, 2009). A planta de sisal cresce cerca de 100 a 200 folhas durante sua vida e cada folha contém fibras longas e retas que podem ser extraídas por meio de processos especializados (Abera Betelie *et al.*, 2019). A figura 17 apresenta a planta do sisal e as fibras extraídas.

Figura 17- (a) planta agave sisalana, (b) fibra de sisal



Fonte: (a) Adaptado de Embrapa (2021), (b) Autora (2023).

A fibra de sisal se destaca entre as fibras foliares, em termos de qualidade e de aplicação comercial, e também por possuir um dos maiores valores de módulo de elasticidade. Dentre outras vantagens do sisal pode-se apontar a facilidade de modificação superficial, característica das fibras vegetais, sua abundância no Brasil, importância econômica para a região Nordeste e facilidade de cultivo (Araújo *et al.*, 2009).

As fibras de sisal, assim como as demais fibras lignocelulósicas, são constituídas de celulose, hemicelulose, lignina, pectina, cera e substâncias solúveis em água, sendo os três primeiros componentes mencionados os principais responsáveis pelas propriedades físicas das fibras. As cadeias de celulose são firmemente ordenadas e direcionadas, o que confere à celulose da planta do sisal alto grau de cristalinidade e resulta em boa resistência a agentes químicos e físicos (Abera Betelie *et al.*, 2019).

Os compósitos reforçados com fibras de sisal se destacam por apresentarem alta resistência ao impacto e boas propriedades de resistência à tração e flexão e correspondem a 70% da produção comercial de todas as fibras vegetais no mundo. Isto é atribuído ao fato da fibra de sisal apresentar um dos maiores valores de módulo de elasticidade e de resistência entre as fibras naturais (Lopes *et al.*, 2010; De Campos *et al.*, 2011).

Devido à sua composição química, fibras vegetais são polares e higroscópicas, o que as torna incompatíveis com a maioria das matrizes poliméricas. Desta forma, para melhorar o desempenho de compósitos reforçados por fibras vegetais é comum a realização de tratamentos superficiais na matriz ou nas fibras (Araújo *et al.*, 2009).

Diversos tipos de tratamento superficial com sofisticação, custo, tecnologia e eficácia distintos, foram propostos para melhorar a adesão em compósitos poliméricos entre a fibra e a matriz. Dentre estes, um dos métodos mais populares é a modificação superficial das fibras por tratamento alcalino. Isto porque este tipo de modificação, além de apresentar baixo custo, facilidade de operação e eficácia, leva à remoção de hemicelulose, lignina e contaminantes, levando ao aumento da cristalinidade, redução do diâmetro e da densidade das fibras, separando as microfibrilas de celulose e expondo as fibras a um maior contato com o polímero (D’Almeida *et al.*, 2005; Araújo *et al.*, 2009).

### 2.3.3 Tratamento das fibras

Fibras vegetais são polares e higroscópicas, o que as torna incompatível com a grande maioria das matrizes poliméricas resultando em uma interface fibra/matriz pobre e afetando negativamente as propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais. Para minimizar este problema, as fibras são modificadas para melhorar sua adesão com a matriz (Vijay *et al.*, 2019). Existe uma grande variedade de plantas utilizadas como reforço em matrizes poliméricas, por exemplo, sisal, juta, palmeira, curauá, entre outras (Melo; Silvestre, 2019). As fibras utilizadas como reforço vêm de diferentes partes da planta, como tronco, folha, galhos de frutos e caule e mesmo que a adesão entre fibras naturais e polímeros seja baixa, ela pode ser melhorada com tratamentos químicos, removendo componentes amorfos e apolares da fibra e impurezas que repelem os polímeros (D’Almeida *et al.*, 2005; Araújo *et al.*, 2009; Suryanto *et al.*, 2018; Awais *et al.*, 2021).

Como a hemicelulose está ligada à celulose e à lignina na parede celular da planta, são necessários procedimentos de isolamento detalhados para separar estes componentes da

matéria-prima vegetal. Uma solução muito alcalina, por exemplo, pode despolimerizar a hemicelulose (Oliveira, 2017).

Entre os vários tipos de tratamentos químicos como o tratamento alcalino, com ácidos, com grupos silano, acetil, isocianato, permanganato e peróxido são feitos nas fibras vegetais para melhorar o desempenho das fibras na matriz. O tratamento alcalino utilizando hidróxido de sódio (NaOH) é um dos tratamentos químicos mais usados para as diversas fibras vegetais. A modificação ocasionada por esse tratamento é o rompimento da ligação de hidrogênio no grupo hidroxila (OH) presente na estrutura da fibra, aumentando assim a rugosidade superficial, provocando uma superfície ativa introduzindo algum grupo reativo e proporcionam, às fibras, maior extensibilidade pela remoção parcial da lignina e hemicelulose (Lopes *et al.*, 2010; Suryanto *et al.*, 2018).

### 2.3.5 Processo alcalino

Alcalinização é um método de tratamento comum usado para melhorar as propriedades superficiais das fibras vegetais. Sendo um tratamento químico onde as fibras são imersas no reagente químico de hidróxido de sódio. Este tratamento remove certa quantidade de lignina, cera e óleos que recobrem a superfície externa da parede celular da fibra, despolimerizando a celulose amorfa, removendo grande parte da hemicelulose das fibras. A adição de solução aquosa de NaOH na fibra promove a ionização do grupo OH a alcóxido (De Campos *et al.*, 2011; Beltrami; Scienza; Zattera, 2014; Abera Betelie *et al.*, 2019).

Devido à alta solubilidade da hemicelulose e lignina mesmo em baixas concentrações de álcali, o tratamento alcalino, promove a oxidação superficial da fibra, reduzindo o aspecto da fibra, ou seja, aumentando a relação entre o diâmetro e o comprimento da fibra, promovendo uma melhor aproximação das estruturas moleculares de celulose, que determinam a cristalinidade da fibra e como os grupos hidroxilos de celulosas são passíveis de modificação, o pré- tratamento químico pode inserir novas funções que podem entrelaçar eficazmente com a matriz (Bisanda, 2000; Castoldi *et al.*, 2022).

Desta forma, o tratamento causa aumento da cristalinidade e redução da densidade das fibras e também promove o desenvolvimento da morfologia superficial, aumentando a rugosidade, resultando melhor aderência entre a fibra e a matriz e conseqüentemente um aumento nas propriedades mecânicas (Bisanda, 2000).

Além disso, também foi observado que o aumento da molhabilidade e da adesão à matriz da fibra, bem como a rugosidade superficial em compósitos reforçados resultaram em melhores

interações moleculares. Isto se deve ao aumento da quantidade de celulose exposta na superfície da fibra, aumentando assim o número de grupos funcionais que podem reagir (Fiore; Di Bella; Valenza, 2015; Furtado *et al.*, 2020).

O tratamento alcalino de fibras naturais tem alcançado vários graus de sucesso no aumento da resistência das fibras. Além disso, também foi observado aumento da molhabilidade e da adesão fibra/matriz, assim como a rugosidade superficial em compósitos resultando em melhores interações moleculares. Isto se deve ao aumento da quantidade de celulose exposta na superfície da fibra, aumentando assim o número de grupos funcionais (Menezes, 2018; Furtado *et al.*, 2020).

### 2.3.6 Branqueamento

Em 1935 era usado o peróxido de hidrogênio para realizar o tratamento de branqueamento e até o século XVIII o branqueamento era efetuado pela luz solar e as soluções de cloro só foram introduzidas na água no final do mesmo século, mas a sua utilização cresceu significativamente em apenas 5 anos, atingindo 65% da sua utilização. Atualmente, 90% das empresas que realizam esse tratamento utilizam peróxido de hidrogênio para fazer o branqueamento (Araújo, 2019).

O branqueamento é uma das operações realizadas no pré-tratamento dos artigos têxteis para que estes estejam bem preparados para os processos que serão submetidos posteriormente, tais como o tingimento, a estamparia e os acabamentos. Este processo tem como objetivo destruir a cor natural das fibras de celulose e proteínas, bem como remover as cascas, que já foram destruídas no tratamento alcalino (Araújo, 2019).

A extração de materiais lignocelulósicos envolve primeiramente a eliminação de lignina e hemiceluloses seguida pelo isolamento das fibras celulósicas cristalinas. Convencionalmente, a deslignificação é realizada utilizando o tratamento alcalino para romper a estrutura da lignina e permitir a separação das ligações estruturais entre a lignina e os carboidratos. As fibras deslignificadas são então submetidas a tratamento de branqueamento para obtenção das fibras de celulose que normalmente envolve compostos à base de cloro ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Cl}_2\text{O}$  e  $\text{NaOCl}$ ) (Baruah; Deka; Kalita, 2020).

O branqueamento pode ser mais ou menos intenso conforme o grau de branco que se pretende obter, se pretender tingir o material têxtil poderá ser realizado um branqueamento menos intenso a nível químico. Caso seja pretendido um grau de branco superior, o branqueamento pode ser realizado com produtos químicos com efeito mais severo, podendo mesmo ser necessário um branqueamento ótico (Araújo, 2019).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho, foram o amido de milho comercial, conhecido como maizena e como plastificante foram utilizadas água destilada cedidas pelo laboratório de catálise e biocatálise e o glicerol, conhecido comercialmente como glicerina, foi adquirido na Êxodo científica.

Foram utilizadas fibras de sisal (*Agave sisalana Perrine*), cedidas gentilmente pelo Laboratório de materiais porosos e sintetizados (LAMPS). Os reagentes empregados ao tratamento das fibras foram solução de hipoclorito de sódio (NaClO 1 % de cloro ativo) e solução de hidróxido de sódio (NaOH 5 % m/v) da marca Qhemis.

#### 3.2 Metodologia

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Polímeros (LABPOL), campus Belém-PA e as caracterizações foram realizadas no Laboratório de Espectroscopia Vibracional e Altas Pressões (LEVAP), Laboratório de Práticas Tecnológicas (LAPTEC), campus Ananindeua-PA e Laboratório de Caracterização dos Materiais (LABCMAT) da Universidade Federal do Pará.

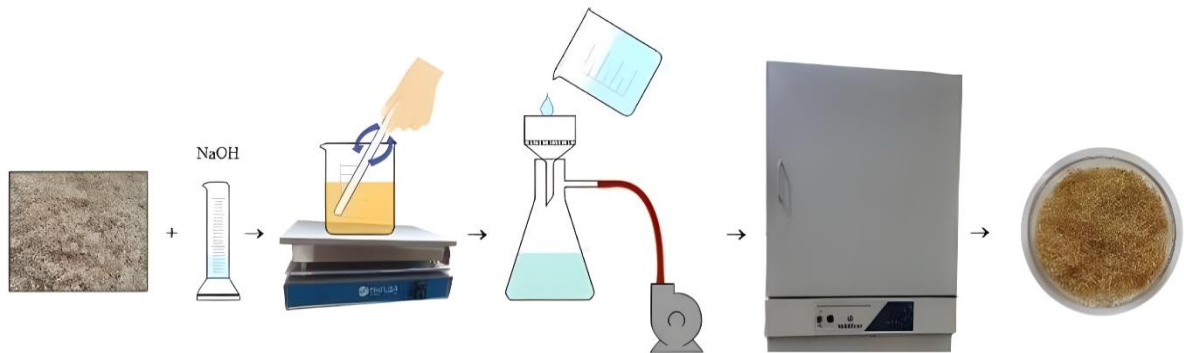
##### Processamento das fibras de sisal

Inicialmente, as fibras de sisal foram moídas em um moinho de facas TRF 600, alcançando um tamanho médio de 1 cm de comprimento. Depois foram moídas novamente, mecanicamente, em um liquidificador. As fibras desfibradas foram secas em uma estufa com circulação de ar a uma temperatura de 35°C por 24 horas. Após a secagem, ocorreu a moagem final, onde as fibras foram trituradas novamente utilizando uma faca Marconi mil Willey modelo MA048, alcançando um tamanho aproximado de 0,50 mm de comprimento.

### 3.2.1 Tratamento alcalino

As fibras moídas foram imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 5% (m/v) na proporção de 1 g de fibra para 20 mL de solução sob agitação mecânica durante uma hora a uma temperatura de 80° C. Após o tratamento com o hidróxido de sódio, o material foi filtrado a vácuo e lavado com água destilada até atingir pH neutro. Após esta etapa, as fibras foram secas em estufa com circulação de ar a 35°C por 24 horas. A figura 18 apresenta um diagrama esquemático para o tratamento alcalino.

Figura 18- Diagrama esquemático do tratamento alcalino

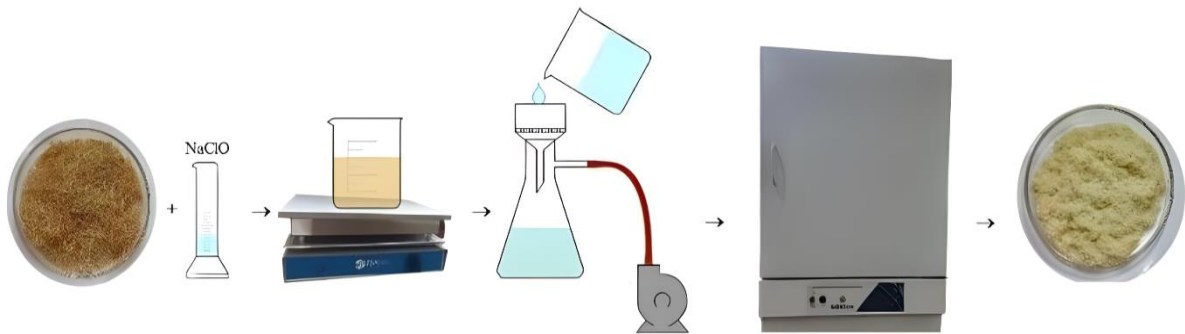


Fonte: Autora (2023).

### 3.2.2 Branqueamento

As fibras tratadas com hidróxido de sódio (NaOH) foram imersas em uma solução de hipoclorito de sódio com concentração de 1% (v/v) na proporção de 1 g de fibra para 20 mL da solução de hipoclorito de sódio. A imersão das fibras na solução de hipoclorito de sódio foi realizada a uma temperatura de 65°C por 1 hora, permitindo que a reação ocorra adequadamente. Após o tratamento com hipoclorito de sódio, as fibras foram lavadas com água destilada para remover o excesso de NaClO, filtradas a vácuo e secas em uma estufa com circulação de ar a 35 ° C por 24 horas para remover a umidade restante e garantir que as fibras estejam completamente secas antes de serem usadas. Na figura 19, é possível observar o diagrama esquemático do branqueamento.

Figura 19- Diagrama esquemático do branqueamento

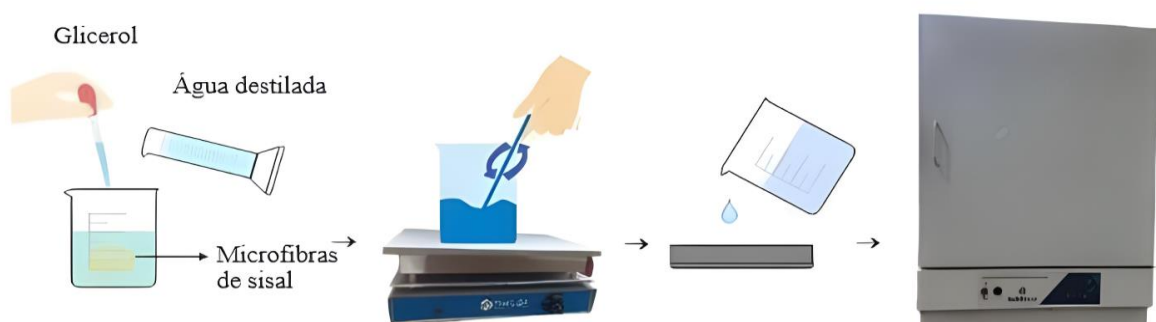


Fonte: Autora (2023)

### 3.2.3 Obtenção do amido termoplástico

Os filmes de amido termoplástico, foram obtidos através da técnica de evaporação por solvente (casting solution), na qual foi preparada uma solução filmogênica de amido de milho em água destilada na proporção de 1:20 m/v, foi adicionado 5 gramas de amido de milho e como agente plastificante foi utilizado além da água o glicerol na fração mássica de 28% e os compósitos poliméricos foram obtidos com teores de fibras de 5 e 10% de fração mássica em relação ao amido de milho. As quantidades estabelecidas foram adicionadas em moldes de silicone (18x19cm) e desidratada em estufa com circulação de ar a 35 °C por 24 horas. Os filmes de amido, amido com 5% de fibras de sisal curtas e amido com 10% de fibras de sisal curtas, foram denominados de T, C-1 e C-2, respectivamente. As etapas do processo de obtenção dos filmes estão representadas no diagrama da figura 20.

Figura 20- Diagrama esquemático da produção dos filmes



Fonte: Autora (2023)

### 3.3 Caracterização do Compósito de Amido Termoplástico

A técnica de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para caracterizar as amostras com base na análise dos grupos funcionais presentes na estrutura. A estabilidade térmica e as propriedades de degradação foram avaliadas por análise termogravimétrica (TGA). O aspecto visual do filme foi produzido de forma visual e tangível e a espessura foi analisada por meio de micrômetro digital.

#### 3.3.1 Aspecto visual

A análise visual foi conduzida de forma intrínseca nos filmes, utilizando a observação visual e tangível para avaliar aspectos como cor, homogeneidade, opacidade, presença ou ausência de bolhas, aparência quebradiça, flexibilidade e remoção da placa.

#### 3.3.2 Testes de análise termogravimétrica (TGA)

Para encontrar a estabilidade térmica das amostras dos filmes T, C-1 e C-2, foi utilizada a análise termogravimétrica (TGA). A curva TGA dos filmes foram obtidas utilizando um instrumento NEXT STA 300, sob atmosfera inerte de nitrogênio ( $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ) a uma taxa de  $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  em temperatura ambiente a  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . A análise foi realizada, no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFPA, campus Belém-PA e os resultados foram representados graficamente no software OriginPro® versão 9.5.1.

#### 3.3.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de absorção na região do infravermelho por refletância total atenuada (ATR) foram obtidos a fim de avaliar os grupos funcionais presentes em cada amostra. Os espectros foram realizados no Laboratório de Espectroscopia Vibracional e Altas Pressões da UFPA (LEVAP), campus Belém-PA à temperatura ambiente utilizando um espectrofotômetro Perkin Elmer FT-IR/FT-NIR Spectrum 400 Bruker. A realização dos espectros foi com resolução de  $8 \text{ cm}^{-1}$ , 100 varreduras e seleção de ondas situadas entre  $4000 \text{ cm}^{-1}$  a  $400 \text{ cm}^{-1}$ . A representação dos dados foi realizada através software OriginPro® versão 9.5.1.

### 3.3.4 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova para a realização do ensaio mecânico de tração e da análise de espessura foram confeccionados através da técnica de evaporação por solvente, utilizando amido de milho, água destilada, glicerol e fibras de sisal curtas. Os filmes em estado gelatinoso foram adicionados a uma placa de silicone e posteriormente foi mantido a uma temperatura de 35°C, por um período de 24 horas em estufa com circulação de ar. Após a secagem dos filmes, foram feitos 8 corpos de prova de cada filme, com medidas de 2,5 cm x 7,5 cm.

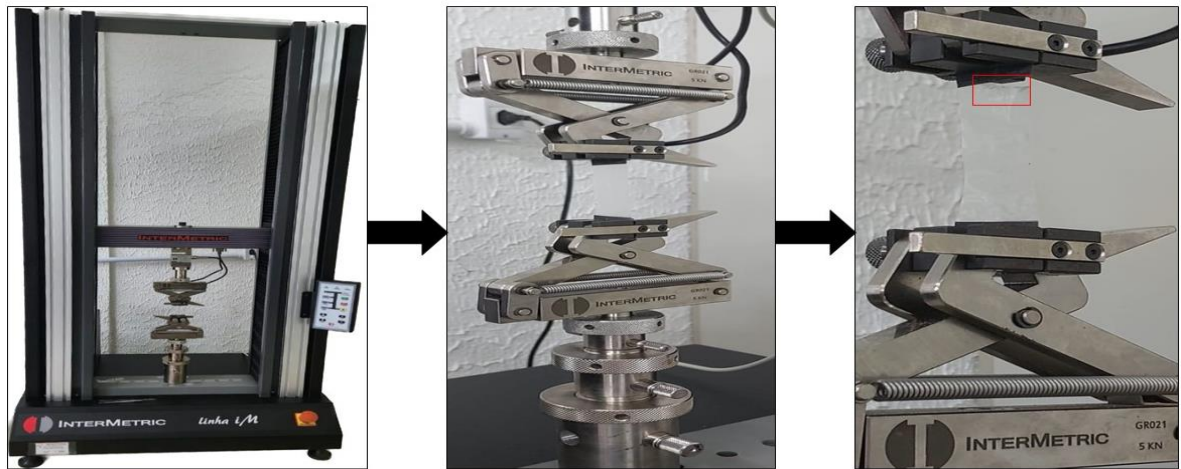
### 3.3.5 Espessura

A espessura foi realizada em cinco pontos diferentes do filme, utilizando um micrômetro digital (modelo não especificado) com precisão de 0,001 mm. A espessura final foi determinada pela média aritmética das medidas em 5 pontos aleatórios realizadas em cada amostra. As medidas feitas foram baseadas em (Nunes, 2018). Com os resultados obtidos foram retirados a média e desvio padrão.

### 3.3.6 Teste mecânico de tração

As propriedades mecânicas (resistência à tração, deformação e módulo de elasticidade) dos compósitos e amido termoplástico (TPS) foram realizadas utilizando a máquina universal INTERMERTRIC eletromecânica iM-50 do Laboratório de Práticas Tecnológicas (LABTEC) e Laboratório de Caracterização dos Materiais (LABCMAT) da Universidade Federal do Pará, campus Ananindeua-PA. Determinadas conforme a norma ASTM D882-18, com velocidade de 5mm/min, dimensões de 2,5 cm x 7,5 cm e para determinar os valores médios dos resultados os testes foram realizados em 8 corpos de prova e depois as variações estatísticas foram obtidas pelo teste de Duncan, com nível de significância de 5%. Realizada no TIBCO Statistica® versão 14.0.0.15. A figura 21 apresenta as etapas do ensaio mecânico.

Figura 21- Ensaio de tração do Amido termoplástico (TPS)



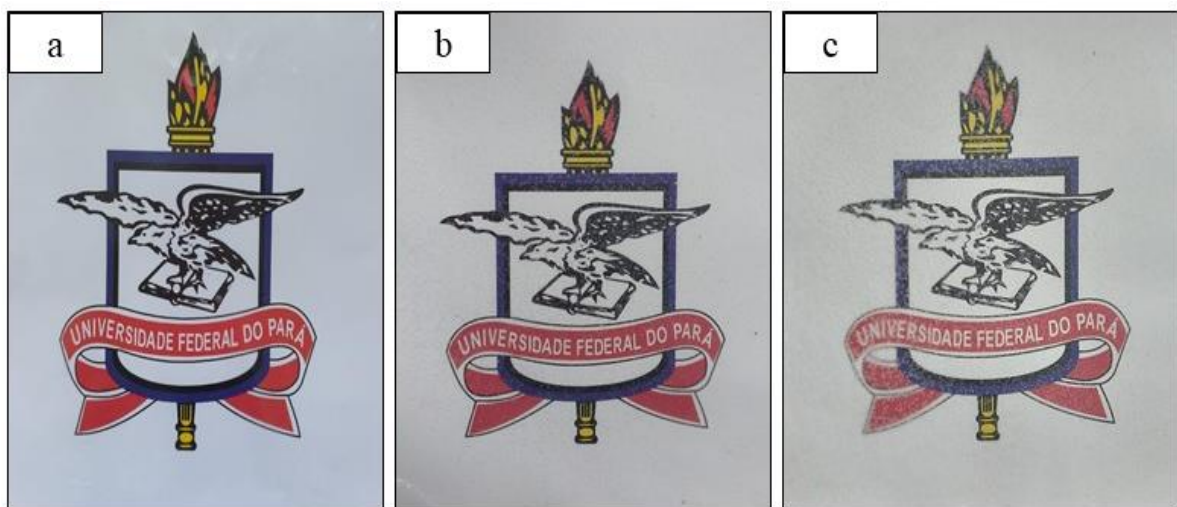
Fonte: Autora (2023).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Aspecto visual

Ao utilizar como comparativo os estudos conduzidos por Brito, (2019) não foram identificadas diferenças visuais significativas nas amostras do filme sem fibra (T), com 5% de fibras (C-1) e 10% de fibras (C-2), conforme ilustrado na figura 22.

Figura 22- Aspecto visual dos filmes: a) T, b) C-1 e c) C-2.



Fonte: Autora (2023)

No quadro 1 são apresentados os resultados obtidos quanto aos aspectos visuais dos filmes T, C-1 e C-2.

Quadro 1- Resultados obtidos a partir da análise visual dos filmes

Amostras	Aparência dos filmes
<b>T</b>	Translucido, homogêneo, ausência de rachaduras e de bolhas na superfície, não quebradiço, não frágil, flexível e de fácil remoção
<b>C-1</b>	Translucido, não homogêneo, ausência de rachaduras e de bolhas na superfície, não quebradiço, não frágil, flexível e de fácil remoção
<b>C-2</b>	Levemente translucido, não homogêneo, ausência de rachaduras e de bolhas na superfície, não quebradiço, não frágil, flexível e de fácil remoção

Fonte: Adaptado de (Brito, 2019).

Ao analisar as imagens e a tabela é possível notar que o filme sem fibras, apresentou um aspecto homogêneo e coloração transparente, sem presença de bolhas ou rachaduras em sua superfície. Além disso, o filme demonstrou flexibilidade, ausência de características que indicassem fragilidade e facilidade ao ser removido da placa de silicone.

Os filmes que contêm 5% e 10% de fibras de sisal curtas, exibiram um aspecto heterogêneo devido à presença de partículas finas não dispersas. No entanto, não foram observadas bolhas nem rachaduras na superfície do filme. É importante ressaltar que essas características relacionadas ao aspecto heterogêneo dos filmes não prejudicaram a flexibilidade nem a remoção da placa de silicone.

Portanto, pode-se concluir que com o aumento do percentual de fibras nos filmes, ocorrem alterações em seus aspectos visuais. Entretanto, essas mudanças não impactam a manipulação dos filmes.

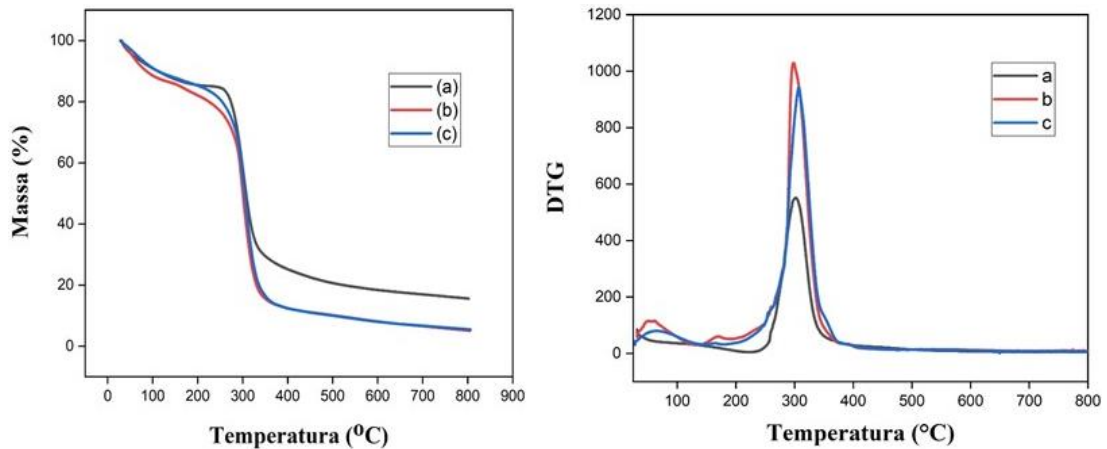
A uniformidade do filme somente com a presença de plastificantes e amido é uma característica notável e esperada. Essa observação é sustentada por estudos anteriores descritos por Brito, (2019) que descreve esse aspecto como resultado da interação do glicerol incorporado à matriz polimérica.

A transparência dos filmes produzidos revela-se vantajosa para aplicação em embalagens de alimentos. Pois a transparência proporciona uma visão direta do produto contido na embalagem, permitindo aos consumidores examinar visualmente o produto, eliminando a necessidade da abertura da embalagem.

#### **4.2 Testes de análise termogravimétrica (TGA)**

Com a análise dos resultados das curvas de TG e DTG. Podem ser observadas alterações nas características térmicas dos filmes de amido termoplástico (TPS) e com 5% e 10% de fibras, principalmente quando se observa o percentual de perda de massa durante o aquecimento, conforme observado na figura 23.

Figura 23- (esquerda) curvas TGA dos filmes: (a)TPS, (b) 5% de fibras, (c) 10% de fibras e (direita) curvas DTG dos filmes: (a)TPS, (b) 5% de fibras, (c) 10% de fibras.



Fonte: Autora (2023)

Na primeira etapa, as temperaturas variam de 60 °C a 200 °C para filmes sem fibras e para os compósitos, estes resultados são atribuídos a perda de umidade e do glicerol (Menezes, 2018; Tarique *et al.*, 2021). O segundo evento, ocorre na faixa de temperaturas entre 230 °C e 500 °C, foi caracterizado como a desintegração do amido e da celulose, a degradação da celulose é notável no ponto máximo correspondente à taxa máxima de decomposição (Castoldi *et al.*, 2022).

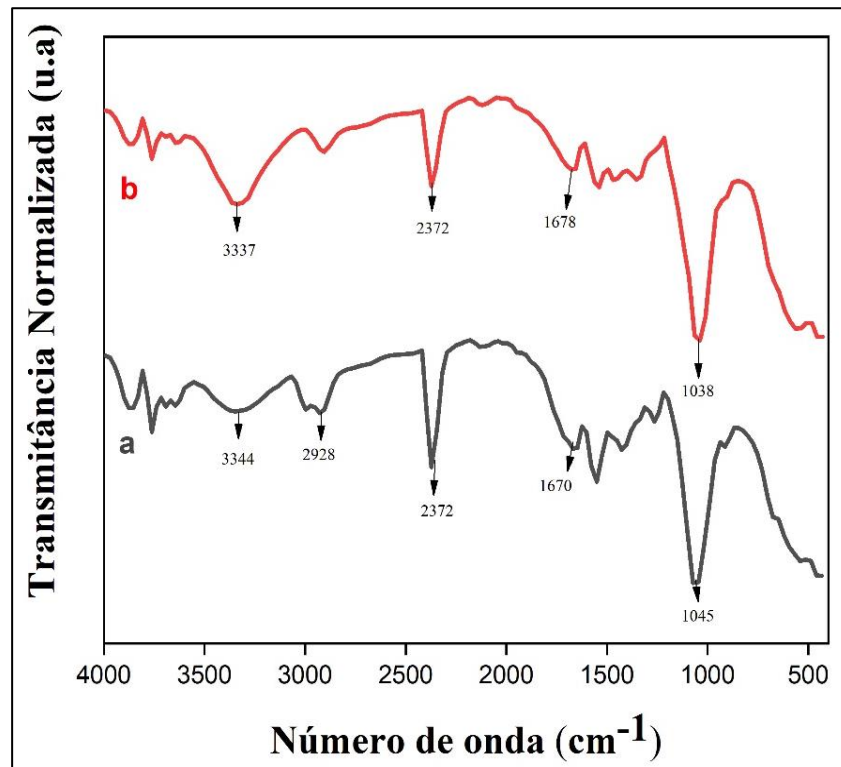
De acordo com Tarique *et al.*, (2021) com o aumento de temperatura ocorre a degradação e despolimerização do polímero de cadeias de carbono do amido.

Percebe-se que a degradação dos compósitos ocorre em menor grau como resultado da mistura dos materiais. A matriz polimérica degrada-se a temperaturas marginalmente superiores às dos compósitos. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Furtado *et al.*, (2020) pois a característica de estabilidade térmica é atribuída à presença de celulose na fibra.

### 4.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia FTIR foi utilizada para acessar os modos vibracionais das amostras de fibra sem tratamento e fibras com tratamento alcalino. Na Figura 24 é possível identificar bandas de absorção que abrangem os grupos de hidroxila (OH-), carbonilas (C=O) e ligações de C-H e C-O.

Figura 24- FTIR das fibras: a) naturais e b) com tratamento alcalino e branqueamento.



Fonte: Autora (2023)

Os números de ondas e os respectivos grupos funcionais para amostras obtidas, segundo a análise do FTIR, são apresentadas no quadro 2 e 3.

Quadro 2- Relação entre bandas e grupos funcionais das fibras sem tratamento.

<b>Bandas <math>\text{cm}^{-1}</math></b>	<b>Grupos funcionais</b>
3344	O-H
2928	C-H
1670	C=O
1045	C-H e C-O

Fonte: autora (2023).

Quadro 3- Relação entre bandas e grupos funcionais das fibras com tratamento.

<b>Bandas <math>\text{cm}^{-1}</math></b>	<b>Grupos funcionais</b>
3337	O-H
2372	C-H
1678	C=O
1038	C-H e C-O

Fonte: Autora (2023).

No quadro 2 e 3 é possível comparar as amostras sem tratamento e com tratamento alcalino e identificar as mudanças nas bandas de absorção devido ao tratamento.

A intensidade das bandas em um espectro de absorção por infravermelho está diretamente relacionada às vibrações moleculares das ligações químicas. No contexto das hidroxilas (O-H), o pico de intensidade se dá em 3344 e 3337.

Nas fibras tratadas, observa-se uma diminuição na intensidade na banda larga da hidroxila, significando a redução da higroscopicidade das fibras tratadas indicando que terão uma menor tendência a absorver água em comparação com as fibras não tratadas. Isso pode ser vantajoso em aplicações onde a resistência à umidade é importante (D'Almeida *et al.*, 2005).

De acordo com Tserki *et al.*, (2005) as bandas entre 2928- 2372 correspondem as ligações C-H alifáticos dos grupos metila -CH<sub>3</sub> e metileno -CH<sub>2</sub>. Este grupo funcional é característico dos componentes lignocelulósicos presentes nas fibras vegetais. Enquanto o estiramento entre 1670 e 1678 correspondem ao grupo carbonila, presente no grupo acetil éster ou carboxílicos da hemicelulose. Os estiramentos são gerados a partir da esterificação das hidroxilas presentes (Castro *et al.*, 2020; Furtado *et al.*, 2020).

Lu *et al* em seu estudo de 2003 sobre a utilização de fibras de sisal benziladas no reforço de materiais para a confecção de compósitos, constatou que houve redução na intensidade dos picos C = O em 1636 e 1250 cm<sup>-1</sup>, mostrando que a lignina e a hemicelulose presentes na fibra natural são parcialmente removidas após o tratamento; isso pode ser uma evidência da efetividade dos tratamentos nas fibras.

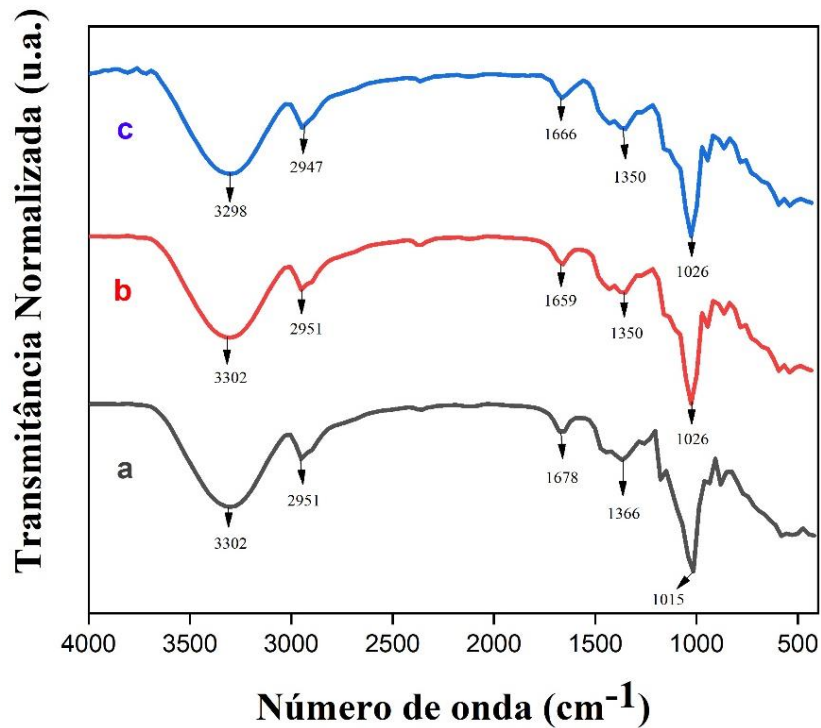
A banda de maior intensidade corresponde a deformações nos acoplamentos C-H e C-O (Sanchez *et al.*, 2010; D'Almeida *et al.*, 2019).

As características observadas das alterações químicas mais significativas ocorridas nas fibras de sisal são semelhantes às relatadas por (D'Almeida *et al.*, 2005).

Por isso, pode-se inferir que mudanças estruturais podem ser causadas pelo tratamento alcalino das fibras naturais.

O espectro FTIR do amido termoplástico, com 5% e 10% de fibras evidenciou a presença de bandas largas correspondentes as vibrações de estiramento dos grupos funcionais de hidroxila (OH-), carbonilas (C=O) e ligações de C-H, C-O, C-O-C e C-O-H, conforme é apresentado na figura 25 e nos quadros 5, 6 e 7.

Figura 25- FTIR dos filmes: a) TPS, b) 5% de fibras e c) 10% de fibras.



Fonte: Autora (2023)

Quadro 4- Relação entre bandas e grupos funcionais do amido termoplástico e dos filmes com 5% e 10% de fibras tratadas.

<b>Bandas <math>\text{cm}^{-1}</math> T</b>	<b>Grupos funcionais</b>
3302	O-H
2951	C-H
1678	C=O
1366	C-O
1015	C-O-C e C-O-H

Fonte: Autora (2023).

Quadro 5- Relação entre bandas e grupos funcionais dos filmes com 5% de fibras tratadas.

<b>Bandas <math>\text{cm}^{-1}</math></b>	<b>Grupos funcionais</b>
3302	O-H
2951	C-H
1659	C=O
1350	C-O
1026	C-O-C e C-O-H

Fonte: Autora (2023).

Quadro 6- Relação entre bandas e grupos funcionais dos filmes com 10% de fibras tratadas.

<b>Bandas <math>\text{cm}^{-1}</math></b>	<b>Grupos funcionais</b>
3298	O-H
2947	C-H
1666	C=O
1350	C-O
1026	C-O-C e C-O-H

Fonte: Autora (2023).

Observando a Figura 25 e os quadros 5 e 6, percebe-se que com a adição das fibras de sisal houve uma alteração no primeiro pico de  $3302 \text{ cm}^{-1}$  para  $3298 \text{ cm}^{-1}$ . Indicando a formação de hidrogênio entre as fibras e a matriz. Picos semelhantes foram observados por (De Almeida Nascimento *et al.*, 2021).

As bandas espectrais localizadas nas regiões de onda de  $2951 \text{ cm}^{-1}$  e  $2947 \text{ cm}^{-1}$  são características ao estiramento C-H, confirmando a presença de grupos metil e metileno, sendo correlacionados com o alongamento assimétrico (C-H) em cadeias alifáticas, respectivamente (Abera *et al.*, 2020).

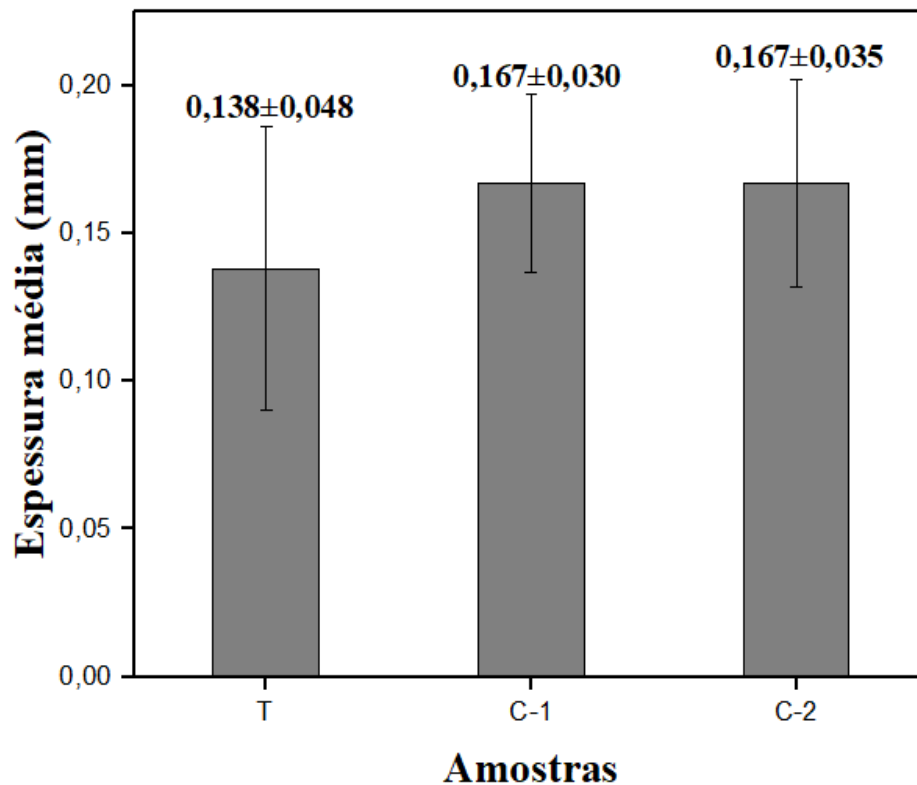
Adicionalmente, foram detectadas bandas de absorção características relacionadas ao grupo funcional (C=O), com valores de número de onda de  $1678 \text{ cm}^{-1}$  e  $1666 \text{ cm}^{-1}$ . Observou-se também vibrações de estiramento das ligações C-O nos constituintes moleculares do composto polissacarídeo de amido e glicerol. Picos de absorção com valores compreendidos entre  $1015 \text{ cm}^{-1}$  e  $1026 \text{ cm}^{-1}$  foram atribuídos ao estiramento das ligações C-O-C e C-O-H (Castillo *et al.*, 2019).

Com base nestes resultados e em comparação com os dados encontrados na literatura, observa-se que não há evidência de alterações químicas na estrutura da matriz polimérica ao incorporar fibras (Albinante; Pacheco; Visconte, 2013).

#### 4.4 Espessura

A fim de se obter uma média de espessura dos filmes, foi elaborado um gráfico com as amostras dos filmes T, C-1 e C-2 representadas na figura 26.

Figura 26- espessura média dos filmes obtidos dos corpos de prova do ensaio de tração



Fonte: Autora (2023).

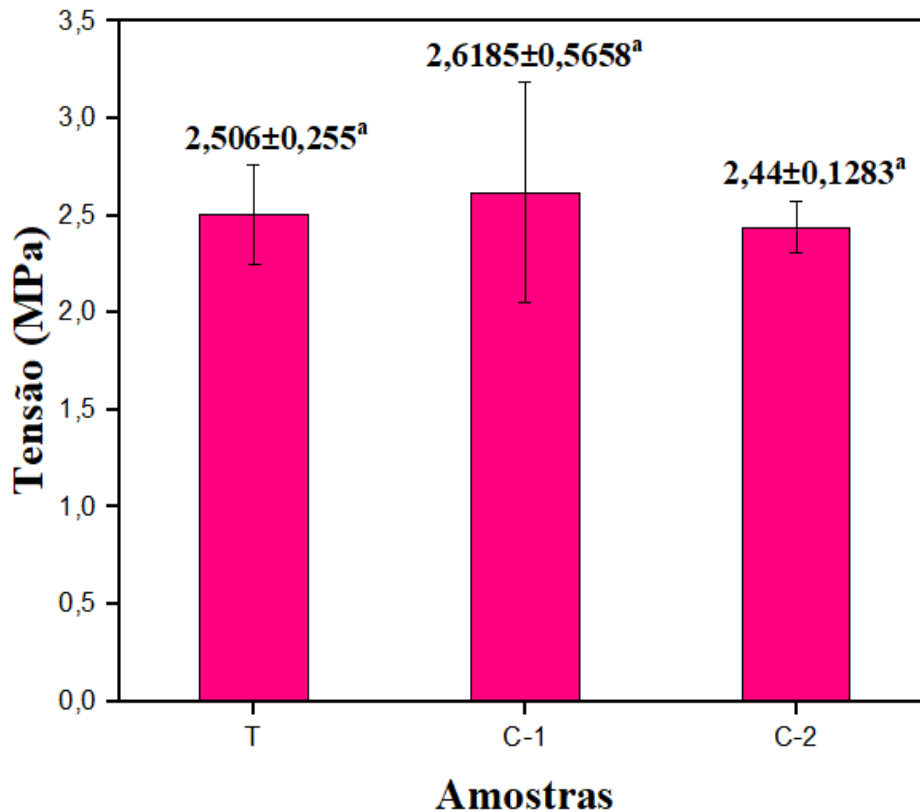
Na Figura 26 são apresentadas as espessuras médias dos filmes utilizados nos ensaios mecânicos. Observou-se que as amostras analisadas apresentaram espessuras diferentes em cada ponto de verificação, devido a uma leve variação na distribuição dos filmes no molde. Ao analisar as espessuras é possível verificar que os compósitos apresentaram-se levemente mais espessos que o amido termoplástico. Essa diferença pode ser atribuída à maior concentração de fibras nos compósitos. Entretanto, ao comparar os compósitos entre si, verifica-se que não houve diferença significativas entre eles, o que evidencia a boa dispersão das fibras no filme, juntamente com a reaglomeração das moléculas de amido e glicerol.

Nessa diretriz é importante destacar que a espessura exerce uma grande influência nas propriedades mecânicas dos filmes (Wu *et al.*, 2019). Os dados obtidos demonstram que o aumento da espessura dos compósitos está associado a boa resistência mecânica nos filmes. Revelando uma possível aplicação na indústria em diferentes contextos (Sobral, 2000)

#### 4.5 Teste mecânico de tração

No presente trabalho, as amostras de T, C-1 e C-2 passaram pelo ensaio mecânico de tração e o resultado de tenção pode ser observado na figura 27.

Figura 27- Resistência à tensão de ruptura do amido termoplástico (T), compósito com 5% de fibras (C-1) e com 10% de fibras (C-3). Médias seguidas por letras iguais não apresentaram diferença estatística significativa.



Fonte: Autora (2023).

A Figura 27 exhibe os valores de tensão para amostras T, C-1 e C-2. O teste de Duncan foi utilizado para verificar possíveis variações estatísticas na tensão das amostras. Através do teste de Duncan foi observado que não houve diferença estatística significativa para a tensão de T, C-1 e C-2.

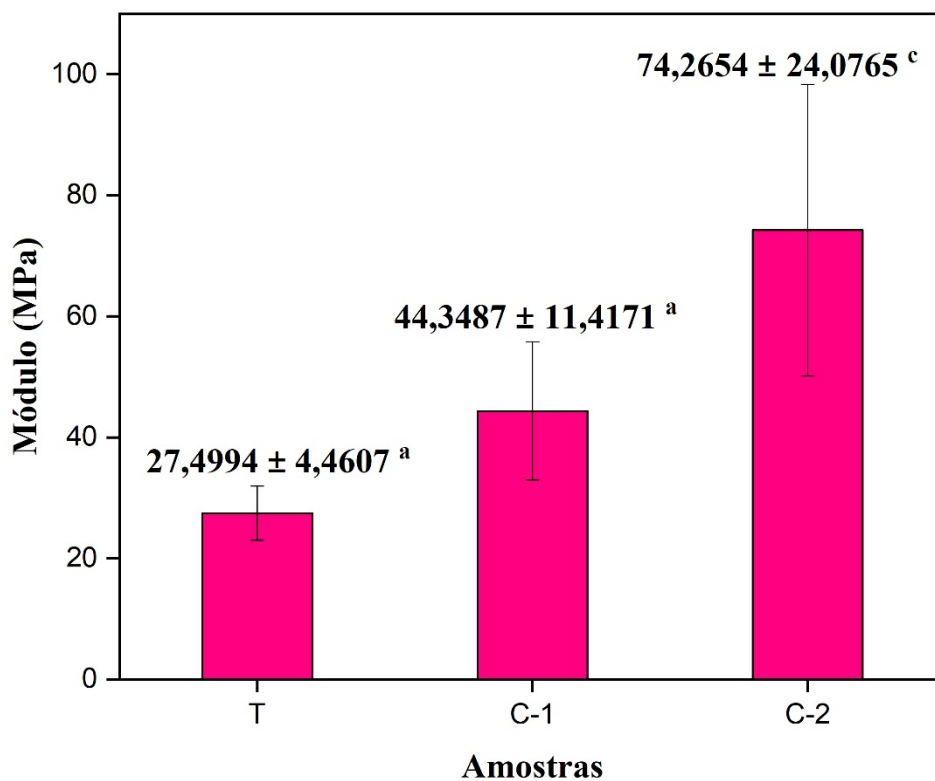
Os resultados obtidos estão em oposição aos estudos feitos por Jumaidin *et al.* (2020) que demonstraram um aumento no valor de resistência a tração em compósitos de fécula de mandioca termoplástica com até 5% de fibra de capim, indicando melhora significativa com esse percentual de fibras (Jumaidin *et al.*, 2020). Em virtude da diminuição das interações intermoleculares entre as cadeias de amido e as fibras, causada pela quantidade de plastificante usada na metodologia, ocorre a substituição das ligações de hidrogênio entre as moléculas de

amilose e amilopectina, causando a destruição da cristalinidade granular e aumento da molhabilidade entre as cadeias poliméricas do amido (Almeida, 2010; Tarique; Sapuan; Khalina, 2021). É importante ressaltar que existe uma quantidade ideal de plastificante para o amido, que varia de acordo com a origem do amido, tornando o amido termoplástico mais fluido e facilmente processável industrialmente (Moura *et al.*, 2021; Tarique; Sapuan; Khalina, 2021; Van Khoi *et al.*, 2023).

Os resultados indicam que a adição das fibras não provocou maiores alterações na tensão dos filmes. Tal resultado, pode ser atribuído a modificação da fibra e a quantidade de glicerol usada.

A figura 28 exibe os valores do módulo de elasticidade para as amostras T, C-1 e C-2.

Figura 28- Módulo de elasticidade do amido termoplástico (T), compósito com 5% de fibras (C-1) e com 10% de fibras (C-3). Médias seguidas por letras iguais não apresentaram diferença estatística significativa.



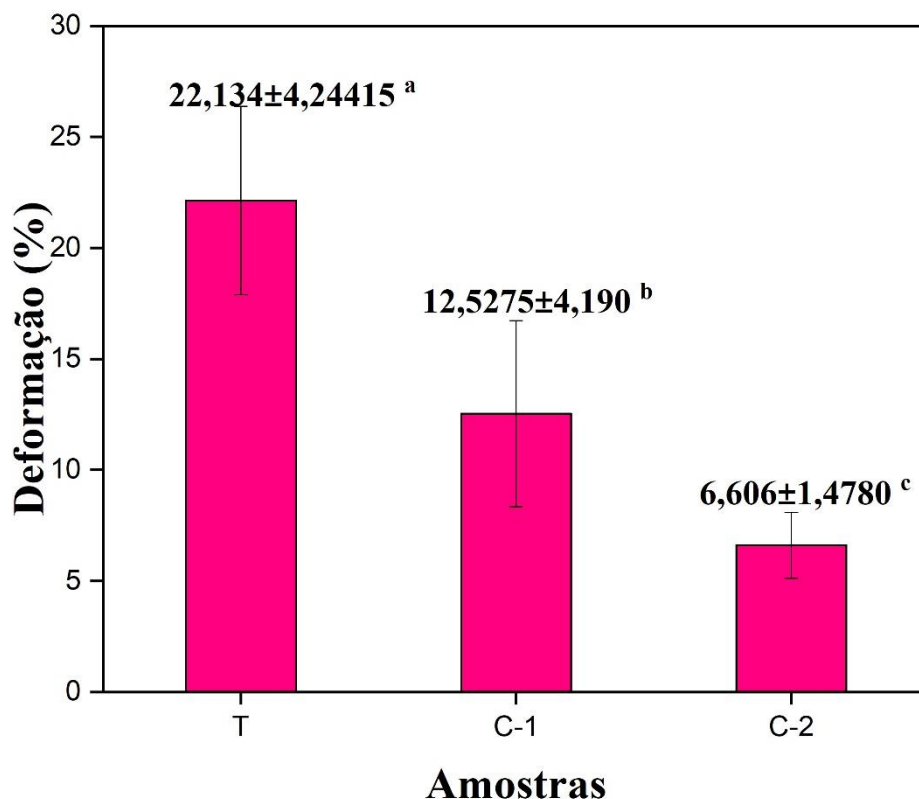
Fonte: Autora (2023).

O teste de Duncan foi aplicado para avaliar a diferença estatística significativa para o módulo de elasticidade dos filmes. Foi observado através do teste de Duncan que o módulo das amostras C-2 foi superior em relação as amostras de T e C-1.

É possível observar que ocorre aumento para o módulo com a adição de 10% de fibras ao filme de TPS. Este comportamento é indicativo que a adição de 10% de fibras aumentou a rigidez do compósito (Araújo *et al.*, 2009). Este aumento nos valores do módulo de elasticidade é associado ao aumento de resistência à tração, o que denota que as fibras de sisal atuaram reforçando a matriz polimérica.

A figura 29 apresenta os valores obtidos no ensaio mecânico para a deformação dos filmes T, C-1 e C-2.

Figura 29- Deformação do amido termoplástico (T), compósito com 5% de fibras (C-1) e com 10% de fibras (C-3). Médias seguidas por letras iguais não apresentaram diferença estatística significativa.



Fonte: Autora (2023).

O teste de Duncan revelou que existe uma diferença significativa entre T, C-1 e C-2. A amostra T apresentou maior deformação em comparação as amostras C-1 e C-2. Este resultado é esperado pois a incorporação da fibra de sisal provocou aumento na resistência à tração e tornou o material mais rígido, tendo em vista que as fibras se aderiram a matriz, causando maior rigidez aos filmes, tornando-o mais resistente à deformação. Pode-se constatar também que à medida que a proporção de fibras aumenta, a interação entre as fibras dentro do compósito

aumenta, resultando em menor ligação interfacial (Almeida, 2010; Jumaidin *et al.*, 2017; Abera Betelie *et al.*, 2019).

Resultados semelhantes foram encontrados na literatura para compósitos de amido termoplástico com fibras naturais (Jumaidin *et al.*, 2020). Assim, com base nos resultados de ensaio de tração revela o potencial uso de nossos compósitos para aplicações no setor de embalagens.

## 5 CONCLUSÃO

No presente estudo, fibras de sisal curtas foram obtidas após tratamento mecânico, alcalino e branqueamento. Os filmes de T, C-1 e C-2 foram obtidos satisfatoriamente através do método de solvente casting. Os filmes obtidos tiveram um aspecto visual translúcido e boa maleabilidade.

As curvas de TGA e DTG para T, C-1 e C-2, revelaram a presença de dois eventos térmicos, onde o primeiro evento foi atribuído a perda de umidade e o segundo foi descrito como degradação do amido e da celulose. Pequenas variações foram observadas para perfil de decomposição térmica em relação ao filme de amido termoplástico.

Os espectros de FTIR adquiridos para T, C-1 e C-2 não revelaram alterações para a composição da matriz polimérica. Para a espessura foi observado que a presença das fibras não causou mudanças significativas em relação a espessura para os filmes de T.

O ensaio de tração revelou que não houve diferença estatística significativa para a resistência dos filmes de T, C-1 e C-2. Um aumento para o módulo foi encontrado para a amostra C-2. Contudo uma menor deformação para C-1 e C-2 foi observada, o que foi atribuído a adição das fibras e evidenciando que as fibras atuaram como reforço para a matriz de amido.

Diante do exposto, os resultados encontrados neste estudo indicam que filmes compostos por amido de milho termoplastificado e fibras de sisal curtas apresentaram resultados esperados e os filmes com 5% de fibras podem ser mais indicados para aplicação no setor de embalagens.

## **6 SUGESTÕES**

- Variar a quantidade de fibras na matriz polimérica
- Realizar ensaio de intumescimento para os filmes obtidos
- Realizar ensaio de solubilidade para todas as amostras
- Realizar ensaio de umidade para as amostras obtidas neste estudo

## REFERÊNCIAS

- ABERA BETELIE, A. et al. **Mechanical properties of sisal-epoxy composites as functions of fiber-to-epoxy ratio.** *AIMS Materials Science*, v. 6, n. 6, p. 985–996, 2019.
- ABERA, G. et al. **The effect of plasticizers on thermoplastic starch films developed from the indigenous Ethiopian tuber crop Anchote (*Coccinia abyssinica*) starch.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 155, p. 581–587, jul. 2020.
- ABDILLAH, A. A.; CHARLES, A. L. **Characterization of a natural biodegradable edible film obtained from arrowroot starch and iota-carrageenan and application in food packaging.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 191, 2021.
- ADEWALE, P.; YANCHESHMEH, M. S.; LAM, E. **Starch modification for non-food, industrial applications: Market intelligence and critical review.** *Carbohydrate Polymers*, v. 291, p. 119590, set. 2022.
- ALASHEK, F.; KESHE, M.; ALHASSAN, G. **Preparation of glycerol derivatives by entered of glycerol in different chemical organic reactions: A review.** *Results in Chemistry*, v. 4, p. 100359, jan. 2022.
- ALBINANTE, S. R.; PACHECO, É. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y. **Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas.** *Química Nova*, v. 36, n. 1, p. 114–122, 2013.
- ALMEIDA, C. B. D. **Características estruturais e funcionais de biofilmes produzidos com zeína e óleos vegetais comestíveis.** 2010.
- ALREFAI, R. et al. **A Review on the Production of Thermo-Plastic Starch From the Wastes of Starchy Fruits and Vegetables.** Em: *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*. Elsevier, 2022. p. 89–104.
- ARAÚJO, S. S. et al. **Efeito da modificação da fibra nas propriedades mecânicas de compósitos pp/sisal processados por extrusão.** 2010.
- Araújo, S. P. C. **Avaliação da eficácia de diferentes estabilizadores do peróxido de hidrogénio no branqueamento de fibras celulósicas.** 2019. 99 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mestrado em Química Têxtil, Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Minho, 2019
- AWAIS, H. et al. **Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review.** *Composites Part C: Open Access*, v. 4, p. 100082, mar. 2021.
- BARUAH, J.; DEKA, R. C.; KALITA, E. **Greener production of microcrystalline cellulose (MCC) from *Saccharum spontaneum* (Kans grass): Statistical optimization.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 154, p. 672–682, jul. 2020.
- BARROS, L. P. R. C. **Obtenção de nano celulose por hidrólise ácida e enzimática de fibras de algodão de resíduos de tecido tingido com corante índigo.** 2017. p. 125. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. PPGEM/UFRN, Natal-RN, 2017.

BELTRAMI, L. V. R.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J. Efeito do tratamento alcalino de fibras de curauá sobre as propriedades de compósitos de matriz biodegradável. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, v. 24, n. 3, p. 388–394, 2014.

BELTRÁN-SANAHUJA, A. et al. Degradation of conventional and biobased plastics in soil under contrasting environmental conditions. **Science of The Total Environment**, v. 787, p. 147678, set. 2021.

BISANDA, E. **The Effect of Alkali Treatment on the Adhesion Characteristics of Sisal Fibers**. 2000.

BRITO, E. S. DE. **Desenvolvimento de filmes biodegradáveis de amido incorporados com fibra de mandioca e de agave**. 2019.

CAO, P. et al. Effects of amylose and amylopectin molecular structures on starch electrospinning. **Carbohydrate Polymers**, v. 296, p. 119959, nov. 2022.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais UMA INTRODUÇÃO**. 9. ed. Rio Grande do Sul: Livros Técnicos e Científicos, p. 910, 2016.

CAMPOS, A. et al. The influence of UV-C irradiation on the properties of thermoplastic starch and polycaprolactone biocomposite with sisal bleached fibers. **Polymer Degradation and Stability**, v. 97, n. 10, p. 1948–1955, out. 2012.

CARMONA, V. B. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**. 2011.

CASTILLO, L. A. et al. Crystalline morphology of thermoplastic starch/talc nanocomposites induced by thermal processing. **Heliyon**, v. 5, n. 6, p. 01877, jun. 2019.

CASTOLDI, R. D. S. et al. Effect of alkali treatment on physical–chemical properties of sisal fibers and adhesion towards cement-based matrices. **Construction and Building Materials**, v. 345, p. 128363, ago. 2022.

CASTRO, M. V. B. S. et al. **DESENVOLVIMENTO DE FILME ATIVO BIODEGRADÁVEL DE AMIDO DE ARARUTA INCORPORADO COM ÓLEO ESSENCIAL DE CANELA**. 2020. Tese (Mestre) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências, UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, Recife 2020.

CAVALCANTI, W. M. **produção e caracterização de painéis compósitos constituídos de resíduos lignocelulósicos e misturas de resinas epóxi sintética e de óleo vegetal residual epoxidado**. 2022.

**CONAB: Análise mensal- mercado do sisal**. Brasília, jun. 2023. Disponível em: [https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-sisal/item/download/48511\\_fc15e6b02e061bfc2991576373e546d2](https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-sisal/item/download/48511_fc15e6b02e061bfc2991576373e546d2). Acesso em: 21 out. 2023.

CUI, C. et al. Bioactive and intelligent starch-based films: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 116, p. 854–869, out. 2021.

CUNHA, A. L. **CARACTERIZAÇÃO DO AMIDO DA ARARUTA TIPOS SETA E REDONDA, VISANDO UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS.** 2016.

CYRAS, V. P.; MANFREDI, L. B.; TON-THAT, M.; VÁZQUEZ, A. 2008. **Physical and mechanical properties of thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposite films.** Carbohydrate Polymers, Vol. 73, p. 55-63, 2008.

DALAGNOL, R. D.; FRANCISQUETTI, E. L.; SANTANA, R. M. C. Influence of alternative polymeric plasticizer to DOP in thermal and dynamic-mechanical properties of PVC. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 2, p. e13183, 2022.

D'ALMEIDA, A. L. F. S. et al. Acetilação da fibra de bucha (*Luffa cylindrica*). **Polímeros**, v. 15, n. 1, p. 59–62, 2005.

DE ALMEIDA NASCIMENTO, J. A. et al. Physico-Chemical, Mechanical and Morphological Properties of Biodegradable Films Based on Arrowroot Starch and Poly(vinyl alcohol). **Journal of Macromolecular Science, Part B**, v. 60, n. 12, p. 1045–1068, 2 dez. 2021.

DE CAMPOS, A. et al. Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio, Embrapa - São Carlos. v. 21, 2011.

DEMOSTHENES, L. C. D. C. et al. Thermal and structural characterization of buriti fibers and their relevance in fabric reinforced composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 1, p. 115–123, jan. 2020.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. 2009, Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. *Ciência Rural*, Vol 39, n. 3, p.945-954, 2009.

DONMEZ, D. et al. Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: starch gelatinization and retrogradation. **Current Opinion in Food Science**, v. 39, p. 103–109, jun. 2021.

ESMAEILI, M.; PIRCHERAGHI, G.; BAGHERI, R. Optimizing the mechanical and physical properties of thermoplastic starch via tuning the molecular microstructure through co-plasticization by sorbitol and glycerol: Optimizing the properties of thermoplastic starch. **Polymer International**, v. 66, n. 6, p. 809–819, jun. 2017.

ESTRADA-MONJE, A. et al. **Thermoplastic Starch-Based Blends with Improved Thermal and Thermomechanical Properties.** *Polymers*, v. 13, n. 23, p. 4263, 6 dez. 2021.

**EMBRAPA: Território Sisal.** Brasília, 09 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/caracteristicas-do-territorio/localizacao>. Acesso em: 21 out. 2023

FALUA, K. J. et al. **Valorization of Starch to Biobased Materials: A Review.** *Polymers*, v. 14, n. 11, p. 2215, 30 maio 2022.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, nov. 2012.

FERNANDES, A. D. S. et al. Elaboração e Caracterização de Filmes Biodegradáveis de Amido de *Solanum lycocarpum* St. Hill e Glicerol. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 8, n. 1, p. 362–378, 22 fev. 2019.

FIORE, V.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. **The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites. Composites Part B: Engineering**, v. 68, p. 14–21, jan. 2015.

FURTADO, J. B. D. M. et al. Enhancement of the Photodegradative Potential of Polymer Composites Containing Babassu Fiber. **Materials Research**, v. 23, n. 2, p. e20190438, 2020.

FURTADO, J. B. DE M. et al. **Caracterização Química da Fibra do Caule da Palmeira de Babaçu Natural e Após Tratamento. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, 2020.

HADIMANI, S. et al. Biodegradable hybrid biopolymer film based on carboxy methyl cellulose and selenium nanoparticles with antifungal properties to enhance grapes shelf life. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 237, p. 124076, maio 2023.

JUMAIDIN, R. et al. Effect of seaweed on mechanical, thermal, and biodegradation properties of thermoplastic sugar palm starch/agar composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 99, p. 265–273, jun. 2017.

JUMAIDIN, R. et al. Effect of cogon grass fibre on the thermal, mechanical and biodegradation properties of thermoplastic cassava starch biocomposite. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 146, p. 746–755, mar. 2020.

KHOI, N. V. et al. Study on characteristics of thermoplastic starch based on Vietnamese arrowroot starch plasticized by glycerol. **Vietnam Journal of Chemistry**, 2023.

KUNDURU, K. R. et al. Renewable polyol-based biodegradable polyesters as greener plastics for industrial applications. **Chemical Engineering Journal**, v. 459, p. 141211, mar. 2023.

LEMOS, A. L. D.; MARTINS, R. M. D. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Poliméricos à Base de Poli(Ácido Lático) e Fibras Naturais. Polímeros Ciência e Tecnologia**, v. 24, n. 2, p. 190–197, 2014.

LITAIFF, Hannah Alagoas. **Influência da mercerização em fibras de malva nas propriedades físico-mecânicas de compósito à base de polipropileno**. 2023. 83 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023.

LI, J. et al. The location of octenyl succinate anhydride groups in high-amylose maize starch granules and its effect on stability of pickering emulsion stability. **LWT**, v. 169, 2022.

LOPES, F. F. M. et al. Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 7, p. 783–788, jul. 2010.

Lu, X.; Zhang, M. Q.; Rong, M. Z.; Shi, G.; Yang, G. C. Self-reinforced melt processable composites of sisal. **Composites Science and Technology**, v.63, p.177-186, 2003

MARTIN, A. R. et al. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade *Agave sisalana*. **Polímeros**, v. 19, n. 1, p. 40–46, 2009.

MACHADO, M. P.; MENCHISE, C. A.; BANDEIRA, C. F.. **Desenvolvimento de Compósito Polimérico Reforçado com Fibras de Coco**. EXATAS, ENGENHARIAS E TECNOLOGIAS, p. 64, 2021.

MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. 2010. Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. Semina: Ciências Agrárias, Vol 31, n.1.

MEDEIROS, Jackson Andson de; NIRO, Carolina Madazio. **Produção Animal e Vegetal: Inovações e Atualidades**. 2. ed. São Paulo: Agron Food Academy, 2022. 984 p.

MENDES, J. F. Extrusão de filmes biodegradáveis de amido de milho termoplástico adicionado de quitosana plastificada. 2017. 90f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Biomateriais. UFLA, Lavras-MG, 2017.

MEGIATTO JUNIOR, Jackson Dirceu. **FIBRAS DE SISAL: ESTUDO DE PROPRIEDADES E MODIFICAÇÕES QUÍMICAS VISANDO APLICAÇÃO EM COMPÓSITOS DE MATRIZ FENÓLICA**. 2006. 272 f. Tese (Doutorado) - Curso de Físico-Química, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MENEZES, P. L. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE CENTRO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.2018.

MILFONT, C. H. R. **EFEITO DO ÓLEO DE COCO E DA NANOARGILA NO PROCESSAMENTO E NAS PROPRIEDADES DE AMIDO TERMOPLÁSTICO**. 2021.

MINA H., JOJE H. 2012. **Caracterización físico-mecánica de un almidón termoplástico (TPS) de yuca y análisis interfacial com fibras de fique**. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, Vol 10, p.99-109, 2012.

MOHAMMED, A. A. B. A. et al. Wheat Biocomposite Extraction, Structure, Properties and Characterization: A Review. **Polymers**, v. 13, n. 21, p. 3624, 21 out. 2021.

MOHD NIZAM, N. H. et al. Physical, thermal, mechanical, antimicrobial and physicochemical properties of starch based film containing aloe vera: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 1572–1589, nov. 2021.

MOURA, C. V. R. D. et al. New biodegradable composites from starch and fibers of the babassu coconut. **Polímeros**, v. 31, n. 1, p. e2021007, 2021.

MUSSATTO, S. I.; FERNANDES, M.; ROBERTO, I. C. Lignin recovery from brewer's spent grain black liquor. **Carbohydrate Polymers**, v. 70, n. 2, p. 218–223, set. 2007.

NORDIN, A. H. et al. Starch-based plastics: A bibliometric analysis. **Materials Today: Proceedings**, v. 74, p. 519–523, 2023.

NUNES, J. V. D. S. et al. Caracterização mecânica e morfológica de fibras de coco tratadas superficialmente para utilização como reforço em polímeros. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 2, p. e20220046, 2022.

NUNES, J. V. DA S. **Quim. Nova**, v. 41, n. 9, p. 1006–1010, 2018.

OLIVEIRA, M. R. D. **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA**. 2017.

OLIVEIRA, C. F. P. **Obtenção e caracterização de amido termoplástico e suas misturas com polipropileno. Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

OTHMAN, S. H. 2014. Bio-nanocomposite materials for food packaging applications: types of biopolymer and nano-sized filler. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Vol. 2, 2014.

PADILHA, Amanda Cristina. **PRODUÇÃO DE EMBALAGEM BIODEGRADÁVEL A BASE DE AMIDO DE MANDIOCA E GELATINA PARA APLICAÇÃO EM PRODUTOS ALIMENTÍCIOS**. 2019. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento Acadêmico de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2019.

PARK, J. B.; BRONZINO, J. D. (EDS.). **Biomaterials: principles and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2002.

PARKER, R.; RING, S. G. Aspects of the Physical Chemistry of Starch. **Journal of Cereal Science**, v. 34, n. 1, p. 1–17, jul. 2001.

PEREIRA, W. A. et al. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti. Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 1, p. e12932, 2021.

PINTO, Carolina del Pilar; CÉSAR, Sandro; FERNANDES, Ricardo. **Influencia das fibras de sisal no comportamento termico dos compositos com matriz de gesso. The Journal Of Engineering And Exact Sciences**. Bahia, 18 abr. 2022. p. 1-6. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec>. Acesso em: 20 out. 2023.

RAMIREZ, M. G. L. **Desenvolvimento de biocompósitos de amido termoplástico reforçados por fibra de coco verde**. 2011. 148f. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal. UFPR/ Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, 2011.

R., Roberta C.; ANDRADE, Cristina T.. **Investigação dos Processos de Gelatinização e Extrusão de Amido de Milho. Polímeros: Ciência e Tecnologia**. Rio de Janeiro, p. 24-30. 30 nov. 1999.

RAHARJO, W. W. et al. The Influence of Chemical Treatments on Cantala Fiber Properties and Interfacial Bonding of Cantala Fiber/Recycled High Density Polyethylene (rHDPE). **Journal of Natural Fibers**, v. 15, n. 1, p. 98–111, 2 jan. 2018.

ROCHA, M. D. et al. Effects of agar films incorporated with fish protein hydrolysate or clove essential oil on flounder (*Paralichthys orbignyanus*) fillets shelf-life. *Food Hydrocolloids*, v. 81, 2019.

ROP, K. et al. Biodegradable water hyacinth cellulose-graft-poly(ammonium acrylate-co-acrylic acid) polymer hydrogel for potential agricultural application. **Heliyon**, v. 5, n. 3, p. e01416, mar. 2019.

SANCHEZ, E. M. S. et al. Cana - de - Açúcar : Influência do Tratamento das Fibras nas Propriedades Unsaturated Polyester Resin Composite with Sugar Cane Bagasse : Influence of Treatment. **Polímeros**, v. 20, p. 194–200, 2010.

SANCHEZ-SALVADOR, J. L. et al. Chitosan grafted/cross-linked with biodegradable polymers: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 178, p. 325–343, maio 2021.

SEUNG, D. Amylose in starch: towards an understanding of biosynthesis, structure and function. **New Phytologist**, v. 228, n. 5, p. 1490–1504, dez. 2020.

SILVA, Patrícia Venâncio da. **COMPÓSITOS COM FIBRAS DE SISAL E CAROÁ COM LICOR PIROLENHOSO EM MATRIZ CIMENTÍCIA COM METACAULIM**. 2022. 118 f. Tese (Doutorado) - Curso de M Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Pb, 2022.

SOBRAL, P. J. D. A. Influência da espessura de biofilmes feitos à base de proteínas miofibrilares sobre suas propriedades funcionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 6, p. 1251–1259, jun. 2000.

SOUZA, Roberta C. R.; ANDRADE, Cristina T. Investigação dos Processos de Gelatinização e Extrusão de Amido de Milho: gelatinização e extrusão de amido. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 10, p. 1-7, 30 nov. 1999.

Śołek-tryznowska, Z. ; KAŁUŚA, A.. The Influence of Starch Origin on the Properties of Starch Films: packaging performance. **Materials**, Suíça, v. 14, n. 5, p. 1146, 28 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14051146>.

SURYANTO, H. et al. **Efeito da mercerização nas propriedades do mendong (Fimbristylis globulosa) fibra**.2018.

SYAFRI, E. et al. Effect of sonication time on the thermal stability, moisture absorption, and biodegradation of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) nanocellulose-filled bengkuang (*Pachyrhizus erosus*) starch biocomposites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 6, p. 6223–6231, nov. 2019.

TARIQUE, J. et al. Recent developments in sustainable arrowroot (*Maranta arundinacea* Linn) starch biopolymers, fibres, biopolymer composites and their potential industrial applications: A review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 1191–1219, jul. 2021.

TARIQUE, J.; SAPUAN, S. M.; KHALINA, A. Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 13900, 6 jul. 2021.

TAVARES, A. R. D. Universidade federal do pará campus universitário de ananindeua faculdade de engenharia de materiais. 2018.

TEIXEIRA, E. DE M. et al. Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio – Embrapa – São Carlos. v. 21, 2011.

Tserki, V.; Zafeiropoulos, N. E.; Simon, F.; Panayiotou, C. A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v.36, p.1110-1118, 2005.

VIJAY, R. et al. Characterization of raw and alkali treated new natural cellulosic fibers from *Tridax procumbens*. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 125, p. 99–108, mar. 2019.

VIEIRA, M. G. A.; et al. **Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review**. *European Polymer Journal*, v. 47, p.263, 2011.

WEBER, F. H.; COLLARES-QUEIROZ, F. P.; CHANG, Y. K. Caracterização físico-química, reológica, morfológica e térmica dos amidos de milho normal, ceroso e com alto teor de amilose. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 4, p. 748–753, dez. 2009.

WU, Z. et al. Physical properties and structural characterization of starch/polyvinyl alcohol/graphene oxide composite films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 123, p. 569–575, fev. 2019.