



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Produção de embalagens biodegradáveis usando
biocompósito de matriz polimérica e reforçadas com fibras
lignocelulósicas de resíduos vegetais**

Autor:

João Edilson Joaquim Pery

Supervisor:

Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe, Eng.º

Maputo, Setembro de 2024

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Produção de embalagens biodegradáveis usando
biocompósito de matriz polimérica e reforçadas com fibras
lignocelulósicas de resíduos vegetais**

Autor: João Edilson Joaquim Pery

Supervisor:

Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe, Eng.º

Maputo, Setembro de 2024

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante João Edilson Joaquim Pery entregou no dia ___/___/2024 as 5 copias do relatório do seu trabalho de licenciatura com a referência: _____ intitulado:

Produção de embalagens biodegradáveis usando biocompósito de matriz polimérica e reforçadas com fibras lignocelulósicas de resíduos vegetais

Maputo ___ de ___ de 2024

Chefe da secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, João Edilson Joaquim Pery, declaro por minha honra que o presente trabalho de Licenciatura foi inteiramente por mim elaborado. O autor não recorreu em quaisquer outras circunstâncias a fontes que não tenham sido indicadas na referência bibliográfica, e todas as formulações e conceitos utilizados quer adoptados literalmente ou a partir das suas ocorrências originais encontram-se devidamente citados e identificados.

Maputo, Agosto de 2024

O Autor

(João Edilson Joaquim Pery)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à memória do meu irmão, **Salomão Edson Joaquim Pery**, que sempre me manteve no caminho certo, oferecendo apoio e incentivo para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje.

Dedico este trabalho ao meu pai **Pery, Joaquim Luciano**, cuja dedicação incansável, esforço constante e compromisso inabalável com a minha educação foram fundamentais para a minha formação. Seu exemplo de perseverança e determinação me moldou como pessoa e me inspirou a alcançar este importante marco na minha vida acadêmica. A ele, minha eterna gratidão e reconhecimento por tudo o que fez e continua a fazer por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força de vontade que me concede a cada dia e pelo dom da vida, que me permite continuar trilhando este maravilhoso caminho da academia.

Aos meus pais, Pery Joaquim Luciano, Rute Massarirene Mubango, e Isalda Mulieca António Palange, pela concepção, amor, orientação e pelos preciosos ensinamentos que me guiaram até aqui.

À minha família, especialmente aos meus irmãos, Salomão Edson Joaquim Pery, Jackeline da Isalda Joaquim Luciano, Deysy e Eliseu Bachir, pelo apoio, amor e carinho.

Ao meu supervisor, Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe Eng^o., que, mesmo em meio a tantas actividades e compromissos, mostrou-se incansável na ajuda para a interpretação dos resultados, orientando-me detalhadamente na compilação deste trabalho. Agradeço pela confiança, paciência e dedicação acima de tudo.

Quero, expressar minha profunda gratidão aos meus colegas e amigos de turma da geração 2020, que compartilharam comigo essa jornada de aprendizado, enfrentando desafios e celebrando conquistas. Cada conversa, cada trabalho em grupo e cada momento de companheirismo foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e académico.

Aos meus amigos da residência universitária, meu sincero agradecimento por tornarem os dias mais leves e alegres. A convivência diária, o apoio mútuo e a amizade que construímos ao longo desse período foram essenciais para que eu pudesse seguir em frente com determinação e confiança.

Aos funcionários do DEQui, nomeadamente, Eng.^a Virgínia Gongole, Dr. Nazira Chirindza e Dr.^a Victória, meus mais sinceros agradecimentos por toda a assistência e apoio técnico durante as experiências realizadas.

EPÍGRAFE

“Na engenharia química, o desafio é converter a matéria-prima da natureza em progresso, sem nunca esquecer que a natureza também é nossa matéria-prima.”

Richard H. Wilhelm, Engenheiro Químico.

RESUMO

O crescimento populacional global tem aumentado significativamente a produção de resíduos sólidos urbanos. Em países de baixa renda, como Moçambique, aproximadamente 56% dos resíduos são compostos por alimentos e vegetais, causando danos ambientais quando descartados inadequadamente. O uso de plásticos de uso único, como o EPS (poliestireno expandido), comumente usado em embalagens de *fast food*, agrava ainda mais a poluição devido à baixa biodegradabilidade. Diante deste contexto, a valorização de resíduos fibrosos vegetais para embalagens biodegradáveis surge como uma alternativa promissora.

Este estudo teve como objectivo produzir embalagens biodegradáveis usando biocompósito de amido de mandioca reforçadas por fibras lignocelulósicas de bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho e capim-elefante. Inicialmente, os biocompósitos foram produzidos em forma de placas em diferentes geometrias pelo processo de moldagem manual, depois avaliados para selecção dos mais próximos ao EPS com base nas suas propriedades com formulações de controle contendo amido de mandioca e bagaço de cana-de-açúcar, e posteriormente incorporando de 10% a 30% das outras fibras.

Os biocompósitos apresentaram densidades entre 0,263 e 0,320 g/cm³ e coloração amarelada. As micrografias ópticas mostraram boa distribuição das fibras nas formulações com palha de milho, enquanto as com capim-elefante apresentaram distribuição inferior devido à incompatibilidade com o amido e o bagaço de cana-de-açúcar. Todos os biocompósitos exibiram maior absorção de água em comparação ao EPS, especialmente os que continham capim-elefante. A adição de fibras de bagaço de cana e palha de milho trouxeram rigidez e integridade à matriz do amido. Devido aos altos níveis de NO₂ (aproximadamente 2,5 ppm) emitidos, sugere-se a compostagem dos resíduos desses biocompósitos, valorizando o nitrogénio para a produção de biofertilizantes. Os protótipos das embalagens foram feitos com amido, bagaço de cana-de-açúcar e palha de milho por estes terem apresentado propriedades próximas ao EPS. Os resultados mostraram que as fibras lignocelulósicas de resíduos vegetais apresentam um grande potencial para serem utilizados na produção de embalagens biodegradáveis.

Palavras-chave: Resíduos vegetais, poliestireno expandido, biocompósito e embalagens biodegradáveis.

ABSTRACT

Global population growth has significantly increased the production of urban solid waste. In low-income countries like Mozambique, around 56% of waste consists of food and vegetable matter, causing environmental harm when improperly disposed of. The use of single-use plastics, such as expanded polystyrene (EPS), commonly used in fast food packaging, further exacerbates pollution due to its low biodegradability. In this context, the valorization of fibrous plant waste for biodegradable packaging emerges as a promising alternative.

This study aimed to produce biodegradable packaging using cassava starch-based biocomposites reinforced with lignocellulosic fibers from sugarcane bagasse, corn straw, and elephant grass. Initially, the biocomposites were produced in sheet form with different geometries through manual molding. They were then evaluated to select those with properties closest to EPS, based on formulations of cassava starch and sugarcane bagasse, subsequently incorporating 10% to 30% of the other fibers.

The biocomposites exhibited densities between 0.263 and 0.320 g/cm³ and a yellowish coloration. Optical micrographs showed good fiber distribution in the corn straw formulations, while those with elephant grass showed less uniform distribution due to incompatibility with starch and sugarcane bagasse. All biocomposites demonstrated higher water absorption compared to EPS, especially those containing elephant grass. The addition of sugarcane bagasse and corn straw fibers provided rigidity and structural integrity to the starch matrix. Due to the high NO₂ emission levels (approximately 2.5 ppm), composting of these biocomposite residues is recommended to utilize nitrogen in biofertilizer production. Packaging prototypes were made with starch, sugarcane bagasse, and corn straw, as they displayed properties most similar to EPS. The results indicate that lignocellulosic plant waste fibers hold substantial potential for use in biodegradable packaging production.

Keywords: Plant waste, expanded polystyrene, biocomposite, biodegradable packaging.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
EPÍGRAFE	iii
RESUMO.....	iv
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGNIFICADOS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS	xi
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. MOTIVAÇÃO	2
1.3. JUSTIFICATIVA	2
1.4. OBJECTIVOS.....	3
1.4.1. Geral.....	3
1.4.2. Específicos.....	3
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	3
1.6. METODOLOGIA.....	4
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. CENÁRIO MUNDIAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	5
2.2. PLÁSTICOS E EMBALAGENS PLÁSTICAS	6
2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS EM MOÇAMBIQUE	8
2.4. POLIESTIRENO EXPANDIDO	9
2.5. DESAFIOS DO PÓS-USO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO	9
2.6. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	11
2.7. EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS	11
2.8. MATERIAIS BIODEGRADÁVEIS USADOS EM EMBALAGENS.....	11
2.8.1. Amido	13
2.8.2. Fibras naturais.....	15
2.8.3 Fibras lignocelulósicas	15
2.8.4. Glicerol como agente plastificante nos filmes de amido	19
2.9. PROCESAMENTO E APLICAÇÃO DE BIOCAMPÓSIOS.....	19
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1. EXTRACÇÃO DOS FARELOS E PRODUÇÃO DOS BIOCAMPÓSITOS	21
3.1.1. Matérias-primas.....	21
3.1.2. Métodos.....	21
3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS FARELOS	24
3.2.1. Ensaio de cor dos farelos	24

3.2.2. Densidade real dos farelos	25
3.2.3. Proteína bruta dos farelos	26
3.2.4. Série de sólidos dos farelos	27
3.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS BIOCOMPÓSITOS.....	28
3.3.1. Ensaio de cor dos biocompósitos	28
3.3.2. Densidade aparente dos biocompósitos.....	29
3.3.3. Solubilidade em água dos biocompósitos	29
3.3.4. Microscopia óptica dos biocompósitos	30
3.3.5. Propriedades mecânicas dos biocompósitos	31
3.3.6. Teste de biodegradabilidade dos biocompósitos.....	32
3.3.7. Teste de ataque químico dos biocompósitos	32
3.3.8. Gases emitidos após a combustão dos biocompósitos.....	33
3.3. PRODUÇÃO DOS PRÓTIPOIS PARA EMBALAGEM.....	34
CAPÍTULO 4: ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	35
4.1. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PARA OS FARELOS	35
4.1.3. Proteína bruta para os farelos	37
4.1.4. Série de sólidos para os farelos	38
4.1.5. Possíveis implicações para aplicações em embalagens.....	39
4.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PARA OS BIOCOMPÓSITOS .	40
4.2.1. Ensaio de cor para os biocompósitos.....	40
4.2.2. Densidade aparente para os biocompósitos.....	42
4.2.3. Solubilidade em água para os biocompósitos.....	44
4.2.4. Microscopia óptica para os biocompósitos	46
4.2.5. Propriedades mecânicas para os biocompósitos.....	48
4.2.6. Teste de biodegradabilidade os biocompósitos	50
4.2.7. Ataque químico para os biocompósitos	52
4.2.8. Gases emitidos após a combustão.....	53
4.3. SELECÇÃO DO BIOCOMPÓSITO E ELABORAÇÃO DO PROTÓTIPO DA EMBALAGEM	55
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	56
5.1. CONCLUSÕES	56
5.2. RECOMENDAÇÕES	57
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFIAS	58
6.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
6.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	64

LISTA DE SIMBOLOS, ABREVIACOES E SIGNIFICADOS

a* e b*	Parâmetros de Cromaticidade da Amostra
B	Volume do Branco
BC	Bagaço de Cana-de-Açúcar
C	Carbono
CE	Capim Elefante
CE10, 20 e 30	Biocompósito de Amido/Bagaço de Cana-de-Açúcar + Capim Elefante (10%, 20%, e 30%)
C*	Chroma
DEQ	Departamento de Engenharia Química
E	Módulo de Young
EPS	Poliestireno Expandido
g	Gramas
H	Hidrogénio
HAPs	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
h ⁰	Matiz
Kg	Quilograma
Kg/m ³	Quilograma por Metro Cúbico
m _{amostra}	Massa da Amostra
mm	Milímetro
N ₂	Nitrogénio
O ₂	Oxigénio
PE-HD	Polietileno de Alta Densidade
PE-LD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietilenotereftalato
pH	Potencial Hidrogeniónico
PM	Palha de Milho
PM10, 20 e 30	Biocompósito de Amido/Bagaço de Cana-de-Açúcar + Palha de Milho (10%, 20%, e 30%)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinil
SF	Sólidos Fixos/Cinzas

ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
UEM	Universidade Eduardo Mondlane
V	Volume da Solução Titulada
W	Peso da Amostra em Gramas
ρ	Densidade da Amostra
ΔE	Diferença Total de Cor
$\Delta \varepsilon$	Varição da Deformação
$\Delta \sigma$	Varição da Tensão
%	Percentagem
%N	Teor de Nitrogénio na Amostra
%P.B	Teor Total de Proteína Bruta
%S	Teor de Água Absorvida

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Análise global dos resíduos sólidos; (b) Composição dos resíduos em países de baixa renda.....	5
Figura 2: Políticas Globais de Redução de embalagens Plásticas.....	6
Figura 3: Gestão de resíduos plásticos em Moçambique.....	8
Figura 4: (a) Embalagens de EPS do tipo Bandeja; (b) Poliestireno expandido em outras formas.....	10
Figura 5: Classificação dos polímeros biodegradáveis.....	12
Figura 6: Estrutura do amido	13
Figura 7: Comportamento do amido em relação à viscosidade e temperatura.....	14
Figura 8: Classificação de fibras vegetais.	15
Figura 9: Constituintes da fibra lignocelulósicas.....	15
Figura 10: (a) Desenho esquemático da cana de açúcar íntegra; (b) Composição da fibra do bagaço	16
Figura 11: Estrutura da espiga de milho.....	17
Figura 12: (a) Morfologia da folha de capim-elefante; (b) Entrenós do Capim Elefante.....	18
Figura 13: Estrutura de glicerol.....	19
Figura 14: Materiais biodegradáveis e seus similares plásticos.	20
Figura 15: Fluxograma do preparo das matéria-prima.	21
Figura 16: Fluxograma do processo de produção.	22
Figura 17: (a) Calorímetro Minolta Color Reader ; (b) Espaço CIE Lab*.....	24
Figura 18: (a) Picnómetro; (b) Balança analítica.	25
Figura 19: (a) Bloco de Kjeldahl para digestão; (b) Destilador; c) Titulador.	26
Figura 20: (a) Cadinho; (b) Balança analítica; (c) Mufla.	27
Figura 21: (a) Imersão do Biocompósito na água; (b) Agitação esporádica.	29
Figura 22: Microscópio óptico Olympus SC29.....	30
Figura 23: (a) Antes de ser submetido a tracção ; (b) Depois de submetido a tracção.	31
Figura 24: (a) Húmus de minhoca; (b) Conteúdo no interior da embalagem.....	32
Figura 25: Ataque químico.....	32
Figura 26: (a) Analisador de gases; (b) Compósito no processo de queima.	33
Figura 27: Fluxograma de produção da embalagem.	34
Figura 28: Palha de milho, capim elefante e bagaço de cana-de-açúcar.....	35
Figura 29: Resultado do ensaio de densidade.	36

Figura 30: Resultados do teor de Proteína Bruta.	37
Figura 31: Resultado de série de sólidos; (a) bagaço de cana de-açúcar; (b) palha de milho (c) capim elefante.....	38
Figura 32: EPS e biocompósitos.	40
Figura 33: Resultados da densidade aparente.	42
Figura 34: Resultados de solubilidade em água.....	44
Figura 35: Resultados de microscopia óptica.....	46
Figura 36: Resultados do ensaio de tracção.	48
Figura 37: Resultado do teste de biodegradabilidade.	50
Figura 38: Biodegradabilidade dos biocompósitos.	51
Figura 39: (a) Estável; (b) Parcialmente estável; (c) Instável.	52
Figura 40: Resultados de emissão do gás carbónico.	53
Figura 41: Resultados de emissão de NO ₂ e SO ₂	54
Figura 42 : Protótipos de embalagens.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Código de classificação de polímeros, estruturas e aplicações.....	7
Tabela 2: Tempo de degradação de materiais descartados em aterros.....	10
Tabela 3: Formulações dos compósitos.....	23
Tabela 4: Limites máximos de emissão de gases poluentes.....	33
Tabela 5: Parâmetros de cor dos farelos.....	35
Tabela 6: Ensaio de cor dos Biocompósitos.....	41
Tabela 7: Resultados do cálculo do módulo de Young.....	49
Tabela 8: Resultados do ataque químico.	52

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os polímeros sintéticos amplamente fabricados à base de petróleo, têm sido fundamentais no desenvolvimento de uma variedade de produtos devido à estabilidade e resistência à degradação, especialmente em ambientes húmidos. Todavia, a durabilidade inicialmente vista como uma vantagem, começou a ser percebida como um problema nas décadas de 1970 e 1980, quando o crescente volume de resíduos plásticos se tornou uma preocupação ambiental significativa (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

O Poliestireno Expandido (EPS) é um exemplo clássico de polímero sintético, sendo amplamente encontrado em formato de bandejas ou pequenas caixas como embalagens. No entanto, tem sido utilizado frequentemente apenas uma vez (como embalagens de *fast-food*) e quando descartado inadequadamente resulta em acúmulo de resíduos microplásticos no meio ambiente (DÍAZ-MENDOZA et al., 2020).

Na tentativa de mitigar o problema do acúmulo de resíduos microplásticos resultantes do descarte de Poliestireno Expandido (EPS), algumas iniciativas propõem a queima do material. No entanto, a abordagem apresenta sérios riscos ambientais e de saúde, porque a combustão incompleta do EPS (especialmente em incêndios domésticos) gera uma variedade de produtos químicos perigosos, incluindo Estireno e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), como o fluoranteno, que é considerado cancerígeno (FARRELLY e SHAW, 2017). Diante desses problemas surge a necessidade de pesquisas para o desenvolvimento de materiais para embalagens biodegradáveis com características adequadas para substituir o EPS (MOZAZUL INOVAÇÃO, 2021).

De acordo com LUCHESE (2018), o amido é um polissacarídeo que se destaca como um material biodegradável, sendo abundante, não tóxica, de baixo custo, amplamente disponível em todo o mundo e com a capacidade de formação de espuma. Porém, uma embalagem feita exclusivamente de amido é inviável devido a alta hidrofiliabilidade e baixa resistência mecânica, que limitam o seu uso, necessitando assim de aditivos para melhorar suas propriedades. A valorização dos resíduos fibrosos vegetais para a produção de biocompósitos biodegradáveis representa uma alternativa de aditivos para resolver as limitações de um material feito exclusivamente de amido. As fibras

lignocelulósicas, um tipo específico de resíduos fibrosos vegetais, são incorporadas como material de reforço (aditivo) nos biocompósitos. Segundo MARENGO et al. (2013) a incorporação resulta em materiais que combinam as vantagens das fibras e da matriz, melhorando as propriedades gerais do biocompósito. As fibras, além de renováveis e de baixo custo, melhoram as propriedades do material, tornando as embalagens biodegradáveis mais eficientes.

Em virtude dos factos mencionados, o presente trabalho visa produzir embalagens biodegradáveis, a partir de biocompósitos de matriz polimérica de amido de mandioca e reforçadas com fibras lignocelulósicas de resíduos vegetais.

1.2. MOTIVAÇÃO

A motivação para produzir embalagens biodegradáveis à base de Amido, reforçadas com fibras lignocelulósicas, decorre da preocupação ambiental com os plásticos convencionais de uso único. Plásticos, derivados do petróleo, demoram longo tempo para se degradar e poluem o meio ambiente. Embalagens de biocompósitos de amido e fibras vegetais, sendo biodegradáveis e compostáveis, oferecem uma alternativa ecológica. A abordagem não apenas reduz a dependência de materiais não renováveis, mas também promove a economia circular, reutilizando resíduos agrícolas e florestais, e atendendo à crescente demanda por produtos ecológicos.

1.3. JUSTIFICATIVA

A crescente preocupação com o impacto ambiental dos plásticos em Moçambique, como o Poliestireno Expandido, tem levado à busca por alternativas mais sustentáveis. A utilização de materiais biodegradáveis e compostáveis, feitos de biocompósitos à base de amido e fibras lignocelulósicas de resíduos vegetais, pode oferecer uma solução promissora. Os biocompósitos podem ser compostados com resíduos alimentares, reduzindo a quantidade de lixo em aterros e as emissões de gases de efeito estufa. A produção deste tipo de material diminui a dependência de petróleo, pois são baseados em matérias-primas renováveis. A competitividade em termos de custo e processamento desses novos materiais à base de amido e resíduos de fibras lignocelulósicas podem ser processados utilizando técnicas convencionais da indústria de plásticos, como extrusão, termoformagem e moldagem por injeção, facilitando a transição.

1.4. OBJECTIVOS

1.4.1. Geral

Produzir embalagens biodegradáveis usando biocompósitos de amido de mandioca e reforçadas com fibras lignocelulósicas de resíduos vegetais.

1.4.2. Específicos

Para se alcançar o objectivo geral foram definidos os seguintes objectivos específicos:

- Seleccionar resíduos fibrosos vegetais disponíveis na cidade de Maputo;
- Determinar as características físicas e químicas da biomassa seleccionada;
- Determinar as propriedades físicas e químicas dos biocompósitos feitos a partir da biomassa;
- Comparar as propriedades dos biocompósitos com as do EPS, visando seleccionar o mais adequado para o protótipo de embalagem.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para melhor organização e compreensão, este trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução, onde faz-se uma breve contextualização, motivação, justificativa, estabelece-se os objectivos do estudo e a metodologia empregada;
- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, onde são apresentadas uma compilação e análise da literatura existente sobre o tema em estudo;
- Capítulo 3: Materiais E Métodos, onde detalha-se o processo de obtenção, produção, Características dos Biocompósitos e estabelece-se o critério de selecção do biocompósito para a elaboração dos protótipos das Embalagens;
- Capítulo 4: Análise E Discussão Dos Resultados, onde faz-se uma descrição e interpretação dos resultados obtidos em cada teste;
- Capítulo 5: Conclusão E Recomendações, onde sintetiza-se a discussão geral do trabalho e abre-se o caminho para novas investigações;
- Capítulo 6: Bibliografias, são apresentados os documentos, livros referenciados e consultados para a elaboração do trabalho.

1.6. METODOLOGIA

A metodologia para a realização deste trabalho de investigação foi quantitativa no qual foram usados como ferramenta de colecta de dados:

- Pesquisa em base de dados: Colectou-se informações sobre a produção de embalagens sustentáveis por meio de teses, dissertações, livros e artigos científicos;
- Aquisição de amostras: Colectou-se três resíduos fibrosos vegetais na cidade de Maputo;
- Experiências nos laboratórios: Produziu-se e caracterizou-se biocompósitos nos laboratórios da UEM, especificamente, Departamento de Engenharia Química e da Faculdade de Engenharia Agronómica e Florestal;
- Tratamento de dados: Os resultados foram analisados estatisticamente utilizando testes de erro e cálculo do desvio padrão;
- Elaboração do relatório final: Compilou-se e fez-se a redacção do relatório final.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CENÁRIO MUNDIAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Resíduos sólidos são definidos como materiais sólidos inúteis gerados a partir de atividades humanas em áreas residenciais e industriais (LETCHER e VALLERO, 2011). Segundo o banco mundial, 2018 (apud MOZAZUL INOVAÇÃO, 2021) o relatório "What a Waste 2.0" revela dados alarmantes sobre a gestão global de resíduos como ilustra a figura 1a. Aproximadamente 37% dos resíduos são destinados a aterros sanitários, 33% são descartados em locais abertos, 19% são reciclados ou compostados, e 11% são tratados por incineração moderna. Os dados reflectem um cenário onde a gestão de resíduos ainda enfrenta muitos desafios, especialmente em países de baixa renda. Nos países de baixa renda, a composição dos resíduos é predominantemente de alimentos e vegetais (56%), seguido por papel e papelão (7%), outros materiais diversos (27%), plástico (6,4%), metal (2%), vidro (1%) e menos de 1% de madeira figura 1b. A elevada proporção de resíduos orgânicos destaca a necessidade de soluções eficazes de compostagem e reciclagem para reduzir a quantidade de lixo (BANCO MUNDIAL, 2021).

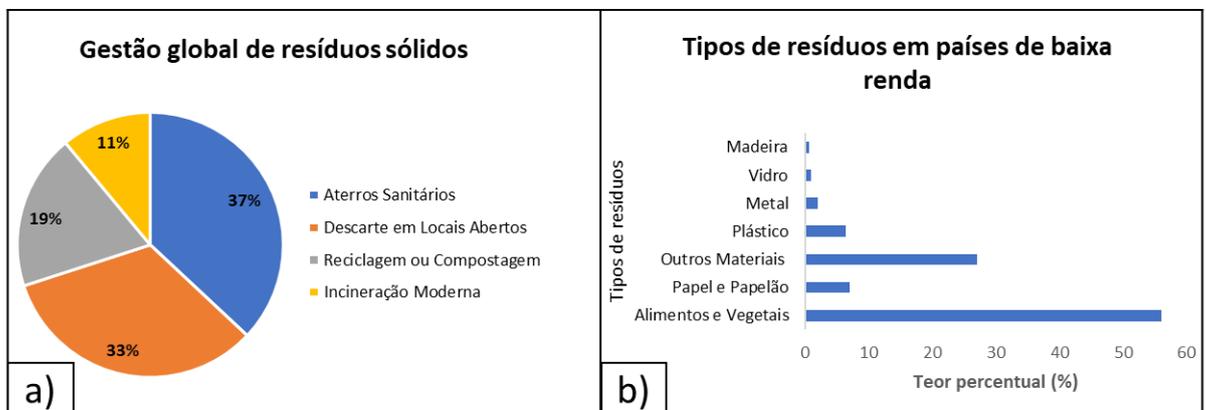


Figura 1: (a) Análise global dos resíduos sólidos. (b) Composição dos resíduos em países de baixa renda.

Fonte: adaptado pelo autor.

Em média, cada pessoa gera cerca de 0,74 kg de resíduos por dia. O valor pode variar significativamente: em países de baixa renda, onde a geração per capita é de apenas 0,11 kg por dia, enquanto em países de alta renda pode atingir 4,54 kg por dia. Espera-se que a quantidade de resíduos em países de baixa renda aumente mais de três vezes até 2050, com um crescimento particularmente acentuado na África Subsariana (BANCO MUNDIAL, 2021).

2.2. PLÁSTICOS E EMBALAGENS PLÁSTICAS

A palavra "plástico" vem do grego "*plastikós*", que significa adequado para moldagem. Plásticos são materiais sintéticos criados através da polimerização, um processo químico que forma polímera. Os polímeros (moléculas dos plásticos), podem ser encontrados naturalmente em algumas plantas e animais, como borracha, madeira e couro. Derivados principalmente do petróleo, os plásticos são usados como matéria-prima para fabricar uma ampla variedade de produtos devido à sua capacidade de mudar de forma. Materiais plásticos são duráveis, fortes e baratos de produzir, tornando-se ideais para embalagens e armazenamento de produtos (MCKEEN, 2012; FERREIRA, 2018)

De acordo com PLASTICS EUROPE, (2016) a produção global de embalagens plásticas cresce continuamente, impulsionando sectores como construção civil, electrónicos, automóveis e embalagens, com a produção de resinas termoplásticas estimada em 250 milhões de toneladas. Entretanto, é necessário reduzir a quantidade de plásticos no sistema, especialmente os produtos e embalagens de uso único, que são grandes contribuintes para o lixo oceânico. O foco na redução da produção de plásticos que são produtos problemáticos e não recicláveis é crucial para combater a poluição.

A Figura 2, mostra os esforços globais para reduzir o impacto ambiental dos plásticos de uso único. O mapa destaca países com proibições totais (verde escuro), parciais ou tributações (verde claro) e aqueles que retiraram ou adiaram políticas de proibição (estrelas pretas).

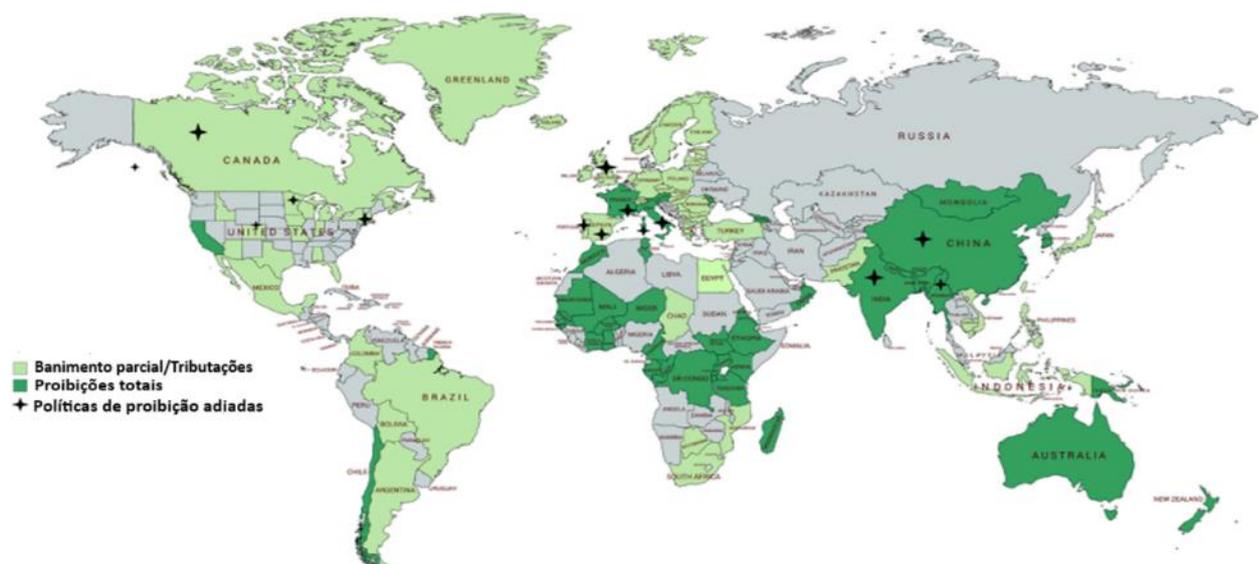


Figura 2: Políticas Globais de Redução de embalagens Plásticas.

Fonte: PATRÍCIO SILVA et al., (2020)

A tabela 1 mostra os códigos de identificação (código ID) de plásticos, que são usados para classificar diferentes tipos de plásticos para reciclagem. Aqui estão os significados de cada código:

Tabela 1: Código de classificação de polímeros, estruturas e aplicações.

Fonte: <https://marliscopt.wixsite.com/marlisco/os-plasticos>, (10 de Julho de 2024)

Código	Aplicações principais	Polímero
1	Garrafas de refrigerantes, óleos de cozinha, boiões de plástico	Polietilenotereftalato (PET)
2	Garrafas de detergentes e leite,	Polietileno de alta densidade (PE-HD)
3	Tubos de canalização, vedações, capas impermeáveis, discos	Policloreto de vinila (PVC)
4	Sacos de plástico, contentores, capas impermeáveis	Polietileno de baixa densidade (PE-LD)
5	Tampas de garrafas de água, palhas de beber, fibras industriais,	Polipropileno (PP)
6	Brinquedos, copos de bebidas, embalagens e tabuleiros.	Poliestireno (PS)
7	Recipientes de comida como <i>tupperwares</i> , recipiente de <i>Ketchup</i>	Outros tipos de resinas (exemplo: Poliuretano)

Recomenda-se evitar o uso de PVC (Código 03), PS (Código 06) e alguns plásticos identificados com o Código 07 que contenham bisfenol A, especialmente em aplicações relacionadas a alimentos e bebidas, devido a preocupações com a segurança desses materiais. O PVC, quando aquecido, pode liberar cloreto de hidrogénio e outros compostos tóxicos que representam riscos à saúde. O PS, quando exposto a altas temperaturas, pode liberar estireno, uma substância potencialmente cancerígena. Alguns plásticos com o Código 07, especialmente aqueles que contêm bisfenol A (BPA), podem liberar este composto, que é um disruptor endócrino conhecido.

Para embalagens de alimentos, é preferível utilizar plásticos como PET (Código 01), PE-HD (Código 02) e PP (Código 05), que são considerados mais seguros e oferecem melhores opções de reciclagem. Esses materiais são estáveis a temperaturas moderadas, tornando-os escolhas seguras para uso em microondas e outras aplicações de cozinha (CHRISTENSEN, 2023).

2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS EM MOÇAMBIQUE

Os desafios na gestão de resíduos sólidos em Moçambique reflectem a realidade de muitos países africanos. Em 2016, o país gerou cerca de 2,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, com expectativa de aumento significativo nas próximas décadas. A taxa de colecta de resíduos é de aproximadamente 30%, enquanto em Maputo é de 82% (BANCO MUNDIAL, 2021). A Figura 3, fornece um panorama sobre a gestão de resíduos plásticos, mostrando a geração, colecta, deposição e reciclagem de plásticos.

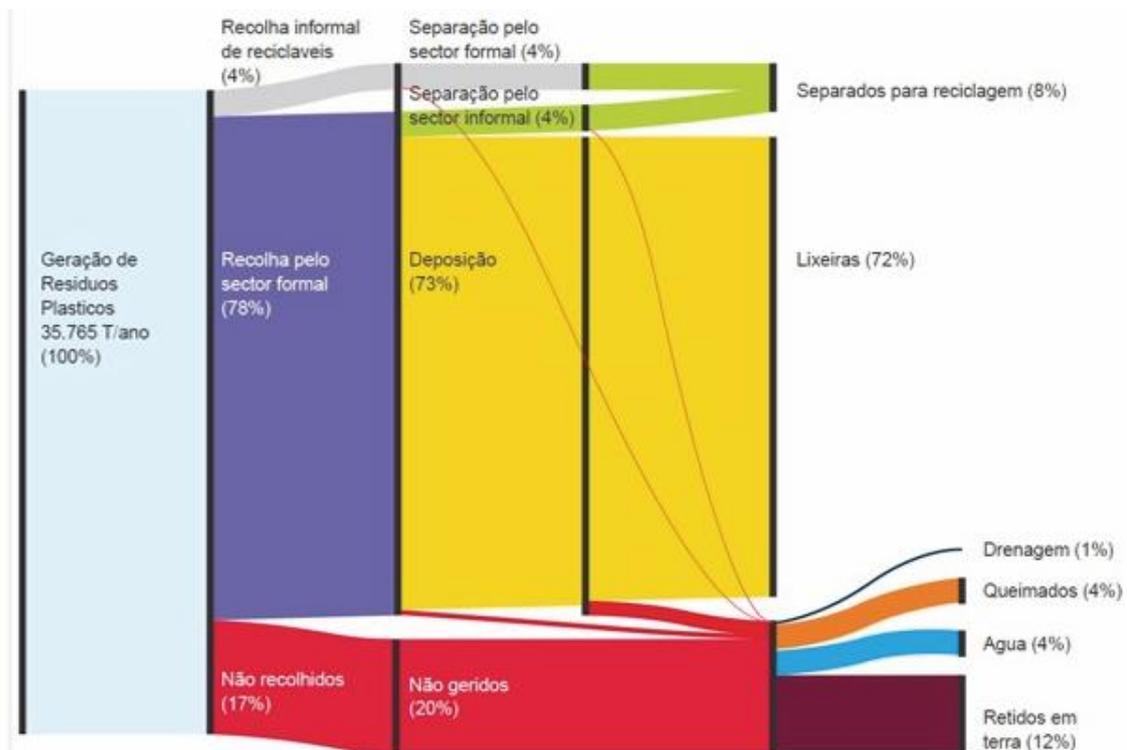


Figura 3: Gestão de resíduos plásticos em Moçambique.

Fonte: MOZAZUL INOVAÇÃO (2021)

Verifica-se que anualmente, são geradas 35.765 toneladas de resíduos plásticos. Onde, 78% são colectados pelo sector formal, enquanto 4% são colectados de forma informal para reciclagem. A disposição final dos resíduos plásticos indica que 73% são depositados em lixeiras, dos quais apenas 8% são separados para reciclagem (4% pelo sector formal e 4% pelo sector informal). Os resíduos não colectados representam 17%, e 20% não são geridos adequadamente, resultando em várias formas de descarte inadequado: 1% acaba em sistemas de drenagem, 4% são queimados, 4% são descartados na água e 12% permanecem no solo. A distribuição evidencia a necessidade de melhorar a gestão resíduos plásticos (MOZAZUL INOVAÇÃO, 2021).

resíduos sólidos urbanos (LIM et al., 2021).

Na Tabela 2 estão descritos os principais materiais utilizados em embalagens e o tempo de degradação destes relativamente ao EPS, quando descartados ao meio ambiente.

Tabela 2: Tempo de degradação de materiais descartados em aterros

Fonte: Adaptado por MAGALHÃES 2012 (apud COSTA, 2016)

Material	Tempo de degradação
Aço (latas)	10 anos
Poliestireno expandido (EPS)	200 a 500 anos
Madeira	Indeterminado
Madeira pintada	6 meses
Papel	1 a 6 meses
Plástico (PET)	200 – 450 anos
Caixas de leite longa vida	100 anos
Vidro	Indeterminado

Por ser utilizado apenas uma vez nas embalagens de "fast-food" e, na prática, não ser reciclável, a produção contínua de EPS para este propósito é praticamente desnecessária. Para minimizar os impactos negativos (como mostrados na figura 4a e 4b) de seu descarte inadequado, a utilização de embalagens sustentáveis acabam sendo uma das alternativas possivelmente viáveis para substituir os polímeros sintéticos convencionais. As alternativas biodegradáveis e compostáveis não apenas reduzem a quantidade de resíduos sólidos, mas também facilitam a compostagem e a degradação natural, contribuindo para um ambiente mais sustentável (FERREIRA, 2018).



Figura 4: (a) Embalagens de EPS do tipo bandeja (b) Poliestireno expandido em outras formas.

Fonte: <https://reciclasampa.com.br/artigo/derivado-do-plastico-isopor-e-reciclavel>, (23 de Julho de 2024)

2.6. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

De acordo com COMMISSION ON ENVIRONMENT (2011), o desenvolvimento sustentável é a capacidade da humanidade promover um progresso que atenda às necessidades actuais sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades. O conceito implica a existência de limites, não absolutos, mas impostos pelo estado actual da tecnologia e da organização social em relação aos recursos ambientais e à capacidade da biosfera de absorver os impactos das actividades humanas.

As questões principais são não esgotar os recursos renováveis, mas permitir que se regenerem e cresçam naturalmente. Quanto aos recursos não renováveis, é importante usar com cuidado, considerando sua disponibilidade, as tecnologias que podem ajudar a minimizar seu esgotamento e a possibilidade de substituí-los por outros recursos (FERREIRA, 2018).

2.7. EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS

Segundo SASTRE et al. (2022) embalagens sustentáveis são todas que minimizam o impacto ambiental ao longo de todo o seu ciclo de vida. O conceito está relacionado com o uso de materiais e processos que reduzem o desperdício, o consumo de energia e a pegada de carbono, além de considerar o descarte ou a reciclagem das embalagens no final de sua vida útil. A adopção de tecnologia limpa pelas empresas é uma escolha estratégica para reduzir o impacto dos resíduos urbanos. A prática tem servido como uma ferramenta de marketing, pois as empresas que adoptam tecnologias sustentáveis ganham vantagem competitiva. Os consumidores tendem a associar produtos ecológicos a marcas responsáveis, melhorando a imagem da empresa frente aos concorrentes (DE OLIVEIRA NETO et al., 2015).

2.8. MATERIAIS BIODEGRADÁVEIS USADOS EM EMBALAGENS

Materiais biodegradáveis são materiais que se decompõem naturalmente por acção de microrganismos, como bactérias e fungos. Tem sido produzido a partir de fontes renováveis e podem ser transformados em embalagens sustentáveis. Os biopolímeros são polímeros produzidos por seres vivos, geralmente derivados de fontes renováveis

como plantas e microrganismos, logo são classificados como materiais biodegradáveis (SAMIR et al., 2022; RAVINDRANATHAN, 2016).

A figura 5 mostra a classificação dos polímeros biodegradáveis em três famílias de acordo com AVEROUS e BOQUILLON (2004), se baseando na origem das matérias-primas e no processo de produção. Os polímeros podem ser derivados de biomassa agrícola, produzidos por microrganismos, através de processos biotecnológicos, ou de fontes petroquímicas. Cada categoria oferece exemplos específicos de materiais utilizados e suas respectivas origens, destacando a diversidade de opções disponíveis para a produção de materiais biodegradáveis.

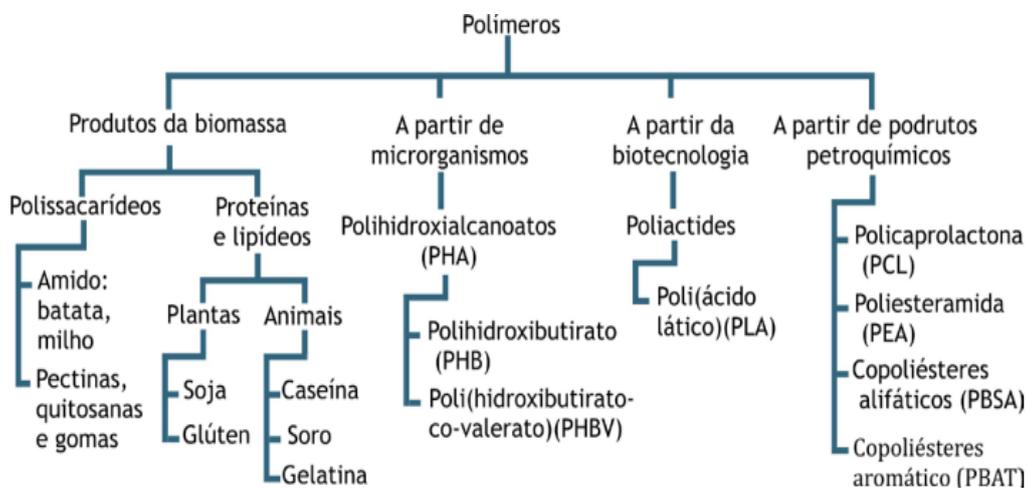


Figura 5: Classificação dos polímeros biodegradáveis.

Fonte: CALEGARI e OLIVEIRA (2016)

Os polímeros provenientes de produtos da biomassa são obtidos a partir de fontes renováveis, como plantas e animais, e são frequentemente utilizados em aplicações que demandam biodegradabilidade e sustentabilidade ambiental. Exemplos incluem o uso em embalagens, filmes plásticos e materiais de enchimento. Os polímeros obtidos a partir de microrganismos são sintetizados por processos biológicos e incluem os polihidroxialcanoatos (PHA), são conhecidos pelas propriedades biodegradáveis e são aplicados em embalagens, produtos médicos e agrícolas (FERREIRA, 2018).

Polímeros obtidos através da biotecnologia, são produzidos por processos biotecnológicos que utilizam organismos vivos, como bactérias, fungos e plantas geneticamente modificadas, para sintetizar ou modificar os polímeros como os poliactídes (PLA), que são aplicadas em embalagens de alimentos, utensílios descartáveis, fibras têxteis e dispositivos médicos biodegradáveis. Os polímeros

derivados de produtos petroquímicos incluem materiais como policaprolactona (PCL) e copolíesteres, que são utilizados em uma variedade de aplicações devido às suas propriedades mecânicas e versatilidade, embora sua origem não-renovável seja uma desvantagem em termos de sustentabilidade (AVEROUS e BOQUILLON, 2004; SHAH et al., 2008).

2.8.1. Amido

O amido é o segundo biopolímero mais comum no mundo, depois da celulose, e pode ser encontrado em várias plantas, como cereais, raízes, tubérculos, frutas e legumes (LUCHESE, 2018). Estruturalmente, o amido é um homopolissacarídeo composto por dois tipos de moléculas, a amilose e a amilopectina, como ilustra na Figura 6.

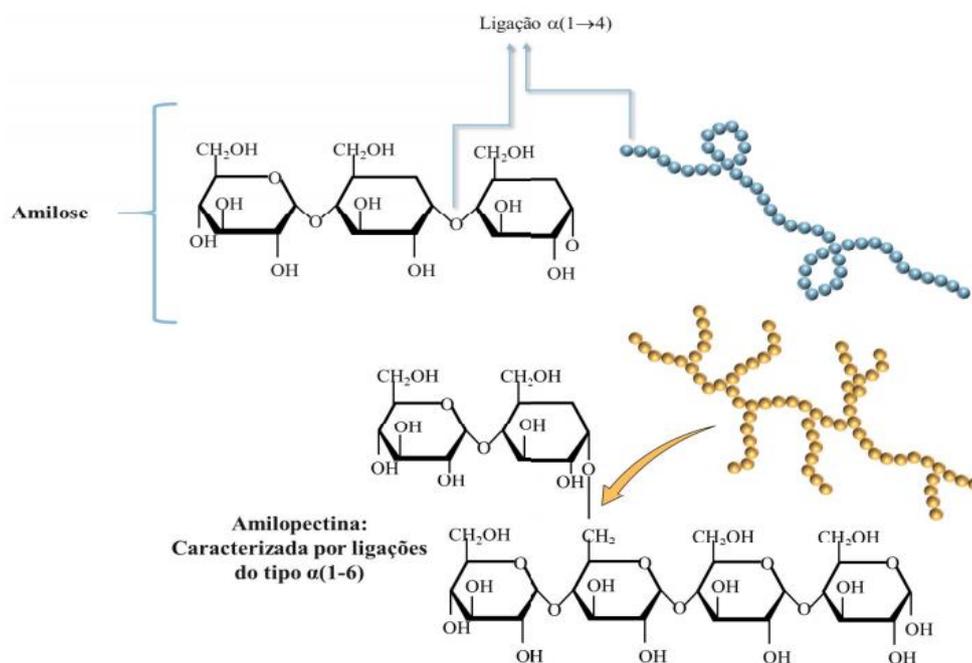


Figura 6: Estrutura do amido

Fonte: FERREIRA (2018)

A amilose é uma cadeia linear feita de unidades de glicose, possui entre 250 e 1000 unidades de D-glicose e com um peso molecular de cerca de 10^6 ($\frac{g}{mol}$) D-glicose. A amilopectina é uma molécula muito ramificada, com ligações α-1,4 e ramificações em α-1,6, como mostrado na Figura 6. É uma das maiores moléculas naturais, com peso molecular entre 1×10^7 a 1×10^9 ($\frac{g}{mol}$) e um grau de polimerização de 5000 a 50.000 unidades de D-glicose (VAN DER BURGT, 1996).

Os grânulos de amido variam em tamanho e forma, dependendo da planta de onde vêm.

Apresentam várias formas, como: esferas, elipsóides, polígonos, plaquetas ou túbulos irregulares. Os grânulos de amido são semicristalinos ou parcialmente cristalinos, o que significa que têm áreas ordenadas (cristalinas) e desordenadas (amorfas). As áreas cristalinas são principalmente formadas por cadeias de amilopectina bem organizadas, enquanto as áreas amorfas contêm pontos de ramificação de amilopectina e moléculas de amilose em uma disposição desorganizada (MATIGNON e TECANTE, 2017). O amido quase não se dissolve em água fria ou na maioria dos solventes orgânicos por causa das fortes ligações de hidrogénio entre as cadeias de amilopectina e amilose. A figura 7 descreve o comportamento do amido em relação à viscosidade e temperatura, destacando 3 processos principais: gelatinização, dispersão completa e retrogradação.

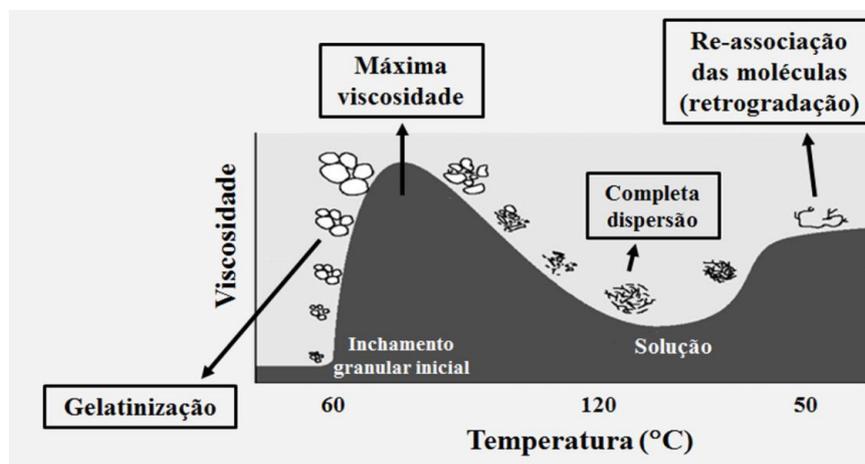


Figura 7: Comportamento do amido em relação à viscosidade e temperatura.

Fonte: AVEROUS e BOQUILLON (2004)

No início do processo (a gelatinização), o amido é aquecido em água, começando a inchar e absorver água ao redor de 60°C, o que aumenta a viscosidade. Conforme a temperatura continua a subir, os grânulos de amido incham ao máximo, atingindo a máxima viscosidade. Com o aumento adicional da temperatura, os grânulos de amido se rompem, liberando amilose e amilopectina na solução, levando à completa dispersão. Neste estágio, a viscosidade diminui, pois a estrutura dos grânulos se desintegra e ao esfriar, ocorre a retrogradação, onde as moléculas de amilose juntamente com a amilopectina começam a se reorganizar, formando um gel e aumentando a viscosidade novamente, mas não tanto quanto na fase de máxima viscosidade (ISOTTON et al., 2015).

2.8.2. Fibras naturais

Fibras naturais são fibras obtidas a partir de fontes naturais como: animais (cabelo e lã), vegetais (madeiras e não derivados de madeira) ou minerais (amianto e fibra de vidro). Estas fibras têm a vantagem de serem renováveis, abundantes, mais leves e mais baratas do que as fibras sintéticas. As fibras de origem vegetal são mais aplicadas a embalagens (CALEGARI e OLIVEIRA, 2016). Sendo estas classificadas na figura 8:

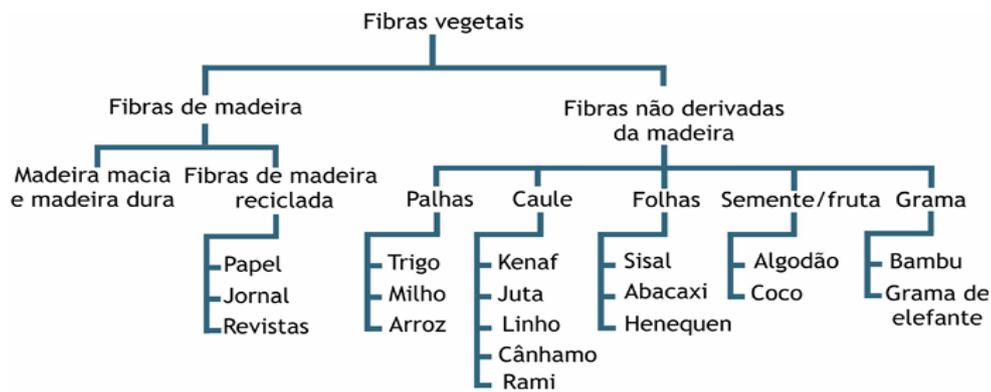


Figura 8: Classificação de fibras vegetais.

Fonte: CALEGARI e OLIVEIRA (2016)

2.8.3 Fibras lignocelulósicas

Fibras lignocelulósicas são fibras vegetais ricas em lignina, celulose e hemicelulose, enquanto as fibras vegetais podem variar em composição. Todas as fibras lignocelulósicas são vegetais, mas nem todas as fibras vegetais são lignocelulósicas. As fibras vegetais incluem um espectro mais amplo, com algumas não sendo ricas em lignina e celulose (SAMIR et al., 2022). A figura 9 mostra a estrutura de uma célula vegetal e os principais componentes de sua parede celular.

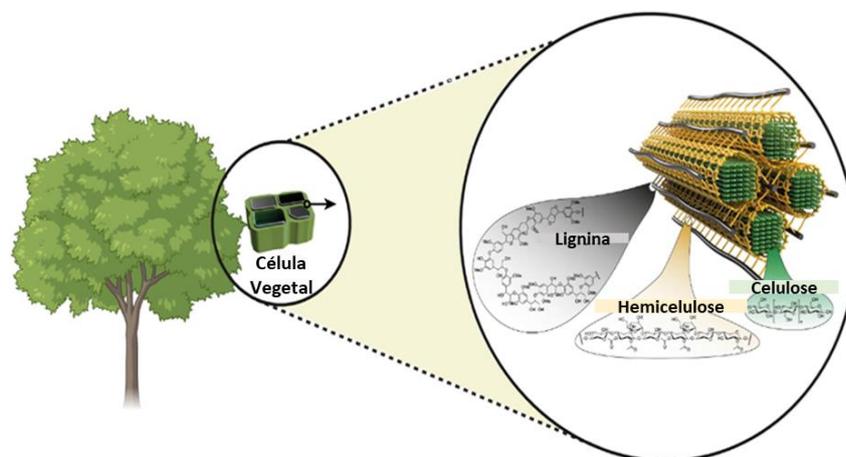


Figura 9: Constituintes da fibra lignocelulósicas.

Fonte: MUJTABA et al. (2023)

- Celulose: representada em verde, é o principal componente estrutural das paredes celulares das plantas. É um polímero de glicose hidrofílico que forma microfibras, proporcionando rigidez e resistência.
- Hemicelulose: mostrada em laranja, a hemicelulose é um polímero hidrofílico que se encontra entre as microfibras de celulose, ajudando a ligar as fibras de celulose e contribuindo para a integridade estrutural.
- Lignina: representada em cinza, a lignina é uma substância complexa hidrofóbica que dá rigidez e impermeabilidade às paredes celulares. Ela preenche os espaços entre as fibras de celulose e hemicelulose, conferindo resistência mecânica e protecção contra a degradação (SAMIR ET AL., 2022).

As propriedades físicas da fibra estão relacionadas à estrutura interna e aos componentes do material vegetal utilizado. As fibras das plantas para além dos constituintes mencionados também possuem pectina, proteína, cera, cinzas, taninos e sais inorgânicos que variam de acordo com a origem das fibras, condições de crescimento, idade da planta e processos de digestão (MUJTABA et al., 2023). O teor de celulose das fibras é um factor importante na determinação das características e desempenho mecânico quando usadas como reforço em compósitos. Em contraste, um aumento nos componentes não celulósicos causa uma diminuição na resistência, o que tem consequências negativas para os compósitos finais produzidos (SAMIR et al., 2022).

2.8.3.1. Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana é a biomassa residual resultante do processamento da cana-de-açúcar após a extracção do caldo, composto principalmente pelas partes fibrosas das células que formam o caule da planta. As macromoléculas principais do resíduo são: celulose (40-45%), lignina (20-25%) e hemicelulose (25-30%) como mostra a figura 10.

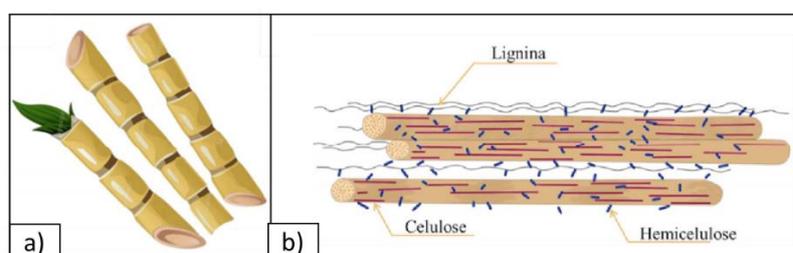


Figura 10: (a) Desenho esquemático da cana íntegra; (b) composição da fibra de seu bagaço.

Fonte: FERREIRA (2018)

De acordo com (CLAUSER et al., 2016) , cada tonelada de cana-de-açúcar processada, gera cerca de 140 kg de palha e 140 kg de bagaço secos. A indústria sucroalcooleira (indústria cujo a matéria prima é a cana-de-açúcar) utiliza entre 60 e 90% dos subprodutos como combustível para geração de energia e calor. Sobretudo, ainda sobra uma quantidade significativa de resíduos, que causa problemas ambientais e de armazenamento. Os resíduos remanescentes representam um potencial promissor como matéria-prima para a produção de embalagens biodegradáveis (SUN et al., 2004).

2.8.3.2. Palha de milho

O milho é usado principalmente para fazer amido, produzir óleo, etanol e açúcar. No entanto, partes da planta, como o sabugo e a palha, geralmente não são aproveitadas directamente. O sabugo, que é a parte central da espiga onde os grãos estão presos, é produzido em cerca de 18 kg para cada 100 kg de espigas (Ferreira, 2018). A palha de é o resíduo vegetal que sobra após a colheita dos grãos de milho, inclui as folhas secas, as cascas que envolvem as espigas e outras partes do caule como ilustra a figura 11.

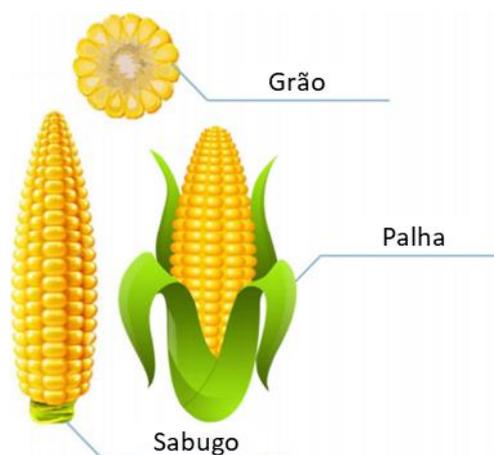


Figura 11: Estrutura da espiga de milho.

Fonte: https://issuu.com/entreposto/docs/je_set_2013_internet/6 (6 de Julho de 2024)

Tem sido gerada aproximadamente 45 milhões de toneladas de resíduos de palha de milho por ano no mundo, muitas vezes é queimada, despejada incorrectamente ou usada como cobertura de solo, o que causa problemas de pragas ou poluição ambiental. A palha é composta por 38,2% de celulose, 44,5% de hemicelulose, 6,6% de lignina, 1,9% de proteína e 2,8% de cinzas. Pesquisas têm sido feitas para reaproveitar esse material, como na produção de embalagens, já que a palha é uma fonte renovável, barata e biodegradável (ENAWGAW et al., 2023).

2.8.3.3. Capim elefante

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) é uma gramínea tropical amplamente utilizada para a produção de biomassa devido ao seu rápido crescimento e alto rendimento. A composição química do capim-elefante, em termos de seus principais componentes de lignocelulose, geralmente é dividida em celulose, hemicelulose e lignina. A composição pode variar dependendo de factores como a idade da planta, condições de crescimento, e métodos de análise. Contudo, valores típicos encontrados em media são: Celulose (35-45%), Hemicelulose (25-35%) e Lignina (10-20%) (FARIANI et al., 2022; MADAKADZE et al., 2010). As figuras 12a e 12b mostram a morfologia de uma folha de capim-elefante, destacando suas principais partes.

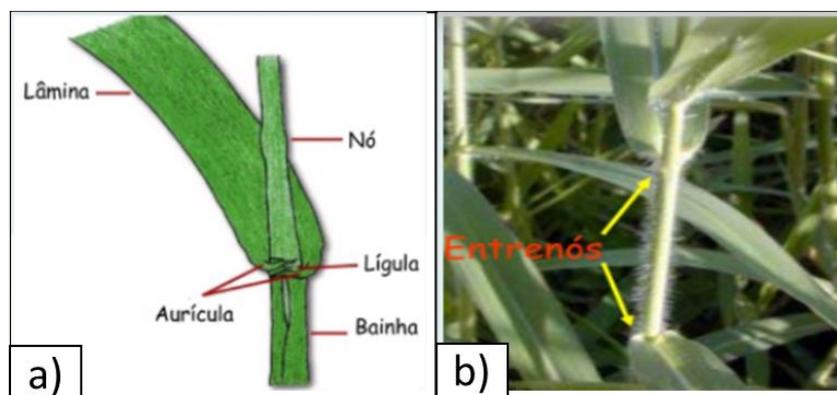


Figura 12: (a) Morfologia da folha de capim-elefante; (b) Entrenós do capim elefante.

Fonte: <https://passeidireto.com/arquivo/100446069/capim-elefante> (20 de Julho de 2024)

A figura 12a destaca a lâmina, nó, lígula, aurícula e bainha. Onde: a lâmina é responsável pela fotossíntese, o nó é o ponto de inserção da folha no caule, a lígula é uma pequena membrana na junção da lâmina com a bainha, a aurícula são projecções na base da lâmina e a bainha envolve e protege o caule. A estrutura apresentada faz com que o capim-elefante seja altamente produtivo e resistente. A figura 12b destaca o entrenó do capim elefante, que é a região do caule entre dois nós. Os nós são pontos onde crescem as folhas e brotos, enquanto os entrenós são as seções do caule entre esses nós. A presença de pelos visíveis no caule é uma característica comum desta planta (MANOEL et al., 2011). O capim-elefante é utilizado como forragem animal devido ao seu alto valor nutricional, fonte promissora de biomassa para bioenergia, produzindo biogás, bioetanol e briquetes. Pesquisas recentes exploram seu potencial na produção de bioplásticos e embalagens biodegradáveis, oferecendo uma alternativa sustentável aos plásticos (OLIVO et al., 2013).

2.8.4. Glicerol como agente plastificante nos filmes de amido

O glicerol é um dos plastificantes mais utilizados em estudos para a produção de biofilmes derivados do amido. O plastificante, tem baixa volatilidade e uma composição química semelhante ao polímero do biofilme, é usado para controlar a flexibilidade do material. Quando adicionado à solução filogénica, o glicerol modifica a organização molecular do amido, alterando a viscosidade do sistema e melhorando a mobilidade das macromoléculas (RABELLO e De PAOLI, 2013). As forças que mantêm as cadeias poliméricas juntas são enfraquecidas com a adição do plastificante, permitindo que estas cadeias deslizem mais facilmente. O processo descrito resulta em biofilmes mais flexíveis e menos resistentes mecanicamente, mas facilita o processamento e reduz a dureza do material polimérico (MALI et al., 2010).

O glicerol mostrado na figura 13 é uma pequena molécula orgânica hidrofílica composta por três grupos hidroxilas, que interagem facilmente com as cadeias de amido. O nome sistemático pela IUPAC é 1,2,3-propanotriol. O termo glicerina é usado para se referir a formas purificadas do composto, geralmente contendo 95% ou mais de glicerol (BEATRIZ et al., 2011).

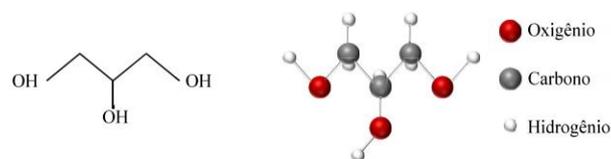


Figura 13: Estrutura de glicerol.

Fonte: FERREIRA (2018)

2.9. PROCESAMENTO E APLICAÇÃO DE BIOCOMPÓSITOS

Biocompósitos são materiais compostos por uma matriz polimérica combinada com fibras ou partículas naturais, como madeira, sisal e bambu. Esses materiais oferecem vantagens ambientais e funcionais, sendo aplicáveis em diversas áreas. A produção eficaz de biocompósitos requer a escolha adequada das fibras vegetais e da matriz, tratamentos para reduzir a sensibilidade à umidade e melhorar a adesão entre fibras e matriz, além de técnicas de fabricação eficientes (KESTUR, 2010). Após a preparação inicial dos componentes da matriz e do reforço, estes são misturados e conformados. Os biocompósitos são fabricados usando tecnologias tradicionais, como extrusão, injeção e moldagem por compressão (FARUK et al., 2012). As diversas técnicas de processamento resultam em diferentes propriedades, que afectam no desempenho.

Após o processamento, os biocompósitos são caracterizados para avaliar o comportamento em relação à umidade, forças mecânicas, degradação e outros factores. CALEGARI e OLIVEIRA (2016) constataram que as propriedades mecânicas de tracção e impacto são as mais frequentemente analisadas. As caracterizações consistem em comparar as propriedades de biocompósitos com diferentes quantidades de reforço, plastificantes na matriz e várias técnicas de processamento. Após a produção de materiais, tem sido utilizado Microscopia Electrónica de Varredura (MEV) para analisar a adesão entre a fibra e a matriz, bem como a absorção de água e a biodegradabilidade. A absorção de água pode resultar na perda de compatibilidade entre as fibras e a matriz, levando ao enfraquecimento da adesão interfacial. Os materiais de fontes renováveis são cada vez mais utilizados na fabricação de embalagens e recipientes devido à sua biodegradabilidade e menor impacto ambiental em comparação com materiais de fontes não renováveis. A figura 14 ilustra a distinção entre esses dois tipos de materiais.

Material biodegradável	Material plástico	Aplicações
		Embalagens de <i>Fast-food</i>
		Favos de ovo/alimentos secos
		Vasos para plantas/decoração

Figura 14: Materiais biodegradáveis e seus similares plásticos.

Fonte: adaptado pelo autor

As aplicações de materiais renováveis representam um passo significativo em direcção à sustentabilidade. Os materiais renováveis não apenas diminuem a dependência de plásticos derivados de petróleo, mas também promovem práticas de descarte responsáveis, facilitando a compostagem e a reciclagem. Optar por materiais com propriedades descritas contribui para a redução de resíduos sólidos e a mitigação dos impactos ambientais associados aos materiais não renováveis (CUTTER, 2008; SCHUSTER et al., 2012).

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. EXTRACÇÃO DOS FARELOS E PRODUÇÃO DOS BIOCAMPÓSITOS

3.1.1. Matérias-primas

No presente estudo, foram utilizados resíduos de palha de milho e bagaço de cana recolhidos no mercado grossista do "Malanga", em Maputo. O capim-elefante e o glicerol foram fornecidos pelo Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Eduardo Mondlane (UEM). As fibras vegetais foram escolhidas devido ao alto conteúdo lignocelulósico e o amido de mandioca foi obtido no comércio local.

3.1.2. Métodos

As amostras colectadas foram lavadas para remover impurezas e pré-secas ao sol para evitar a deterioração por microrganismos. No laboratório, foram cortadas em pedaços menores, secas em estufa a 80 °C por 120 horas e moídas em dois estágios, utilizando um moinho granular e moinho ultracentrifugo ZM 200 para maior uniformidade dos tamanhos. As partículas foram peneiradas para padronizar o tamanho (abertura de 0,707 mm). Finalmente, o material foi armazenado em recipientes selados até os experimentos subsequentes, como ilustra a figura 15 que ilustra o fluxograma do processo.

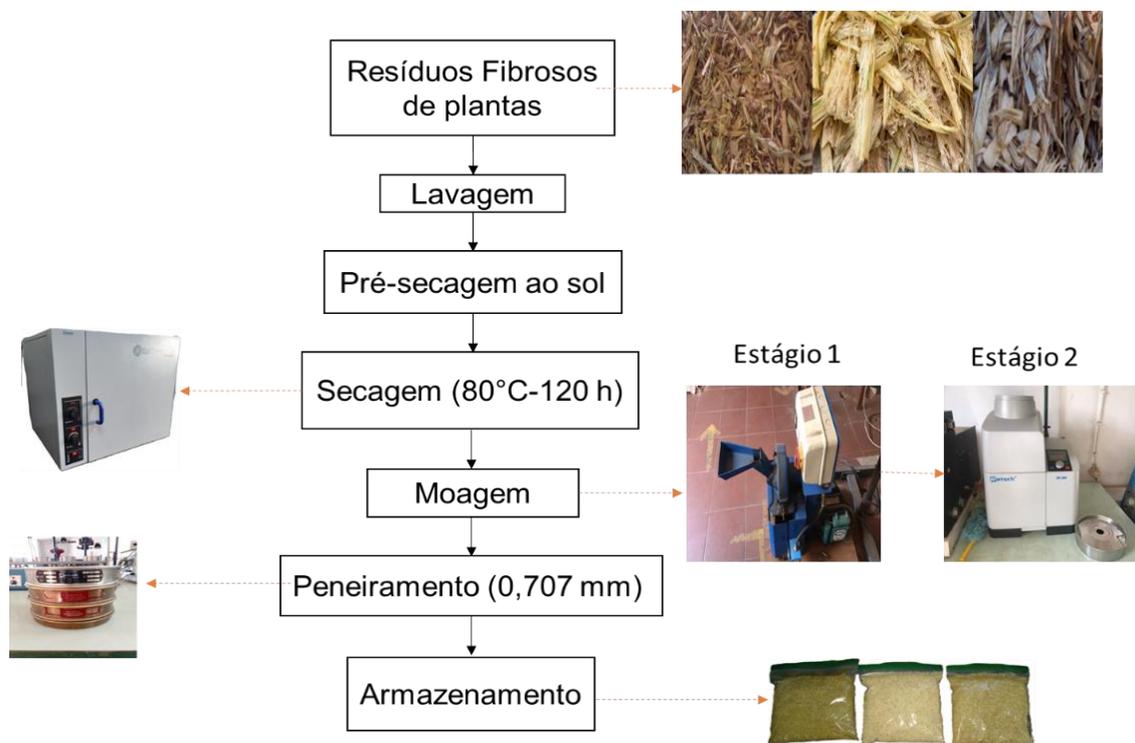


Figura 15: Fluxograma do preparo das matéria-prima.

Fonte: autor

3.1.2.2. Produção dos biocompósitos

Os Biocompósitos para aplicações em embalagem serão obtidos por um processo de moldagem manual, conforme a técnica de FERREIRA, 2018, com ligeiras modificações nos procedimentos e na formulação da solução de amido. A figura 16 descreve o fluxograma do processo de produção usado para se fazer a produção dos biocompósitos:

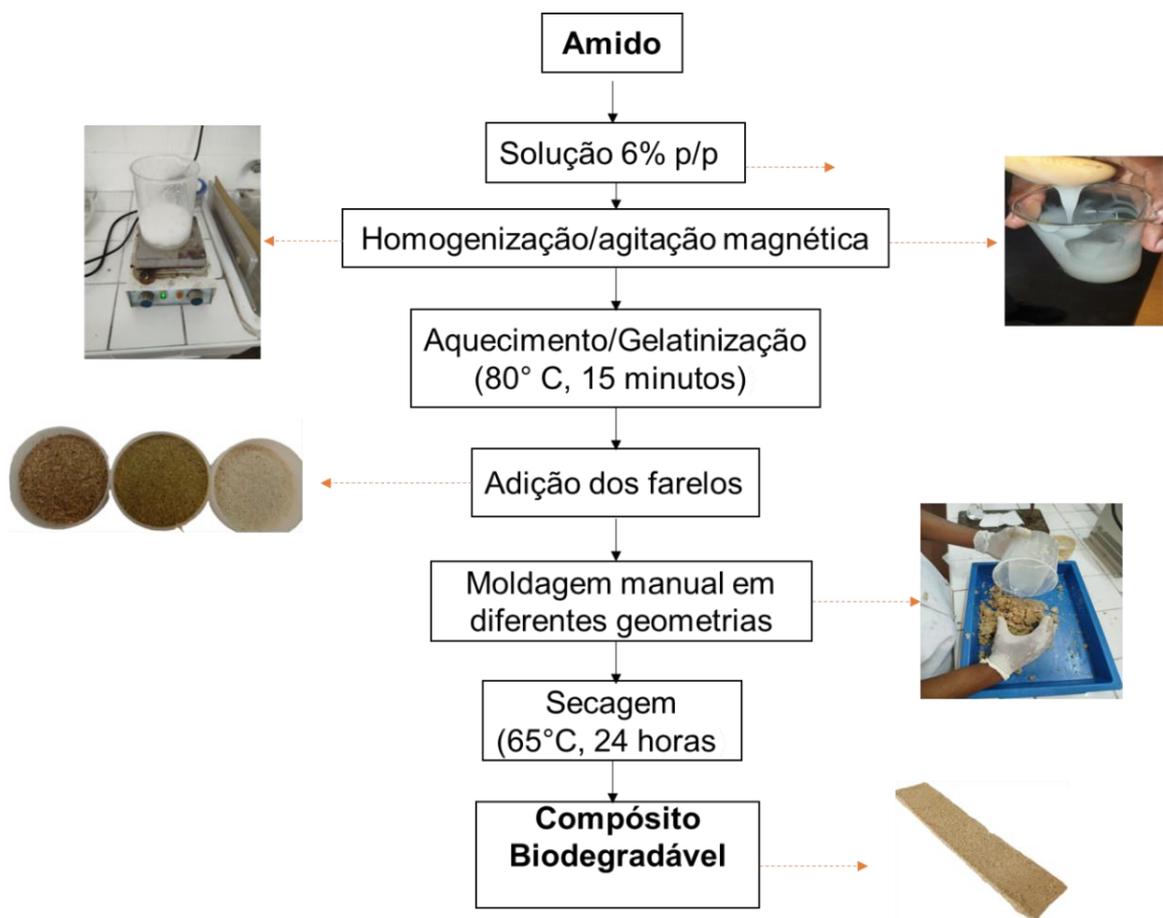


Figura 16: Fluxograma do processo de produção.

Fonte: autor

- I. Preparação da Solução de Amido: a solução de amido de mandioca (6%, em base seca) foi misturada em um agitador magnético por 30 minutos. Em seguida, fez-se o aquecimento até a temperatura desejada (80°C), mantendo uma agitação suave para evitar a formação de bolhas.
- II. Adição de Glicerol: Quando a solução atingiu 80°C, foi adicionado o glicerol como plastificante (previamente dissolvido em água destilada) e a temperatura foi mantida constante por 15 minutos. A concentração de glicerol utilizada foi de 22,5% (g/100, g de amido) para todas as formulações.

- III. Mistura com Farelo de bagaço de Cana-de-Açúcar: A solução de amido foi misturada ao farelo de bagaço cana-de-açúcar, presente em todas as formulações, conforme mostrado na tabela 3.

Tabela 3: Formulações dos compósitos

Formulações	Solução de amido a 6% (em base seca)			Bagaço de cana-de-açúcar (g)	Resíduos fibrosos vegetais (PM e CE)
	Amido (g)	Água (g)	22,5% Glicerol		
Controle (BC)	10	100	2,25	20,0	-----
Reforço (PM10)				18,0	2,0
Reforço (PM20)				16,0	4,0
Reforço (PM30)				14,0	6,0
Reforço (CE10)				18,0	2,0
Reforço (CE20)				16,0	4,0
Reforço (CE30)				14,0	6,0

Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar);

Reforço (PM)- (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho);

Reforço (CE)- (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante).

- IV. Formulações com Farelos: A formulação padrão (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar) será o controle. As demais formulações serão obtidas através da adição de palha de milho e capim-elefante à formulação padrão, substituindo-se a concentração de farelo de cana nas proporções de 10%, 20% e 30%.
- V. A mistura de amido e farelo (100 g) será despejada em uma base para criar geometrias que atendem aos ensaios subsequentes. As misturas serão secas em uma estufa a 65°C por 24 horas. Secar estes tipos de materiais a temperaturas baixas é fundamental para evitar gradientes térmicos elevados e choques térmicos que podem causar rupturas. Quando um material é submetido a altas temperaturas rapidamente, diferentes partes do material se expandem ou contraem a taxas diferentes, resultando em tensões internas. As tensões, se suficientemente altas, podem levar à formação de trincas e, eventualmente, à ruptura do material.

3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS FARELOS

3.2.1. Ensaio de cor dos farelos

O objectivo do ensaio de cor dos farelos é de garantir a qualidade e a consistência da matéria-prima. O teste usou o calorímetro Minolta Color Reader (figura 17a), envolvendo a calibração do aparelho, preparação das amostras, medições e análise dos resultados no espaço CIE Lab. (figura 17b).

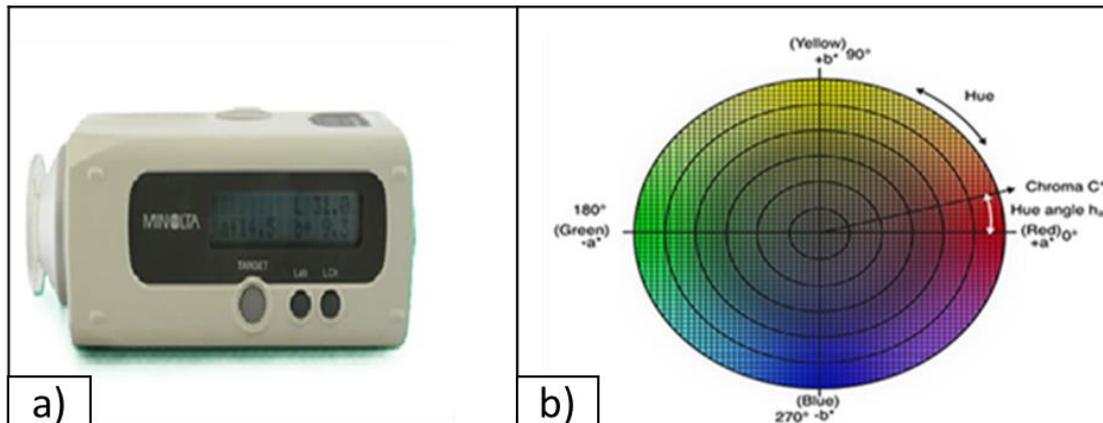


Figura 17: (a) Calorímetro minolta color reader; (b) Espaço CIE Lab*.

Fonte: <https://sensing.konicaminolta.us> (22 de Maio de 2024)

Os parâmetros de cor medidos são: L*: Luminosidade, que varia de 0 (preto) a 100 (branco); a*: Variação da cor entre verde (-) e vermelho (+); b*: Variação da cor entre azul (-) e amarelo (+). Os parâmetros foram analisados em triplicados e com base nos resultados, calculou-se os seguintes parâmetros dependentes de cores:

- Chroma (C^*): Indicador da intensidade da cor, variações podem sinalizar inconsistências na saturação das cores das matérias-primas.

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

- Matiz (h^0): é um ângulo que descreve a tonalidade da cor no espaço de cor CIE Lab*.

$$h^0 = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

A medição precisa do Chroma e do Matiz é essencial para garantir a qualidade e a consistência das matérias-primas, especialmente em produtos onde a cor é importante. Variações podem indicar problemas na matéria-prima ou no processo de fabricação, exigindo ajustes para manter a uniformidade do produto final.

3.2.2. Densidade real dos farelos

A finalidade da determinação da densidade dos farelos é avaliar a compactação e distribuição das fibras na qualidade dos biocompósitos finais. A técnica empregue foi picnometria e realizada em triplicado.

3.2.2.1. Procedimento de picnometria:

Primeiro pesou-se uma quantidade conhecida de amostra (m_{amostra}). Encheu-se o picnómetro (figura 18a) com água destilada até o nível de referência e mediu-se a temperatura da água para obtenção da densidade dada em tabela ($\rho_{\text{H}_2\text{O}}$). Secou-se a superfície externa do picnómetro e pesou-se na balança analítica (figura 18b) com a água destilada ($m_{\text{picnómetro}+\text{H}_2\text{O}}$). Adicionou-se a amostra ao picnómetro, permitindo que o excesso de água transborde. Tampou-se o picnómetro, secou-se no dessecador e pesou-se novamente com a amostra e a água e mediu-se o seu peso (m_2).

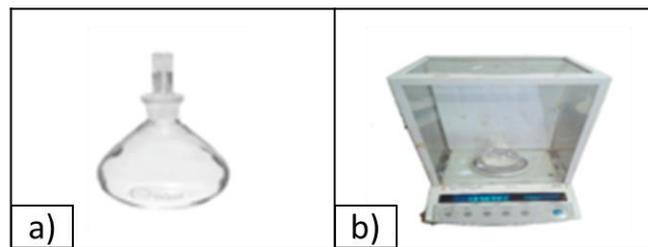


Figura 18: (a) Picnómetro; (b) Balança analítica.

Fonte: autor

Após ter-se seguido os procedimentos, determinou-se a densidade a partir da fórmula:

$$\rho_{\text{amostra}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}}$$

Onde:

ρ_{amostra} – densidade da amostra

m_{amostra} – massa da amostra

m_1 – ($m_{\text{amostra}} + m_{\text{picnómetro}+\text{H}_2\text{O}}$)

m_2 – massa da mistura real

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ – densidade da água

3.2.3. Proteína bruta dos farelos

O objectivo do ensaio de proteína bruta é avaliar a quantidade de proteínas em fibras, o que ajuda a entender a taxa de biodegradabilidade e prever se haverá formação de óxidos de nitrogénio (NO_2) durante a incineração. O teor de proteína bruta foi medido pelo método de Kjeldahl, conforme descrito nas etapas ilustradas na Figura 19.

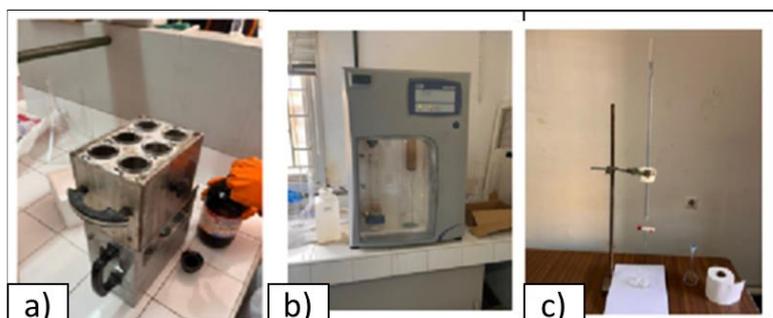
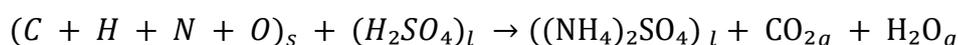


Figura 19: (a) Bloco de Kjeldahl para digestão; (b) Destilador; (c) Titulador.

Fonte: autor

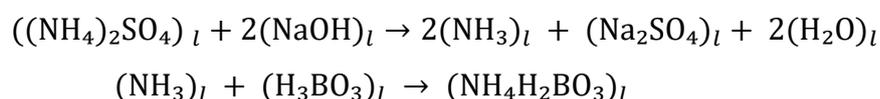
3.2.3.1. Procedimento de digestão:

Colocou-se a amostra, em uma estufa a $70\text{-}80^\circ\text{C}$ 24 horas. Após resfriar a amostra em um dessecador, pesou-se 1 grama da amostra, colocou-se em um tubo de digestão e adicionou-se 15 ml de ácido sulfúrico concentrado. Com o bloco de digestão a 420°C , coloca-se o tubo no bloco e deixou-se a digerir por 45 minutos. Após desligar o aparelho, resfriou-se as amostras. Diluiu-se a amostra até 100 ml com água destilada usando um vortex. Esta etapa converte o nitrogénio orgânico presente na proteína em íons amónio (NH_4^+) como ilustra a equação da reacção abaixo:



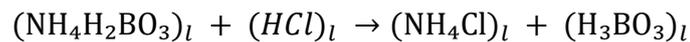
3.2.3.2. Procedimento de destilação:

Verificou-se o aparelho de destilação e o sistema de água corrente. Colocou-se 20 ml da solução colectada (ácido bórico com indicador) em um Erlenmeyer de 250 ml e adicionou-se 20 ml da solução digerida ao tubo de destilação. Adicionou-se 10 ml de solução de NaOH ao digestor e ligou-se o destilador. Após a destilação, desligou-se o destilador e fechou-se a água. As reacções que caracterizaram o processo descrito são:



3.2.3.3. Procedimento de Titulação:

Usou-se ácido clorídrico 0,1N para a titulação. Colocou-se o destilado em um Erlenmeyer e introduziu-se o bico do titulador no frasco. Adicionou-se o ácido lentamente até que a solução se tornasse clara e amarela, mantendo a cor constante. Registrou-se o valor indicado no aparelho titulador. A equação que descrevia o processo era a seguinte:



Após ter sido efectuado os procedimentos descritos, usaram-se as seguintes equações:

$$\%P. B = \%N \times 6,25. \quad \text{sendo: } \%N = \frac{(V - B) \times N \times 0,14}{W} \times 100\%$$

Onde:

%N – teor de nitrogenio presente na amostra

V – volume da solução titulada (em mL)

B – Volume do branco , usado para correção de erros sistemáticos

0,14 – fator de conversão de acordo com os reagentes usados

W – peso da amostra (em gramas)

P. B – teor total de proteína bruta

3.2.4. Série de sólidos dos farelos

A série de sólidos é uma análise que determina diferentes frações de sólidos em uma amostra. O ensaio foi realizado seguindo a técnica de (ROMÃO, 2015.) usando os equipamentos da figura 20. Os principais parâmetros incluem: teor de humidade, teor de sólidos totais, teor de sólidos voláteis e teor de sólidos fixos (cinzas).

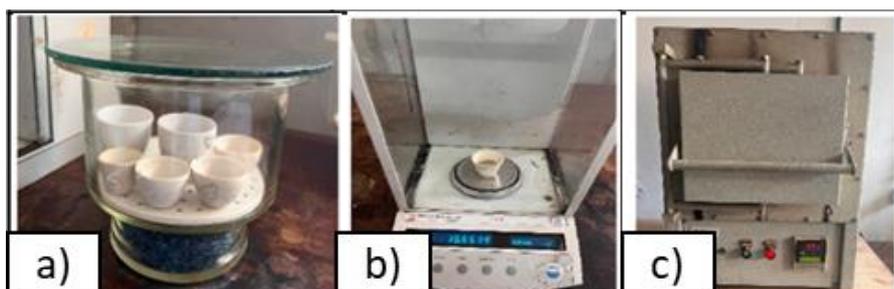


Figura 20: (a) Cadinho; (b) Balança analítica; (c) Mufla.

Fonte: autor

Teor de Umidade (H): Quantifica a água na amostra. Determinou-se secando a amostra a 105°C na estufa até ao peso constante durante 24 horas.

$$H = \frac{m_{\text{amostra-24h(105C)}}}{m_{\text{amostra}}}$$

Teor de Sólidos Totais (ST): Calculou-se como o complemento do teor de umidade.

$$ST = \frac{m_{\text{amostra-24h(105C)}}}{m_{\text{amostra}}} \text{ ou } ST = 1 - H$$

Teor de Cinzas (SF): Mediu-se a fracção mineral ou inorgânica após incineração da amostra seca a 550°C na Mufla durante 24 horas.

$$SF = \frac{m_{\text{amostra-24h(550C)}}}{m_{\text{amostra}}}$$

Teor de Sólidos Voláteis (SV): Indica a fracção que se volatiliza quando a amostra é aquecida. Calculou-se pela perda de peso após aquecimento.

$$SV = ST - SF$$

3.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS BIOCOMPÓSITOS

3.3.1. Ensaio de cor dos biocompósitos

O procedimento para testar a cor fez-se com o calorímetro Minolta Color Reader (já ilustrado no ensaio de cor nos farelos), onde as medidas foram realizadas em triplicadas. O objectivo do ensaio é de avaliação da influência de diferentes proporções dos farelos na coloração dos biocompósitos e calcular-se a Diferença Total de Cor (ΔE), que é um parâmetro que avalia a uniformidade da cor entre diferentes lotes de matéria-prima, crucial para a consistência visual dos biocompósitos (Color Reader CR-10 Operation Manual, n.d.).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

onde: L*: Luminosidade, que varia de 0 (preto) a 100 (branco);

a*: Variação da cor entre verde (-) e vermelho (+);

b*: Variação da cor entre azul (-) e amarelo (+)

3.3.2. Densidade aparente dos biocompósitos

O objectivo da determinação da densidade dos biocompósitos é avaliar a compactação do material, que influencia as propriedades mecânicas e garantir que a embalagem atenda às especificações desejadas do produto a embalar. A espessura dos biocompósitos foi medida com um paquímetro em 3 pontos aleatórios, e a densidade foi calculada a partir de placas rectangulares secas a 105°C por 24 horas e pesadas, com os resultados avaliados em triplicado e apresentados como valores médios.

$$\rho = \frac{m_{\text{amostra}}}{c \times l \times \varepsilon}$$

Onde:

ρ – Densidade aparente do compósito

m_{amostra} – Massa do compósito

c – Comprimento do compósito

l – Largura do compósito

ε – Espessura

3.3.3. Solubilidade em água dos biocompósitos

A solubilidade das bandejas foi testada pela técnica de KÖSELERLI et al. (2023), no qual colocaram-se três discos de cada amostra, com peso seco conhecido e 25 mm de diâmetro, em 50 mL de água destilada a 25°C por 24 horas, agitando ocasionalmente, como ilustra a figura 21:

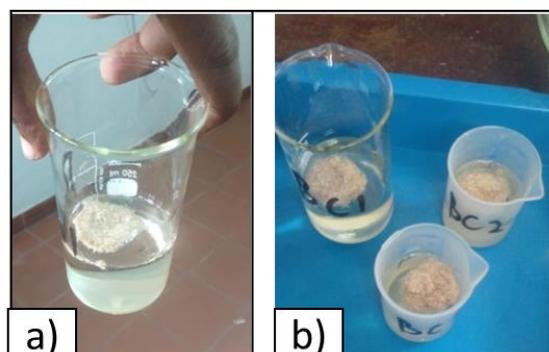


Figura 21: (a) Imersão do biocompósito na água; (b) Agitação esporádica.

Fonte: autor

Após o processo anterior, a matéria sólida não dissolvida foi filtrada com papel de filtro e seca em uma estufa a 105°C por 24 horas para medir o peso seco final da amostra. As análises foram feitas três vezes para cada grupo e a solubilidade foi calculada usando a seguinte fórmula específica:

$$\%S = \frac{m_i - m_f}{m_i}$$

Onde:

%S – teor de água absorvida pelos compósitos

m_i – massa inicial da amostra seca

m_f – massa final da amostra seca

3.3.4. Microscopia óptica dos biocompósitos

No contexto de biocompósitos, a microscopia óptica permite examinar a distribuição das fibras, a homogeneidade do material e identificar defeitos ou características específicas. A micrografia foi realizada com um microscópio óptico olympus SC29, com ampliação de 4x, como mostrado na figura 22.



Figura 22: Microscópio óptico olympus SC29.

Fonte: Autor

A técnica envolveu cortar e polir pequenas placas do material para obter uma superfície plana e revelar a disposição interna das fibras na matriz de amido. Devido à opacidade do material, a luz do microscópio não atingia bem a superfície, dificultando a visualização. Para contornar isso, foi usada uma flash externa de um telemóvel para iluminar a amostra e obter imagens nítidas.

3.3.5. Propriedades mecânicas dos biocompósitos

O objectivo do teste de tracção de materiais compósitos é avaliar sua resistência à deformação e ruptura sob força de tracção. Os testes foram realizados no texturômetro DBBMTCL-5000 Kg (ilustrado na figura 23), usando o programa “*winTest Analysis*” e seguindo a norma ASTM D882-12 com ajustes de MARENGO et al. (2013), sendo cada amostra testada três vezes.

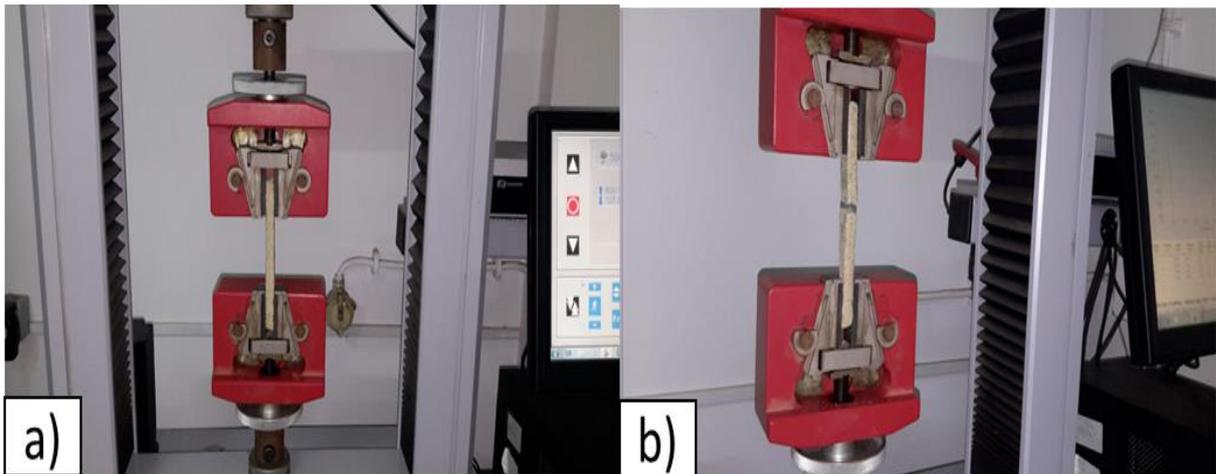


Figura 23: (a) antes de submetido a tracção; (b) depois de submetido a tracção.

Fonte: autor

As placas dos materiais compósitos com dimensões conhecidas (160 × 25) mm, foram puxadas a uma velocidade de 1,0 mm/s, começando com uma distância inicial de 70 mm como ilustra a figura 23a até o biocompósito se romper conforme a ilustra a figura 23b. A força e o alongamento na ruptura foram medidos a partir da curva de força versus alongamento, e o módulo de Young (E) foi calculado a partir do declive da parte linear da curva da força em função da elongação elongação.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Sendo:

E – módulo de Young

$\Delta\sigma$ – Variação da tensão

$\Delta\varepsilon$ – Variação da deformação.

3.3.6. Teste de biodegradabilidade dos biocompósitos

O objectivo do teste de biodegradabilidade é avaliar a capacidade do material de se decompor naturalmente por microrganismos. A biodegradabilidade do biocompósito foi verificada medindo a perda de massa e realizando uma análise visual, utilizando húmus de minhoca da marca Húmoz misturada com terra (figura 24a e 24b) com as seguintes especificações: Nitrogénio 1,10%, Fósforo 0,18%, Potássio 0,07%, Cálcio 0,42%, Magnésio 0,05%, pH 6,6 e umidade 52%.



Figura 24: (a) Húmus de minhoca; (b) conteúdo no interior da embalagem.

Fonte: Autor

As amostras juntamente com o poliestireno expandido foram modeladas em quadrados de 25 x 25 mm e enterradas a 3 cm de profundidade, seguindo a norma ASTM 6400-03 apud Ferreira (2018) adaptada. A cada dois dias, retirava-se as placas do solo e pesava-se para verificar a perda de massa, causada pelos microrganismos.

3.3.7. Teste de ataque químico dos biocompósitos

O ensaio de ataque químico é utilizado para avaliar a resistência dos biocompósitos em termos de sua integridade estrutural quando expostos a diferentes ambientes químicos conforme a figura 25 (SOUZA et al., 2019).



Figura 25: Ataque químico.

Fonte: autor

Para efectivação do teste, primeiro, preparou-se uma solução de 0,1 M de HCl, ajustando o pH para 4, e uma solução de 0,1 M de NaOH, ajustando o pH para 9. Para garantir que os pH estavam correctos, foram utilizados indicadores de pH: o vermelho de metila (que fica vermelho em pH 4) para a solução ácida e a fenolftaleína (que fica rosa em pH 9) para a solução básica. Para o pH neutro, utilizou-se água destilada. As amostras dos compósitos foram então imersas nas soluções de HCl e NaOH, em seguida observadas após 24 horas para detectar alterações na estrutura e integridade dos biocompósitos.

3.3.8. Gases emitidos após a combustão dos biocompósitos

O objectivo do teste de gases emitidos na queima biocompósitos é simular o processo de combustão para avaliar se, caso os materiais tornem resíduos, se são adequados para incineração no contexto da gestão de resíduos sólidos. Para efectivação do teste, foi utilizado o analisador de gases (Multi-Gas Analyzer) modelo S360. A leitura dos gases foi realizada em um período de nove (9) minutos, com intervalos de 1 (um) minuto entre cada leitura. A figura 26a ilustra o equipamento utilizado para a análise dos gases e o biocompósito em processo de queima na figura 26b.

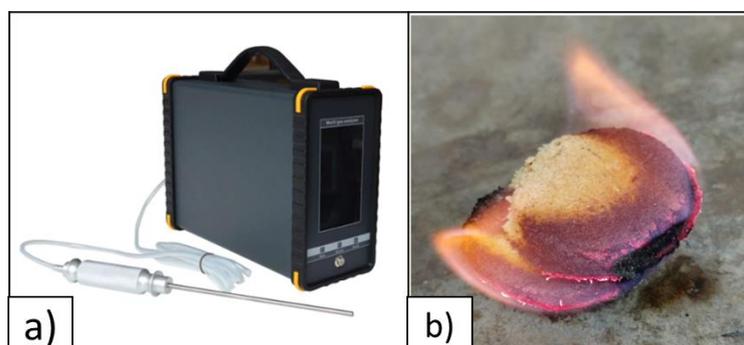


Figura 26: (a) Analisador de gases. (b) Compósito no processo de queima.

Fonte: autor

Os limites de emissão de poluentes atmosféricos para SO₂, NO₂, CO, e CO₂ foram comparados com os valores estabelecidos nos regulamentos ambientais do DECRETO N.º 18/2004 e a actualização do DECRETO N.º 67/2010. Os limites estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Limites máximos de emissão de gases poluentes.

Limite CO ₂ (fontes móveis)	Limite CO (T=1h)	Limite NO ₂ (T=1h)	Limite SO ₂ (T=10min)
3188 ppm	40 ppm	0.4 ppm	0.5 ppm

3.3. PRODUÇÃO DOS PRÓTOTIPOS PARA EMBALAGEM.

Depois de ter sido feita a análise física e química dos biocompósitos, foi realizada uma comparação entre diferentes composições para identificar quais materiais apresentam as melhores propriedades para embalagens biodegradáveis. A integridade estrutural emergiu como a principal propriedade, destacando-se pela sua importância na resistência e durabilidade dos biocompósitos. Os testes fornecem dados críticos para a avaliação das composições em termos de resistência, durabilidade, biodegradabilidade e resistência química. Os materiais que apresentaram melhor desempenho serão utilizados na produção de protótipos, assegurando que as embalagens atendam tanto aos requisitos técnicos quanto aos ecológicos.

O fluxograma apresentado na Figura 27 ilustra o processo de produção de embalagens biodegradáveis a partir de resíduos vegetais e amido de mandioca, detalhando as principais etapas desde a seleção dos materiais até a concepção do protótipo final.

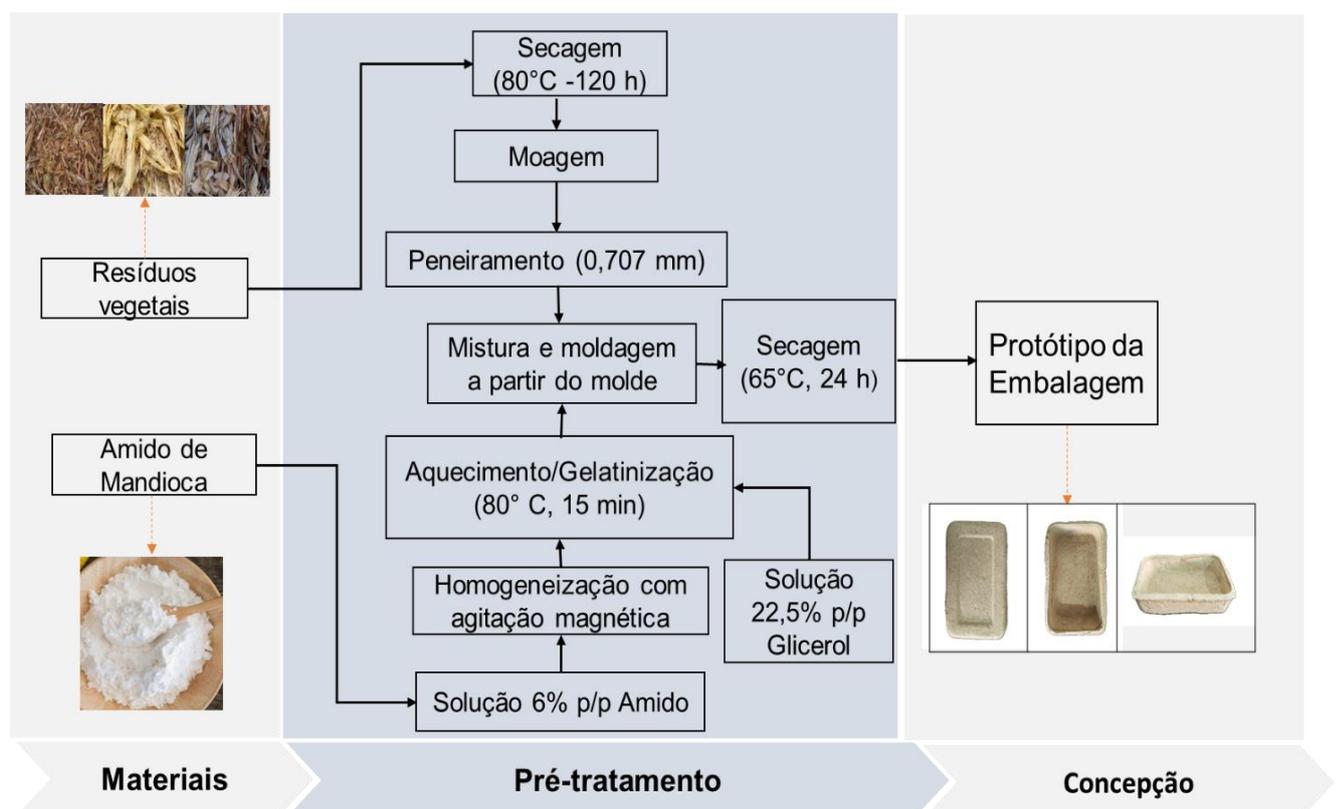


Figura 27: Fluxograma de produção da embalagem.

Fonte: autor

CAPÍTULO 4: ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PARA OS FARELOS

4.1.1. Ensaio de cor para os farelos

Os resultados apresentados na tabela 5 indicam as médias e os respectivos erros padrões de L^* , a^* , b^* , C^* e h^0 para três amostras diferentes.

Tabela 5: Parâmetros de cor dos farelos

Fonte: autor

Amostra	L	a^*	b^*	C^*	h^0
BC	$38,66 \pm 1,27$	$3,57 \pm 0,03$	$18,17 \pm 0,03$	$18,51 \pm 0,04$	$1,38 \pm 0,00$
PM	$33,40 \pm 0,95$	$6,17 \pm 0,19$	$21,60 \pm 0,66$	$22,46 \pm 0,68$	$1,29 \pm 0,00$
CE	$30,07 \pm 0,33$	$3,87 \pm 0,13$	$22,37 \pm 0,15$	$227 \pm 0,16$	$1,40 \pm 0,00$

A análise geral dos resultados nota-se que existe uma diferença significativa entre as cores das amostras, por conta da diferença de composição e pelo processo de secagem, pois carboidratos e proteínas quando combinadas a altas temperaturas podem causar reacções de escurecimento como ilustra a figura 28 (RAIMUNDO e GROSSO, 2006).



Figura 28: Amostras de palha de milho, capim elefante e bagaço de cana-de-açúcar.

Fonte: autor

O valor de L^* representa a claridade da amostra, com valores mais altos indicando maior claridade. Os resultados mostram que a amostra de bagaço de cana (BC) foi significativamente mais clara que as amostras de palha de milho (PM) e capim-elefante (CE), e a amostra PM é mais clara que a amostra CE. A maior claridade do BC se deve à menor quantidade de lignina (BÖRCSÖK e PÁSZTORY, 2021).

O valor de a^* mede a tonalidade vermelha/verde, com valores positivos indicando vermelho. As amostras de bagaço de cana (BC) e capim-elefante (CE) não tiveram diferença significativa entre si, mas a palha de milho (PM) teve um valor de a^* maior, indicando que é mais avermelhada. Os autores KHOO et al. (2011) justificaram este facto à maior quantidade de carotenóides na palha de milho, que são pigmentos naturais encontrados em plantas que contribuem para cores amarelas, laranja e vermelhas.

O valor de b^* mede a tonalidade amarela/azul, com valores positivos indicando amarelo. As amostras de palha de milho (PM) e capim-elefante (CE) são mais amareladas e escuras do que o bagaço de cana (BC), e não diferiram significativamente entre si. A coloração mais escura e amarelada é atribuída ao alto teor de lignina, sílica e pigmentos como xantofilas (PRISCILA et al., 2018).

A amostra PM é a mais saturada (maior C^*) e tende para uma tonalidade mais vermelha, enquanto a amostra CE tem uma tonalidade mais azulada e uma saturação intermediária. A amostra BC possui a menor saturação e uma tonalidade vermelha um pouco mais azulada em comparação com a PM. Todos os valores de h^0 para as amostras BC, PM e CE estão próximos do eixo $+a^*$ (vermelho), indicando que todas têm tonalidade vermelha. As pequenas diferenças nos valores de h^0 mostram variações mínimas na tonalidade dentro do vermelho.

4.1.2. Densidade real para os farelos

O gráfico de barra na figura 29 ilustra a densidade real dos três diferentes farelos: BC (bagaço de cana), PM (palha de milho) e CE (capim-elefante). O eixo y representa os valores de densidade (g/cm^3), enquanto o eixo x lista os materiais.

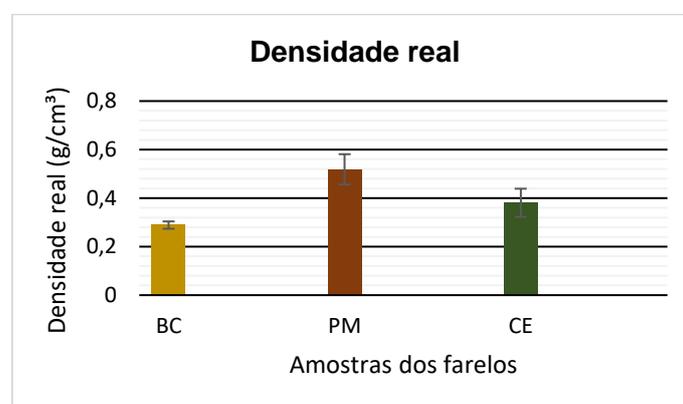


Figura 29: Resultado do ensaio de densidade.

Fonte: autor

A partir de uma análise geral, nota-se que as densidades encontradas foram menores, mas os valores variaram significativamente entre as amostras, com PM sendo a mais densa, enquanto BC e CE têm densidades similares e menores. Segundo Ferreira, 2018 que obteve uma densidade de $(0,14 \pm 0,01)\text{g/cm}^3$ para o bagaço de cana, alegou que este pode resultar em embalagens mais leves, consequentemente tendo a mesma conclusão para o presente estudo com uma densidade de $(0,288 \pm 0,008)\text{g/cm}^3$.

Segundo MARENGO et al (2013) que utilizou fibras de mesocarpo de coco em suas embalagens, afirmou que materiais com maior densidade podem conferir mais resistência ao compósito final. Isso ocorre porque uma maior densidade implica em mais massa por unidade de volume, resultando em uma estrutura mais compacta e resistente. Aplicando a ideia proposta ao farelo da palha de milho, com sua maior densidade, pode proporcionar maior resistência aos biocompósitos. O capim elefante, com a densidade intermediária, pode oferecer um bom compromisso entre leveza e resistência, havendo possibilidade de ser uma opção versátil para diversas aplicações de embalagens (MADAKADZE et al., 2010).

4.1.3. Proteína bruta para os farelos

O gráfico da figura 30 mostra os níveis de proteína bruta em três materiais: Bagaço de Cana (BC), Palha de Milho (PM) e Capim Elefante (CE). A Palha de Milho (PM) apresenta um nível significativamente mais alto de proteína bruta em comparação com BC e CE.

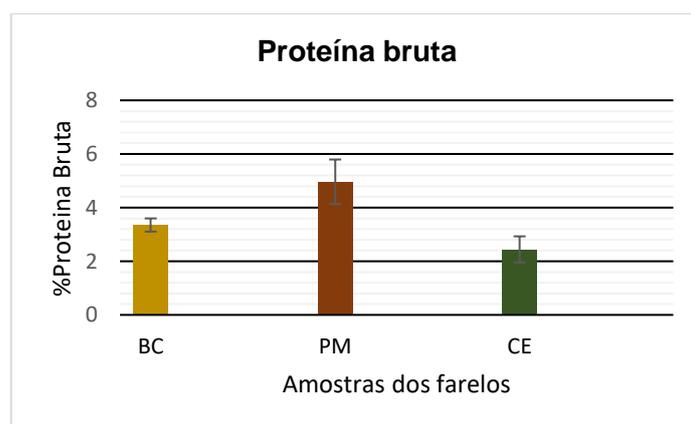


Figura 30: Resultados do teor de Proteína Bruta.

Fonte: autor

O valor de Proteína Bruta encontrado no gráfico $(3,35 \pm 0,14)\%$ para o bagaço de cana-de-açúcar é significativamente mais alto do que os valores reportados na literatura, que variam de 0,8% a 2,64% (GALATI, 2021; UENO et al., 2016; WAHLANG, 2020;

RAIMUNDO e GROSSO, 2006; FREITAS et al., 2008).

O farelo da palha de milho, com o valor no gráfico de $(4,96 \pm 0,48)\%$ é superior aos valores encontrados nos estudos FILHO et al. (2007) e FERREIRA (2018), indicando uma variação significativa possivelmente causada por diferenças nas condições de cultivo, processamento, e variedades das plantas analisadas. O teor de proteína bruta do capim-elefante $(2,44 \pm 0,28)\%$ mostrado no gráfico é significativamente inferior aos valores típicos de SEIBT et al. (2021) e ANDRADE COSTA et al. (2010), que variam entre 7% e 14%. A diferença pode ser estar relacionada às condições de cultivo e estágio de maturação do capim elefante.

O teor de proteína em materiais biodegradáveis pode acelerar a biodegradabilidade, pois os microrganismos como bactérias e fungos quebram proteínas em aminoácidos, que são facilmente assimilados e usados como nutrientes. Contudo, ao incinerar compostos biodegradáveis com proteínas brutas elevadas, pode-se formar óxidos de nitrogênio (NO_2), um poluente atmosférico. Assim, enquanto as proteínas promovem a rápida degradação em compostagem, sua queima deve ser gerida para reduzir emissões de NO_2 (DANISH, 2024).

4.1.4. Série de sólidos para os farelos

A figura 31 ilustra os gráficos circulares que mostram a distribuição dos componentes onde: Humidade (H), Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV), Sólidos Fixos (SF) e Perda de massa) nas três biomassas.

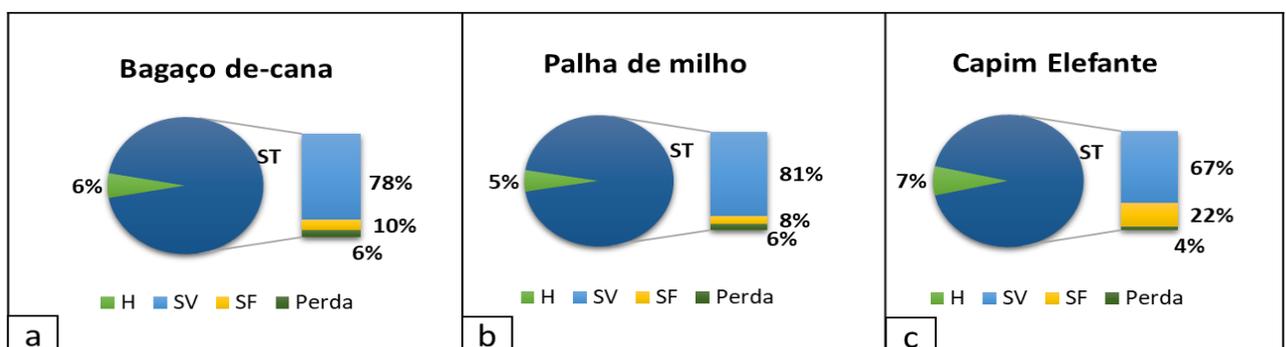


Figura 31: Resultado de série de sólidos. (a) bagaço de cana de-açúcar; (b) palha de milho; (c) Capim Elefante.

Fonte: autor

O valor de umidade encontrado no gráfico para o bagaço de cana-de-açúcar de 6% está

próximo dos intervalos reportados na literatura, que variam de 6,78% a 7,8% (RAIMUNDO e GROSSO, 2006; FERREIRA, 2018). A palha de milho, teve um resultado de 5% e é inferior aos valores encontrados nos estudos de (FERNANDO et al. (2005), BOHN et al. (2010) e FERREIRA (2018), que variam de 5,69% a 12,96%.

O valor de minerais (cinzas ou sólidos fixos) encontrado no gráfico para o bagaço de cana-de-açúcar cerca de 10% não está dentro dos intervalos reportados nas literaturas de FREITAS et al. (2008) e COMPÊNDIO BRASILEIRO DE ALIMENTAÇÃO ANIMAL (2005) apud FERREIRA (2018) que variam de 3,4% a 5%. Para a palha de milho, o valor no gráfico (8,0%) é superior aos valores encontrados nos estudos de ROMÃO, (2015) e FERNANDO et al. (2005) que variam de 0,64% a 1,52%. As discrepâncias podem ser justificadas pela colecta das amostras em diferentes regiões, sob variadas condições climáticas ou colheitas, o que influencia a composição química. O tipo de solo, as práticas de manejo e as condições de cultivo também causam variações significativas no teor de minerais.

O capim-elefante se diferencia com uma maior proporção de sólidos fixos (22%) e menor de sólidos voláteis (67%), além de uma umidade relativamente alta (7%), o que pode afectar nas propriedades mecânicas e biodegradabilidade, diferindo do bagaço de cana e da palha de milho. O termo "perdas" refere-se a toda a massa perdida durante o transporte das amostras, ao arrasto de partículas causado pelo fluxo de ar quente na estufa e ao teor de umidade remanescente após a saída da estufa, uma vez que nem toda a umidade é eliminada.

4.1.5. Possíveis implicações para aplicações em embalagens

Com base nos resultados obtidos, pode-se notar que cada material (fibra), possui certas propriedades únicas ou parecidas que podem ser aproveitadas para diferentes aplicações de embalagens biodegradáveis.

- ✓ A PM, com sua alta densidade e saturação de cor, pode vir a ser ideal para aplicações que exigem maior resistência e uma aparência mais robusta;
- ✓ O BC, sendo mais claro e menos denso, pode ser adequado para aplicações que priorizam leveza e menor impacto visual;
- ✓ O CE, com suas propriedades intermediárias, pode oferecer um bom compromisso entre resistência e leveza, sendo uma opção versátil para diversas aplicações.

4.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PARA OS BIOCOMPÓSITOS

4.2.1. Ensaio de cor para os biocompósitos

A figura 32 ilustra placas de EPS e biocompósitos de matriz de amido reforçados com diferentes fibras lignocelulosícas e glicerol como agente plastificante em diferentes composições.

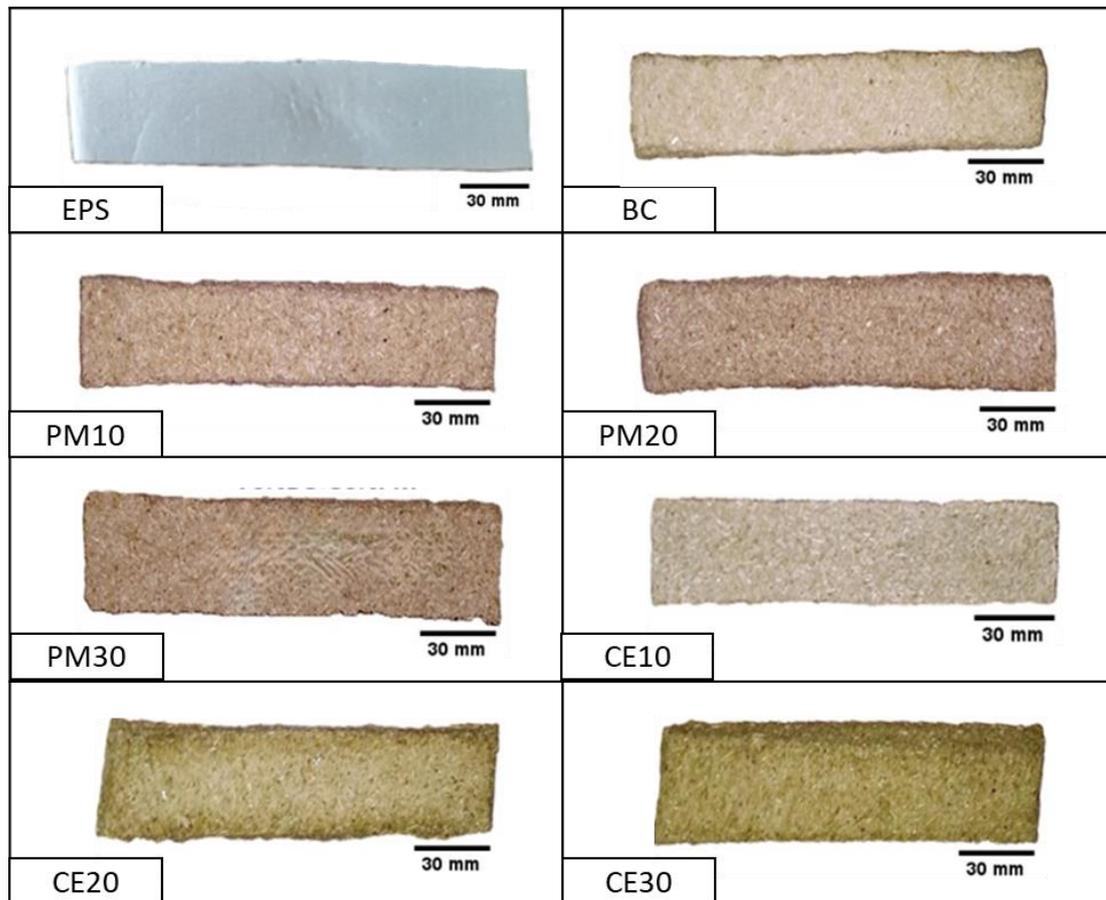


Figura 32: EPS e biocompósitos.

EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar);
Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho);
Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Capim Elefante)

As diferenças visuais reflectem a distribuição e a interacção dos componentes dentro da matriz do amido. As placas exibiram uma homogeneidade de cor e um bom aspecto visual, sugerindo que o processo de mistura das formulações foi eficaz. A ausência de áreas de segregação de cor indica que os componentes foram distribuídos uniformemente durante a preparação das misturas. A homogeneidade é essencial, pois garante que as propriedades mecânicas e físicas sejam consistentes em toda a extensão das placas.

Os resultados apresentados na tabela 6 indicam as médias e os respectivos erros padrões de L*, a*, b* e ΔE para amostras de diferentes biocompósitos.

Tabela 6: Ensaio de cor dos biocompósitos.

Fonte: Autor

Amostra	L*	a*	b*	ΔE
EPS	90,76 ± 0,00	0,5 ± 0,03	-2,36 ± 0,03	2,02 ± 0,00
BC	44,97 ± 1,44	9,60 ± 0,78	25,83 ± 0,38	52,76 ± 1,26
PM10	44,00 ± 0,15	10,53 ± 0,19	25,10 ± 0,12	51,74 ± 0,15
PM20	42,23 ± 0,23	11,07 ± 0,15	25,67 ± 0,27	50,65 ± 0,16
PM30	41,03 ± 0,18	11,57 ± 0,12	25,80 ± 0,15	49,83 ± 0,09
CE10	43,70 ± 0,15	9,87 ± 0,03	25,40 ± 0,36	51,50 ± 0,16
CE20	42,43 ± 0,17	10,10 ± 0,10	24,70 ± 0,58	50,13 ± 0,18
CE30	41,20 ± 0,23	10,53 ± 0,03	25,7 ± 0,31	49,59 ± 0,41

EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar);
 Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho);
 Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante)

O EPS apresenta uma luminosidade significativamente maior com cerca de (90,76,00 ± 0,00) do que todos os compósitos que variam em torno de (41,00 ± 0,18) (PM30%) e (44,97 ± 1,44) (BC). Os resultados indicam que o EPS é muito mais claro, enquanto os compósitos têm uma coloração mais escura. A Luminosidade (L*) diminui com a adição de PM ou CE, tornando as misturas mais escuras. O resultado foi similar com diversos autores como MALI et al. (2010) e MARENGO et al. (2013), com farelos diferentes, justificaram o escurecimento dos compósitos estar relacionado à cor das próprias fibras utilizadas, sendo estes mais escuros.

Os valores de a* são muito maiores nos compósitos variando em torno de (9,60 ± 0,78) (BC) e (11,57 ± 0,12) (PM30%), indicando uma tonalidade muito mais avermelhada em comparação com o EPS, que está próximo de um valor neutro (0,5 ± 0,03). A Intensidade de Vermelho (a*) aumenta com a adição de PM ou CE, com PM tendo um impacto maior, semelhante ao material com bagaço de malte produzido por Ferreira (2018). Os compósitos possuem valores de b+ bastante elevados variando em torno de (25,70 ± 0,58) (CE10%) e (25,83 ± 0,38) (BC), indicando uma tonalidade amarelada pronunciada, enquanto o EPS tem um valor negativo (-2,36 ± 0,03), indicando uma tonalidade

ligeiramente azulada. A Intensidade de Amarelo (b^*) é relativamente constante entre as misturas, com tendência à cor amarela intervalos (25,7 a 25,83) nos quais foram parecidos ao da FERREIRA (2018) e MARENGO et al. (2013) que tiveram um resultado em torno de 23,44. As diferenças nos resultados podem ser justificadas pela diferença do modelo de aparelhos usados e pelo modo de calibração. Os valores de ΔE indicam que todas as amostras de BC, PM e CE têm diferenças de cor significativas em comparação com o padrão de referência (EPS). No entanto, há uma tendência de diminuição do ΔE com o aumento da concentração de PM e CE, sugerindo que concentrações mais altas desses materiais resultam em cores mais próximas entre si, mas ainda assim bastante diferentes do EPS.

4.2.2. Densidade aparente para os biocompósitos

Os resultados da densidade aparente em g/cm^3 para diferentes amostras são apresentados na figura 33 fornecido através do gráfico de barra. As amostras incluem EPS, BC, PM e CE.

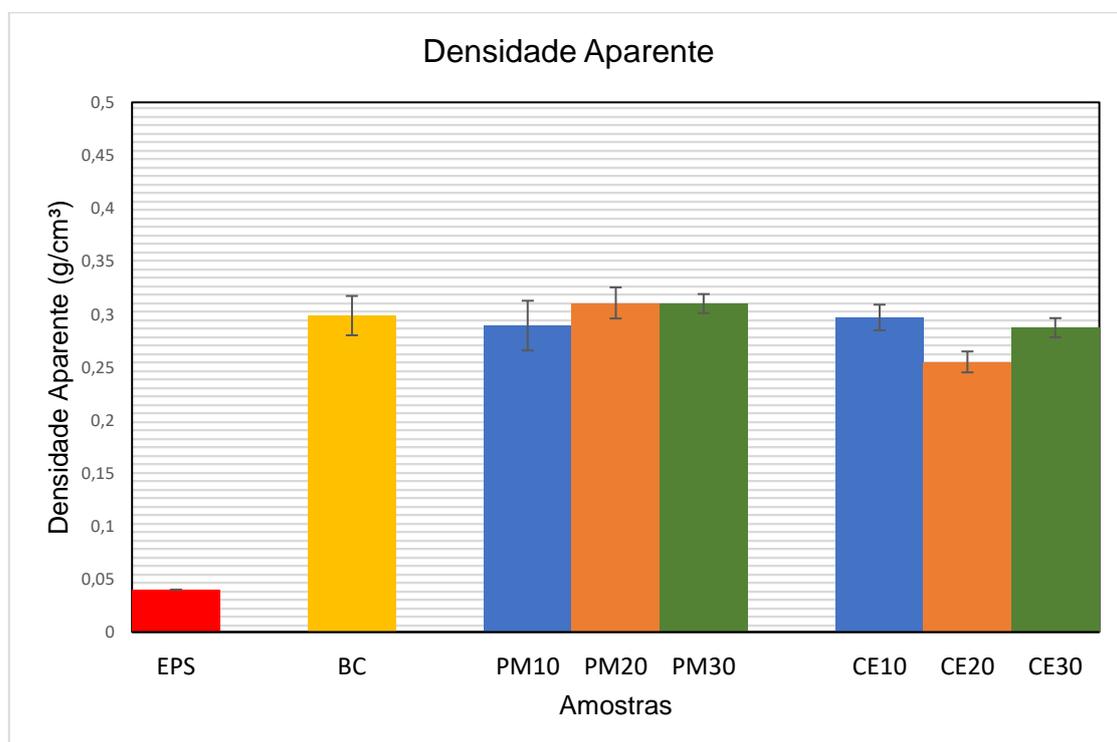


Figura 33: Resultados da densidade aparente.

EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar);
Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho);
Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante)

Os resultados mostraram que os biocompósitos de matriz de amido reforçados com fibras lignocelulósicas apresentaram densidades aparentes significativamente maiores do que o EPS. O resultado é esperado, dado que o EPS é um material sintético caracterizado por uma estrutura celular fechada que aprisiona ar, resultando em uma densidade extremamente baixa. Assim sugere-se que os biocompósitos podem apresentar um potencial para aplicações onde maior densidade e resistência são desejáveis.

A palha de milho e o capim-elefante, utilizados como reforços lignocelulósicos, influenciaram de maneiras distintas a densidade dos biocompósitos de amido. A palha de milho aumentou a densidade do material de controle (BC), enquanto o capim-elefante teve o efeito oposto, diminuindo a densidade. O fenômeno, também foi observado por MARENGO et al. (2013), que relataram densidades variando de 0,21 a 0,34 g/cm³ em suas amostras, com a adição de fibras resultando em uma diminuição significativa da densidade nos biocompósitos produzidos. GLENN et al. (2001) apud MARENGO et al. (2013), indicaram que a densidade das espumas de amido pode aumentar ou diminuir com a adição de fibras, dependendo da natureza e da interação das fibras com a matriz polimérica.

Os resultados de densidade para os biocompósitos de amido reforçados variaram entre 0,263 e 0,320 g/cm³. Os resultados das densidades são intermediários quando comparados a estudos de outros autores. MARENGO et al. (2013) obtiveram densidades de 0,21 a 0,34 g/cm³ para biocompósitos de amido reforçados com bagaço de cana-de-açúcar e outras fibras lignocelulósicas. Por outro lado, MALI et al., (2014) reportaram densidades entre 0,415 e 0,439 g/cm³ para compósitos reforçados com fibra de malte.

As variações nas densidades observadas entre os diferentes estudos podem ser atribuídas a uma combinação de factores relacionados ao tipo de reforço utilizado, composição e proporção dos componentes, métodos de produção, propriedades intrínsecas dos materiais e conteúdo de umidade.

Segundo KAISANGSRI et al., (2012), a densidade é uma propriedade crítica para a aplicabilidade prática das bandejas, com densidades mais baixas sendo preferíveis por reduzir os custos de produção. Portanto, a escolha do tipo de fibra lignocelulósica como reforço tem um impacto significativo na densidade final dos biocompósitos de amido, influenciando suas propriedades mecânicas e potenciais aplicações.

4.2.3. Solubilidade em água para os biocompósitos

A figura 34 ilustra o gráfico de barra que mostra a porcentagem de solubilidade em água para diferentes amostras de materiais. As amostras incluem EPS, BC, PM e CE.

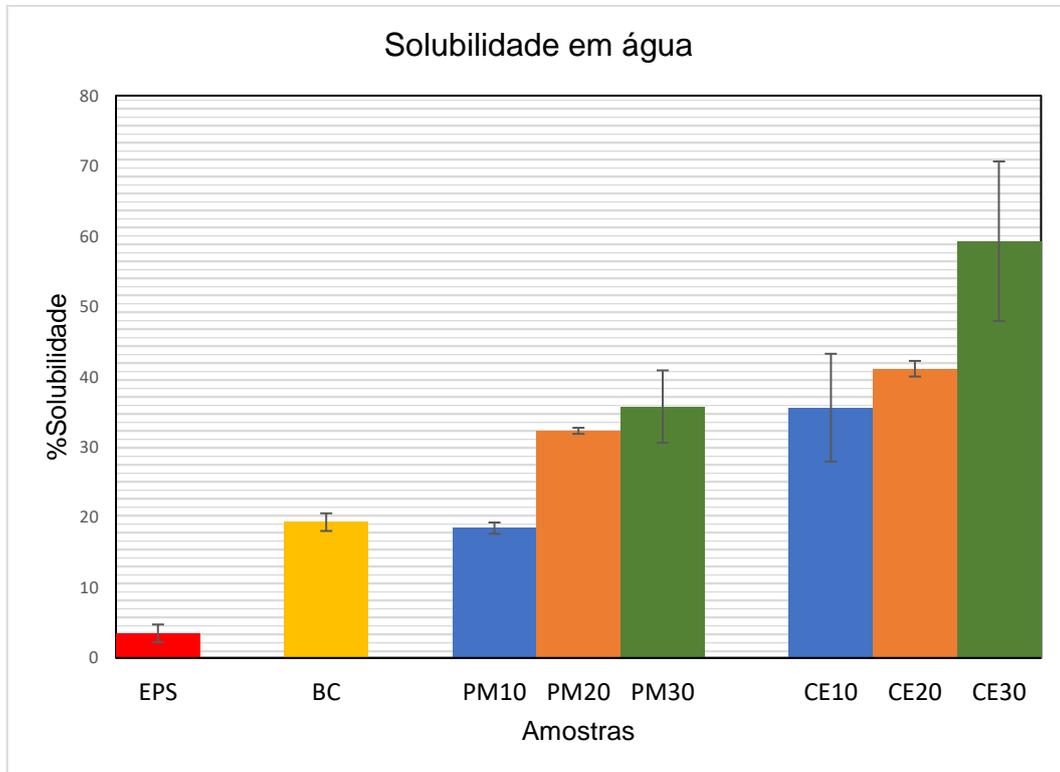


Figura 34: Resultados de solubilidade em água.

EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar); Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho); Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante).

O EPS apresenta a menor solubilidade em água (3,5%), confirmando sua característica de resistência à água. Este material é amplamente utilizado em embalagens e outras aplicações onde a resistência à umidade é crucial. O material controle (BC) mostra uma solubilidade de aproximadamente 19,31%. O resultado indica que, embora seja mais solúvel que o EPS, o BC ainda mantém uma resistência considerável à água. Isso pode ser atribuído à composição de amido, água, glicerol e farelo de cana-de-açúcar, onde o amido e o farelo proporcionam uma certa resistência à dissolução. Os compósitos reforçados com palha de milho (PM) no material de controle apresentaram uma solubilidade crescente com o aumento da concentração de palha de milho. Partindo de aproximadamente 18,47% para PM10, 32,31% para PM20, e 35,76% para PM30. O resultado sugere que a palha de milho contém componentes que aumentam a interação

com a água, tornando o material mais solúvel. No entanto, a solubilidade adicional não é tão alta quanto a dos biocompósitos reforçados com capim elefante. Os biocompósitos reforçados com capim elefante (CE) também mostram aumento na solubilidade com a concentração, mas de forma mais pronunciada. O CE tem solubilidade de aproximadamente 35,61%, CE20% de aproximadamente 41,14%, e CE30% de aproximadamente 59,28%. O aumento significativo indica que o capim elefante possui propriedades altamente hidrofílicas, resultando em maior dissolução do material em água.

Os resultados obtidos foram parecidos aos autores MARENCO et al. (2013), FERREIRA, (2018) e CORRADINI et al. (2013) que depois alegaram que elevadas solubilidades em água não inviabilizam o uso desses compósitos para embalagens biodegradáveis, mas direciona a aplicação do biocompósito como embalagem. Para alimentos com baixa umidade ou que não liberam líquidos comprometendo a integridade do material, essas embalagens podem ser úteis. Em casos de baixa exsudação, o material biocompósito pode absorver o líquido exsudado, retardando a proliferação de microrganismos e melhorando a aparência e a vida útil do produto. A composição química dos subprodutos influencia directamente na solubilidade dos materiais biocompósitos.

Segundo FRANCISCO JÚNIOR (2008) apud FERREIRA (2018) carboidratos como o amido e a celulose possuem baixa solubilidade em água devido às ligações de hidrogénio intermoleculares. As ligações intermoleculares ocorrem dentro das moléculas de carboidratos, formando uma rede interna de ligações de hidrogénio que reduz a capacidade dessas moléculas de interagirem com a água e, conseqüentemente, de se dissolverem. As proteínas, por outro lado, hidratam-se de acordo com a quantidade de resíduos de aminoácidos carregados presentes em sua estrutura.

A hemicelulose, é um componente da fibra lignocelulósica hidrofílico, o que significa que possuem uma afinidade natural pela água. Devido a essa propriedade, as fibras tendem a aumentar a solubilidade dos materiais nos quais estão incorporadas. Estudos realizados por CORRADINI et al. (2013) demonstraram que o aumento do teor de fibras em materiais à base de amido leva a uma maior absorção de água. Por exemplo observaram que a inclusão de fibras em biocompósitos de amido aumentou significativamente a absorção de água.

4.2.4. Microscopia óptica para os biocompósitos

A figura 35 fornece uma visualização microscópica das superfícies dos diferentes materiais: EPS (BC), e biocompósitos reforçados com diferentes percentagens de palha de milho e capim elefante.

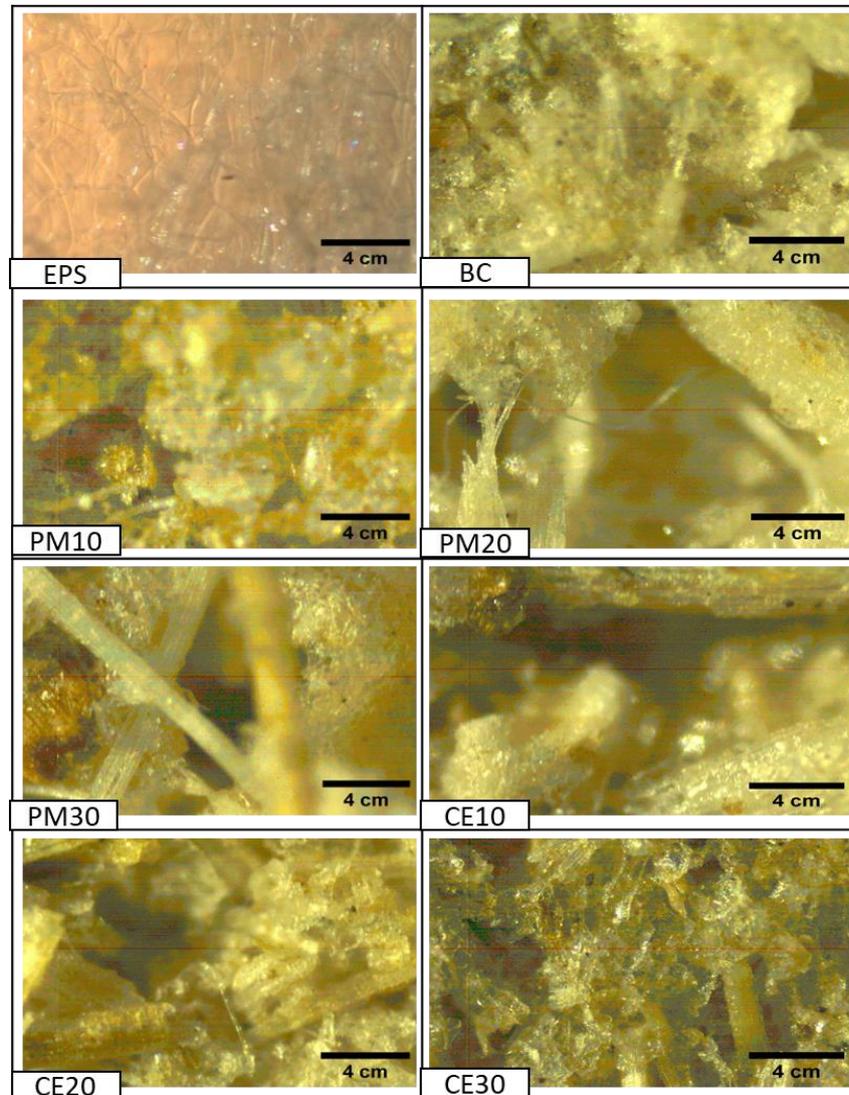


Figura 35: Resultados de microscopia óptica

EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar);

Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho);

Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante).

A análise da micrografia do poliestireno expandido (EPS) revela uma superfície lisa e uniforme, característica do material. A estrutura observada é homogênea, apresentando uma aparência translúcida, que justifica a coloração acastanhada vista na imagem obtida pelo microscópio. A coloração pode ser atribuída ao sentido de iluminação ascendente.

A estrutura interna do EPS é composta por células fechadas cheias de ar, conferindo ao material leveza e excelente capacidade de isolamento térmico. A ausência de fibras ou partículas sólidas na micrografia confirma que o EPS é um material puro, sem aditivos ou reforços. O material controle (BC), possui uma superfície visivelmente mais irregular e rugosa em comparação com o EPS. A micrografia revela uma estrutura granular e fibrosa, com a presença de partículas homogêneas. As características são consistentes com a composição do BC, que inclui farelo de cana-de-açúcar misturado com amido, água e glicerol. Segundo RAZERA (2006) rugosidade e a presença de fibras sugerem que o material possui uma maior complexidade estrutural, o que pode influenciar em certas propriedades.

As micrografias dos biocompósitos reforçados com palha de milho (PM10, PM20 e PM30) demonstram um aumento na complexidade estrutural à medida que a percentagem de palha de milho é incrementada. As fibras de palha de milho são claramente visíveis e se tornam mais predominantes com o aumento da concentração de PM. No PM10, a estrutura ainda é relativamente homogênea, com algumas fibras de palha de milho dispersas. No PM20, a presença de fibras é mais evidente, tornando a superfície mais irregular e fibrosa com formação de filamentos mais visíveis. No PM30, a superfície apresenta uma densidade significativa de fibras, com uma estrutura muito mais complexa e entrelaçada. A evolução na estrutura sugere que a adição de palha de milho não apenas modifica a textura superficial, mas também pode influenciar a resistência mecânica e outras propriedades físicas, como a solubilidade em água, devido à maior exposição das áreas fibrosas (GOMES DOS SANTOS et al., 2016 e LATIFA BOUDJEMA, 2015).

As micrografias dos biocompósitos reforçados com capim elefante (CE10, CE20 e CE30) mostram uma tendência inversa a palha de milho. No biocompósito CE10 (90% BC + 10% CE), as fibras de capim elefante não estão moderadamente distribuídas na matriz, resultando em uma superfície que começa a exibir fracas interações. Observam-se espaços escuros na micrografia, indicando regiões com menor reflexão de luz, o que sugere que essas fibras aumentaram ligeiramente a porosidade da matriz do bagaço de cana e não haver formação de filamentos visíveis.

Os estudos realizados pelos autores BONSE et al. (2015), FERNANDO GOMES DOS SANTOS et al. (2016) e RAZERA (2006) identificaram resultados semelhantes ao trabalhar com fibras de coco, sisal e curauá, destacando que a ausência de um pré-

tratamento das fibras contribui para a baixa afinidade entre a matriz e as fibras. Os autores explicaram que a alta concentração de lignina de algumas fibras actua como uma barreira que impede uma interacção eficaz com a matriz polimérica.

4.2.5. Propriedades mecânicas para os biocompósitos

A figura 36 ilustra o resultado em forma de gráfico obtido pelo programa “winTest Analysis” para EPS e diferentes materiais compósitos submetidos ao ensaio de tracção.

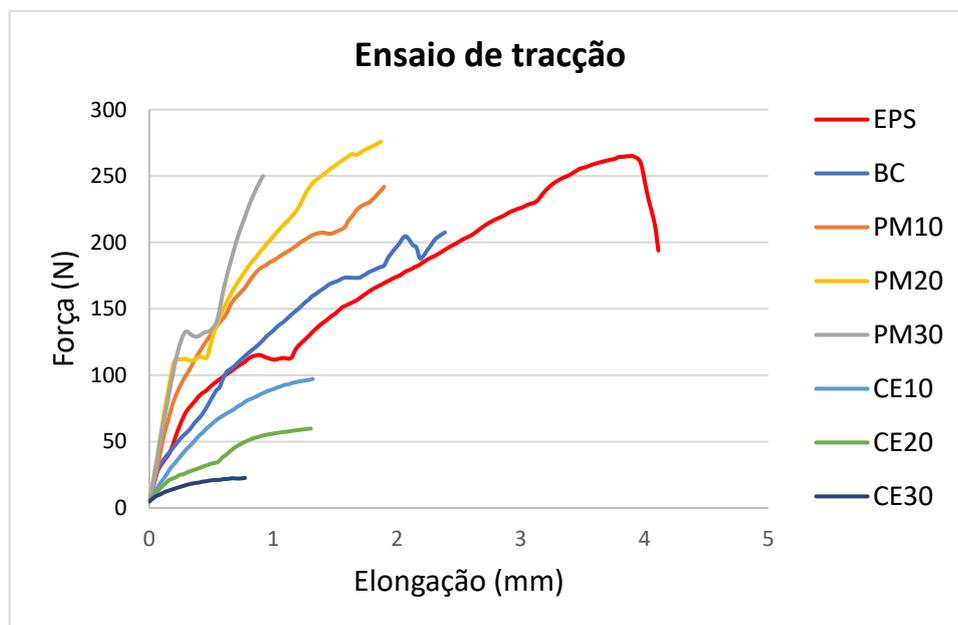


Figura 36: Resultados do ensaio de tracção.

EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar);
Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho);
Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante).

O EPS apresenta alta resistência à tracção e maior elongação antes da ruptura, demonstrando comportamento mais dúctil em comparação aos biocompósitos. O biocompósito de controle (BC) oferece um equilíbrio entre resistência e alongamento, servindo como referência para os biocompósitos reforçados. A adição de palha de milho como reforço aumenta a resistência máxima, mas reduz o alongamento, indicando maior resistência e menor ductilidade. MARENGO et al. (2013) obtiveram resultados semelhantes com reforços diferentes dos utilizados neste estudo, atribuíram a justificação desses resultados à combinação de alta densidade (maior compactação e menor porosidade), elevado teor de umidade, e à composição rica em celulose e hemicelulose, além de moderados níveis de lignina.

O capim elefante resulta em biocompósitos com menor resistência e alongação em comparação com a palha de milho e o controle. Segundo FERREIRA (2018), CORRADINI et al. (2013) e MADELLA e MELO (2022) que obtiveram o mesmo resultado para bagaço de laranja, justificaram o resultado à baixa densidade (menor compactação e maior porosidade) e altos níveis de umidade, que aumentam a mobilidade das cadeias macromoleculares e reduzem a resistência à tracção, compressão e flexão. A presença de água entre as cadeias poliméricas diminui a força de atracção entre elas, reduzindo a rigidez e a resistência do compósito. A tabela 7 ilustra os resultados obtidos relativamente a tensão de ruptura e deformação no pico. Com base na figura 36 foi possível determinar o modulo de Young nas regiões que os gráficos tendiam a uma linearidade e compara-lo ao EPS.

Tabela 7: Resultados do cálculo do módulo de Young.

Fonte: autor

Amostra	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação no pico (%)	Módulo de Young aproximado (GPa)
EPS	1,10 ± 0,01	3,85 ± 0,06	20,81
BC	0,89 ± 0,06	1,43 ± 0,55	30,88
PM10	1,01 ± 0,04	1,11 ± 0,12	125,26
PM20	1,03 ± 0,04	1,14 ± 0,41	127,15
PM30	1,21 ± 0,27	0,60 ± 0,1	125,08
CE10	0,45 ± 0,05	0,86 ± 0,04	28,48
CE20	0,26 ± 0,09	0,78 ± 0,09	26,54
CE30	0,08 ± 0,01	0,45 ± 0,03	10,27

EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar); Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho); Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante).

O EPS se destaca pela combinação de alta resistência à tracção (1,104 MPa) e alta deformação no pico (3,851%), características que o tornam ideal para aplicações que exigem tanto força quanto capacidade de deformação. Em comparação, os biocompósitos de palha de milho (PM), especialmente o PM30, apresentam uma resistência à tracção ainda maior (1,21 MPa), mas com menor deformação no pico (1,03% a 1,14%), indicando maior fragilidade e menor ductilidade. Os resultados

corroboram com o estudo de DE OLIVEIRA NETO et al. (2015), que associou o aumento do Módulo de Young à maior rigidez dos materiais, com os biocompósitos de PM exibindo Módulos de Young elevados (125,08 a 127,15 GPa), superiores ao do EPS (20,81 GPa).

Por outro lado, os biocompósitos de capim-elefante (CE) apresentaram as menores resistências à tracção (0,083 a 0,45 MPa) e Módulos de Young (10,27 a 28,48 GPa), reflectindo menor rigidez e resistência, semelhante ao observado por Ferreira (2018) em biocompósitos de bagaço de laranja. Além disso, o EPS, com sua maior deformação no pico, mostra maior ductilidade em comparação às amostras de PM, que, embora mais resistentes, possuem menor alongação. FERREIRA (2018) e MARENGO et al. (2013) destacaram que a densidade e a força de ligação interna são cruciais para a resistência do biocompósito, pois quanto maior a densidade do biocompósito maior será a compactação e consequentemente a resistência a tracção aumenta.

4.2.6. Teste de biodegradabilidade os biocompósitos

A figura 37 mostra o resultado a partir do gráfico do ataque biológico ou teste de biodegradabilidade do Poliestireno expandido (EPS) e compósitos biodegradáveis

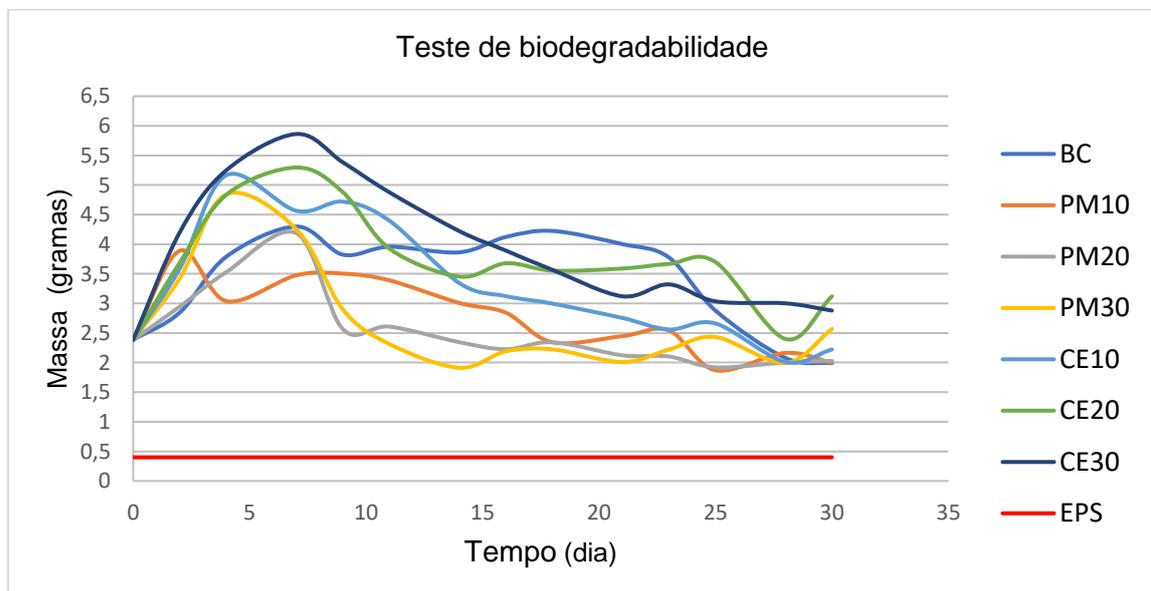


Figura 37: Resultado do teste de biodegradabilidade.

EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar);
 Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho);
 Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante).

Observa-se no gráfico da figura 37 que na primeira fase, todos os biocompósitos diferente do EPS (que manteu a sua massa ao longo do processo), apresentaram um

aumento de massa, atingindo um pico que varia conforme a composição. O biocompósito CE30 alcança o maior pico, sugerindo maior absorção de umidade ou outras interações sendo esta a justificção proposta por FERREIRA (2018). Após o pico, todos os biocompósitos mostraram uma redução de massa, indicando biodegradação. Segundo VAVERKOVÁ e ADAMCOVÁ (2015) o processo ocorreu porque, ao aumentar a quantidade de reforço, até certo ponto, há uma incompatibilidade entre o bagaço de cana e os reforços, permitindo mais facilidade na entrada de umidade. A figura 38 ilustra visualmente imagens da biodegradação progressiva dos biocompósitos ao longo do tempo, destacando as diferenças no grau de deterioração entre as amostras.

Dias \ Amostra	Dia 0	Dia 2	Dia 4	Dia 10	Dia 30
EPS					
BC					
PM10					
PM20					
PM30					
CE10					
CE20					
CE30					

Figura 38: Biodegradabilidade dos biocompósitos.

Fonte: autor

4.2.7. Ataque químico para os biocompósitos

A Tabela 8 mostra os resultados da integridade estrutural obtidos após submeter as amostras de EPS e biocompósitos a diferentes soluções de pH, onde as principais análises visuais são tidas na coluna de observações.

Tabela 8: Resultados do ataque químico.

Fonte: autor

pH Amostra	pH			Observações da Integridade
	4	7	9	
EPS	---	---	---	Estável (coloração const.)
BC	28,04 ± 2,13	33,59 ± 0,57	34,59 ± 0,71	Estável (coloração alterada)
PM10	29,20 ± 1,38	31,71 ± 5,83	27,79 ± 0,77	Estável (coloração alterada)
PM20	43,75 ± 2,21	41,68 ± 2,43	43,79 ± 1,85	Estável (coloração alterada)
PM30	42,41 ± 2,80	52,37 ± 3,91	51,67 ± 2,92	Parcialmente estável
CE10	50,65 ± 0,86	36,55 ± 0,56	56,90 ± 1,50	Instável
CE20	60,31 ± 2,84	64,87 ± 1,19	40,56 ± 2,46	Instável
CE30	73,09 ± 2,50	67,5 ± 3,19	65,11 ± 1,41	Instável

EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar);
Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho);
Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante).

Os biocompósitos que incluem capim-elefante (CE10, CE20, CE30) demonstram uma menor estabilidade estrutural, particularmente em ambientes mais alcalinos (pH 9). Em contraste, os biocompósitos feitos com palha de milho (PM10, PM20, PM30) são mais resistentes, especialmente PM10, que manteve a estrutura estável em todos os pHs. Essas observações podem ser vistas na figura 39 e sugerem que a escolha do tipo de fibra vegetal é crucial para determinar a resistência do biocompósito em diferentes condições de pH.



Figura 39: (a) Estável; (b) Parcialmente estável; (c) Instável.

Fonte: autor

4.2.8. Gases emitidos após a combustão

Os resultados do analisador de gases revelaram concentrações constantes e nulas de CH_4 e CO , e uma concentração estável e constante de O_2 (20,9%), impossibilitando uma análise significativa desses gases. Em contrapartida, o CO_2 , o SO_2 e o NO_2 apresentaram variações detectáveis, sendo substâncias os principais para análise.

4.2.8.1. Emissão do gás carbônico

O gráfico da figura 40 apresenta a emissão de gás carbônico (CO_2) em função do tempo, com as concentrações de CO_2 medidas (linha amarela) e o limite de CO_2 (linha vermelha).

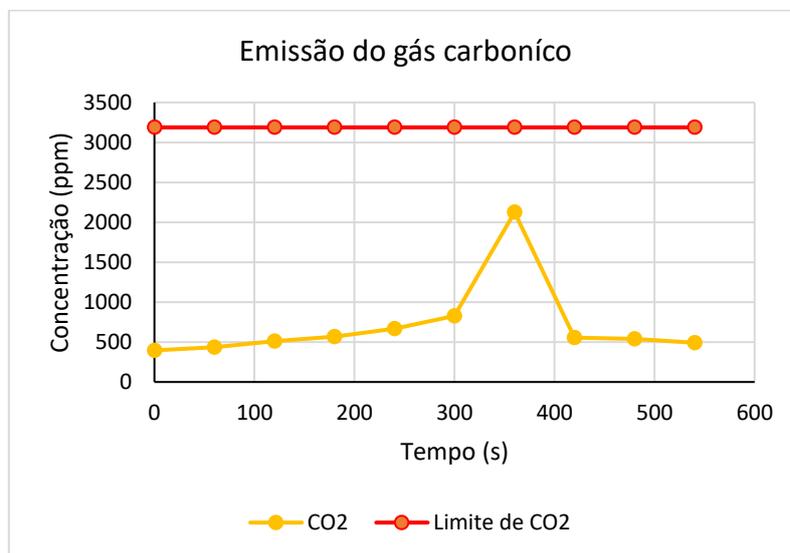


Figura 40: Resultados de emissão do gás carbônico.

Os resultados revelam que a emissão de CO_2 permaneceu consistentemente abaixo do limite regulamentar, o que é um indicativo positivo em termos de conformidade ambiental e segurança. Observa-se um pico de emissão em torno de 360 segundos, onde a concentração de CO_2 atinge aproximadamente 2125 ppm. O aumento súbito sugere uma rápida degradação térmica do biocompósito, provavelmente devido à combustão das fibras lignocelulósicas e do amido. Após o pico, a concentração de CO_2 diminuiu, o que pode indicar a conclusão da fase mais intensa da combustão, com a queima da maior parte dos componentes orgânicos voláteis. O comportamento do biocompósito biodegradável é típico de materiais orgânicos, que sofrem degradação térmica e combustão ao serem expostos a altas temperaturas (GULERIA et al., 2017).

4.2.8.2. Emissão dos óxidos de Nitrogénio e Enxofre

O gráfico apresentado na figura 41 exibe a concentração de emissões de NO₂ (dióxido de nitrogénio) e SO₂ (dióxido de enxofre) ao longo do tempo durante a queima do biocompósito. As linhas horizontais no gráfico representam os limites máximos permitidos para NO₂ e SO₂, com os valores em torno de 0,4 ppm para NO₂ e 0,5 ppm.

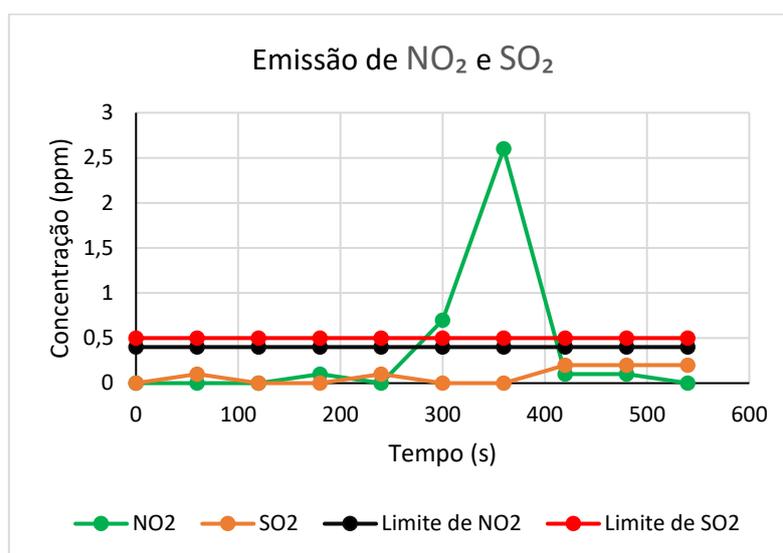


Figura 41: Resultados de emissão de NO₂ e SO₂.

Inicialmente, tanto as emissões de NO₂ quanto as de SO₂ se mantêm bem abaixo dos limites regulamentares, indicando que o material libera apenas pequenas quantidades de poluentes durante as fases iniciais da queima. A emissão de NO₂ apresenta um pico significativo por volta de 350 segundos, onde a concentração atinge cerca de 2,5 ppm, ultrapassando consideravelmente o limite permitido de 0,4 ppm. A elevada concentração de NO₂ pode estar relacionada à presença de compostos nitrogenados no material, possivelmente ligados à proteína bruta. Como o nitrogénio tem uma relação directa com o teor de proteína, materiais que contêm resíduos de proteínas ou compostos nitrogenados tendem a liberar óxidos de nitrogénio (NO₂) durante a queima

Em contraste, as emissões de SO₂ permaneceram estáveis e consistentemente abaixo do limite máximo de 0,5 ppm ao longo de todo o experimento. Isso sugere que o material contém pouca ou nenhuma quantidade de compostos sulfurados que poderiam se decompor para formar SO₂.

4.3. SELECÇÃO DO BIOCOMPÓSITO E ELABORAÇÃO DO PROTÓTIPO DA EMBALAGEM

Os biocompósitos reforçados com palha de milho (PM) nas concentrações de 10%, 20% e 30% apresentaram um desempenho superior em diversos aspectos demonstrando maior resistência mecânica, durabilidade e exibiram uma integridade estrutural mais robusta, especialmente em ambientes químicos adversos. Embora os biocompósitos reforçados com capim-elefante (CE) tenham mostrado melhor desempenho em propriedades específicas, como biodegradabilidade, a palha de milho proporcionou uma estrutura mais uniforme e estável. A micrografia das amostras com 20% e 30% de PM evidenciou uma distribuição compatível das fibras dentro da matriz de amido e bagaço de cana-de-açúcar, o que foi fundamental para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos biocompósitos.

A figura 42 mostra os protótipos das embalagens desenvolvidas a partir dos biocompósitos, reforçados com palha de milho (PM) em diferentes proporções.



Figura 42 : Protótipos das embalagens.

Fonte: autor

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

Após a realização do trabalho com o tema "Produção de embalagens biodegradáveis usando biocompósito de matriz polimérica e reforçadas com fibras lignocelulósicas de resíduos vegetais" e considerando os objectivos traçados, conclui-se que:

Resíduos vegetais mais secos, como o bagaço de cana-de-açúcar e a palha de milho, apresentaram fibras mais semelhantes, facilitando a compatibilidade entre sí. Em contraste, o capim-elefante, com sua coloração esverdeada, indicou uma fibra com maior capacidade de absorção de água, diferenciando-se dos outros resíduos seleccionados.

A análise das propriedades físicas e químicas das fibras foi crucial para identificar a adequação de cada resíduo. A palha de milho (PM) destacou-se pela alta densidade, cor intensa e teor de proteína, oferecendo maior resistência e uma aparência sólida ao biocompósito final. O bagaço de cana (BC), mais leve e claro, mostrou-se ideal para aplicações que priorizam leveza e discríção no biocompósito final. O capim-elefante, apesar de inicialmente promissor, teve desempenho inferior em resistência. A caracterização das fibras nos biocompósitos ajudou a prever os níveis de NO₂ emitidos durante a incineração, vinculados ao teor de proteína, apontando a compostagem como alternativa ideal de gerir resíduos gerados por este biocompósitos para valorização do nitrogénio na produção de amónio para biofertilizantes.

Os biocompósitos com palha de milho (PM) nas concentrações de 10%, 20%, e 30% apresentaram superior resistência mecânica, durabilidade e estabilidade estrutural, especialmente em ambientes químicos adversos. Embora os biocompósitos com capim-elefante (CE) tenham se destacado em biodegradabilidade, a palha de milho garantiu uma estrutura mais uniforme e sólida, além de uma cor clara e atraente.

Os biocompósitos produzidos são adequados para embalar produtos que não exsudam grandes quantidades de água ou que tenham baixa umidade, como ovos, cereais, massas secas, especiarias e itens de *fast food*, como *hambúrgueres* e batatas fritas. A combinação de resistência e aparência estética torna-os ideais para embalagens que requerem tanto funcionalidade quanto atractividade visual.

5.2. RECOMENDAÇÕES

Para-se complementar e melhorar os resultados obtidos, num futuro trabalho, recomenda-se:

- Realizar Teste de Barreira de Luz: Avaliar a capacidade do material de suportar diferentes tipos de radiações electromagnéticas, determinando sua eficácia como barreira contra a luz e outros tipos de radiação.
- Tornar viável todos os tipos de Fibras Lignocelulósicas: Desenvolver técnicas para a extracção de lignina, visando reduzir a capacidade de absorção de água das fibras lignocelulósicas, tornando-as mais adequadas para uso em biocompósitos.
- Aproveitar a Lignina Extraída: Utilizar a lignina extraída, aproveitando suas propriedades adesivas, para a produção de bioplásticos, melhorando a matriz de amido e aumentando a resistência dos biocompósitos.
- Explorar Outras Matérias-Primas e Técnicas: Experimentar o uso de diferentes matérias-primas e técnicas, como compactação combinada com termoformagem, para obter melhor compactação dos componentes, resultando em produtos mais homogéneos e com melhores propriedades mecânicas.
- Analisar a Citotoxicidade: Verificar se as bandejas e seus ingredientes apresentam toxicidade, garantindo a segurança do uso.
- Realizar Análise Sensorial: Avaliar a aceitação do produto pelos consumidores, verificando sua receptividade frente às embalagens desenvolvidas.
- Realizar Avaliação Económica: Conduzir uma análise económica para avaliar a viabilidade comercial e o custo-benefício das técnicas e materiais utilizados.

CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFIAS

6.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDRADE COSTA, L., Jácome De Araújo, M., Loiola Edvan, R., Leilson, e, Bezerra, R., Rodrigues De Sousa, A., Carvalho Viana, F. J., Tairon, e, e Dias-Silva, P. (2020). Chemical composition, fermentative characteristics, and in situ ruminal degradability of elephant grass silage containing *Parkia platycephala* pod meal and urea. *Tropical Animal Health and Production*, p.3482–3492.
- [2] AVEROUS, L., e Boquillon, N. (2004). Biocomposites based on plasticized starch: Thermal and mechanical behaviours. *Carbohydrate Polymers*, vol.56, p.111–122.
- [3] BANCO MUNDIAL. (2021). *Desafios e Oportunidades Economia Circular dos Plásticos em Moçambique*.
- [4] BEATRIZ, A., Araújo, Y. J. K., e Pires De Lima, D. (2011). Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas. In *Quim. Nova* Vol. 34.
- [5] BOHN, L. R., Casara, V. P., Dresch, A. P., Mibielli, G. M., e Bender, J. P. (2017). Caracterização físico-química da palha de milho obtida durante a etapa de colheita. *XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química Em Iniciação Científica*, p.2–5.
- [6] BONSE, B. C., A. de Sousa, A., Guerrero, C., e Ferreira, A. C. B. (2015). Compósito de poliéster insaturado e fibras vegetais: uso em Biocuba para lavabos. *XIII Congresso Brasileiro de Polímeros*, p.1–5.
- [7] BÖRCSÖK, Z., e PÁSZTORY, Z. (2021). The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey. In *European Journal of Wood and Wood Products* Vol. 79, p. 511–526.
- [8] CALEGARI, E. P., e Oliveira, B. F. de. (2016). Compósitos a partir de materiais de fontes renováveis como alternativa para o desenvolvimento de produtos. *Sustainability in Debate*, vol.7, p.140–155
- [9] CALLISTER, W. D., e RETHWISCH, D. G. (2010). *Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução* Wiley, (Ed. 8ª), Vol. 1.
- [10] CLAUSER, N. M., Gutiérrez, S., Srea, A. M., Felissia, F. E., e Vallejos, M. E. (2016). Small-sized biorefineries as strategy to add value to sugarcane bagasse. *Chemical Engineering Research and Design*, p.137–146.

- [11] COMMISSION ON ENVIRONMENT, W. (2011). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Towards Sustainable Development 2. Part II. Common Challenges Population and Human Resources 4.*
- [12] CORRADINI, E., Ferreira, F. C., Agnelli, J. A. M., Marconcini, J. M., Mattoso, L. H. C., e Rosa, M. F. (2013). Absorção de água, solubilidade em água, propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos de glúten de milho e poli(hidroxibutirato-co-valerato) (PHBV) reforçados com fibras de coco verde. *Polimeros*, vol.23, p.807–813.
- [13] DANISH, M. (2024). Advances in Protein-Based Biodegradable Films: A Review. *Journal of Packaging Technology and Research*, vol.8, p.109–119.
- [14] DE OLIVEIRA NETO, G. C., Filho, M. G., Ganga, G. M. D., Naas, I. A., e Vendrametto, O. (2015a). Principles and tools of cleaner production: An exploratory study in Brazilian companies. *Gestao e Producao*, vol.22, p.326–344.
- [15] DÍAZ-MENDOZA, C., Mouthon-Bello, J., Lucia Pérez-Herrera, N., e María Escobar-Díaz, S. (2020). Plastics and microplastics, effects on marine coastal areas: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, p.39914–39922.
- [16] MANOEL, E. R. S., Ruani, F. S. F. de A., e Marinaldo, C. R. (2011). Morfologia De Fitômeros De Capim-Elefante Morphology Of Elephantgrass Phytomeres. *Revista Brasileira de Agropecuária vol. 1*, p.108–116.
- [17] ENAWGAW, H., Tesfaye, T., Yilma, K. T., e Limeneh, D. Y. (2023). Multiple Utilization Ways of Corn By-Products for Biomaterial Production with Bio-Refinery Concept; a Review. *Materials Circular Economy*, vol.5, p.5–14.
- [18] FARIANI, A., Pratama, A. N. T., Muslim, G., e Warly, L. (2022). Digestibility Quality of Elephant Grass (*Pennisetum purpureum*) and Concentrate with The Addition of Urea Molasses In Vitro. *Jurnal Sain Peternakan Indonesia*, vol.17, p.211–215.
- [19] FARRELLY, T. A., e Shaw, I. C. (2017). Polystyrene as Hazardous Household Waste. In *Household Hazardous Waste Management*. InTech.
- [20] FARUK, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., e Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. In *Progress in Polymer Science Vol. 37*, p.1552–1596.
- [21] FERNANDO, R., Salazar, S., Lúcia, M., e Pinto Da Silva, C. (2005a). *Estudo da composição da palha de milho para posterior utilização como suporte na preparação de compósitos.*
- [22] FERNANDO, R., Salazar, S., Lúcia, M., e Pinto Da Silva, C. (2005b). *Estudo da composição da palha de milho para posterior utilização como suporte na preparação de*

compósitos. *VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química Em Iniciação Científica*, p.1–6.

[23] FERREIRA, D. C. M. (2018). *Desenvolvimento de embalagens sustentáveis a partir de subprodutos agroindustriais* [Dissertação]. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Meuri.

[24] FILHO, C., Barbosa, M. A. A. F., Oliveira, R. L., e Bagaldo, A. R. (2007). Valor nutritivo da palha de milho verde para bovinos Nutritional value of the straw of green maize for bovines. *Rev. Bras. Saúde Prod. An*, vol.2, p.112–121.

[25] FREITAS, A. W. de P., Rocha, F. C., Zonta, A., Fagundes, J. L., Fonseca, R. da, Zonta, M. C. de M., e Macedo, F. L. (2008). Consumo de nutrientes e desempenho de ovinos alimentados com dietas à base de cana-de-açúcar hidrolisada. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, vol.43, p.1569–1574.

[26] GALATI, R. L. (2021). Alimentos e Alimentação Animal. In *Alimentos e Alimentação Animal*. Editora Científica Digital.

[27] CUTTER, A. G. C. (2008). *Development and Characterization of Renewable Resource-based Structural Composite Materials* [Dissertação de Mestrado]. University of California, San Diego.

[28] GOMES DOS SANTOS, L. F., Antônio de Souza Formiga, L., da Silva Rodrigues, J., e Silva Silva, C. (2016). Desenvolvimento De Compósitos De Amido Termoplástico Reforçados Com Fibras De Curauá Natural Da Amazônia Eco-Compósitos De Amido Com Fibras De Curauá. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol.17, p.230–239.

[29] CHRISTENSEN, M. (2023). *Greenpeace International Annual Report*.

[30] GULERIA, A., Singha, A. S., e Rana, R. K. (2017). Preparation of starch-based biocomposites reinforced with mercerized lignocellulosic fibers: Evaluation of their thermal, morphological, mechanical, and biodegradable properties. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol.22, p.595–609.

[31] KAISANGSRI, N., Kerdchoechuen, O., e Laohakunjit, N. (2012). Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan. *Industrial Crops and Products*, vol.37, p.542–546.

[32] KESTUR, G. S. (2010). Biodegradable polymer composites based on brazilian lignocellulosic. *Revista Matéria*, vol.15, p.89–90.

- [33] KHOO, H. E., Prasad, K. N., Kong, K. W., Jiang, Y., e Ismail, A. (2011). Carotenoids and their isomers: Color pigments in fruits and vegetables. In *Molecules* Vol. 16, p.1710–1738.
- [34] KÖSELERLI, S. Ü., Gücüş, M. O., e Uslu, M. K. (2023). Production of Biodegradable Composite Plates from Cross-Linked Starch and Cellulosic Fibers. *BioResources*, vol.18, p.6772–6783.
- [35] LATIFA BOUDJEMA, H. (2015). Studies on the Properties of Cellulose Fibers-Reinforced Thermoplastic Starch Composites. *Journal of Chemistry and Materials Research* , ., vol.3, p.21–25.
- [36] LETCHER, T., e Vallero, D. A. (2011). *Waste Management Handbook*.
- [37] LIM, Y. S., Izhar, T. N. T., Zakarya, I. A., Yusuf, S. Y., Zaaba, S. K., e Mohamad, M. A. (2021). Life cycle assessment of expanded polystyrene. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 920(1).
- [38] LUCHESE, C. L. (2018). *Desenvolvimento de embalagens biodegradáveis a partir de amido contendo subprodutos provenientes do processamento de alimentos* [Tese de Doutorado]. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul.
- [39] MADAKADZE, I. C., Masamvu, T., Li, J., e Smith, D. L. (2010a). Evaluation of pulp and paper making characteristics of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum) and switchgrass (*Panicum virgatum* L.). *African Journal of Environmental Science and Technology*, vol.4, p.465–470.
- [40] MADAKADZE, I. C., Masamvu, T., Li, J., e Smith, D. L. (2010b). *Evaluation of pulp and paper making characteristics of elephant grass (Pennisetum purpureum Schum) and switchgrass (Panicum virgatum L.)*.
- [41] MADELLA, D. K. S. F., e Melo, N. R. de. (2022). Material de base orgânica como alternativa para embalagem de produtos alimentícios. *Research, Society and Development*, 11(10),
- [42] MALI, S., Grossman, M. V. E., e Yamashita, F. (2010). Starch films: production, properties and potential of utilization. *Industrial Crops and Products*, vol.32, p.353–359.
- [43] MARENGO, V. A., Elisa, A., Vercelheze, S., e Mali, S. (2013). Compósitos Biodegradáveis De Amido De Mandioca E Resíduos Da Agroindústria. *Quim. Nova*, vol.36, p.680–685.
- [44] MATIGNON, A., e Tecante, A. (2017). Starch retrogradation From starch components to cereal products. Food Hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, vol.68, p.43–52.
- [45] *MozAzul Inovação*. (2021). P.58–59.

- [46] MUJTABA, M., Fernandes Fraceto, L., Fazeli, M., Mukherjee, S., Savassa, S. M., Araujo de Medeiros, G., do Espírito Santo Pereira, A., Mancini, S. D., Lipponen, J., e Vilaplana, F. (2023). Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. In *Journal of Cleaner Production*, Vol. 402.
- [47] OLIVO, C. J., Serafi, G., li, M., Da, R., e Correa, I. I. (2013). Produtividade e proteína bruta de pastagens de capim elefante manejadas sob os sistemas agroecológico e convencional. *Ciência Rural, Santa Maria*, vol.43, p.1471–1477.
- [48] PATRÍCIO SILVA, A. L., Prata, J. C., Walker, T. R., Campos, D., Duarte, A. C., Soares, A. M. V. M., Barcelò, D., e Rocha-Santos, T. (2020). Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Science of the Total Environment*, vol. 1, p.2–8.
- [49] PRISCILA, A., Nascimento, S., Leal Barros, S., Santos, N. C., Júlia De Brito Araújo, A., Sylvia, A., De Rangel, R., Cavalcanti, M., Elita, M., e Duarte, M. (2018). Secagem Convectiva E Influência Da Temperatura Nas Propriedades Físico-Químicas Das Amêndoas De Girassol Comercial Convective Drying And Influence Of Temperature On Physicochemical Properties Of Commercial Sunflower Almonds. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, vol.5, p.227–238.
- [50] RABELLO, M., e De Paoli, M. A. (2013). *Aditivação De Termoplásticos* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Paraná.
- [51] RAIMUNDO, C., e Grosso, F. (2006). Effect of thermal and enzymatic treatment on the properties of gelatin films. *Article in Food Science and Technology*, vol.3, p.495–501.
- [52] RAVINDRANATHAN, R. (2016). Biodegradable Polymers for Sustainable Packaging Applications: A Review. *International Journal of Bionics and Biomaterials*, vol.2, p.1–11.
- [53] reciclasampa.com.br/artigo/derivado-do-plastico-isopor-e-reciclavel, 23 de Julho de 2024
- [54] RAZERA, I. A. T. (2006). *Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica* [Tese de doutoramento]. Instituto De Química De São Paulo.
- [55] ROMÃO, D. R. (2015). *Potencial De Fibras De Resíduo Agrícola: Palha De Milho (Zea Mays L.) Para Produção De Celulose*.

- [56] SAMIR, A., Ashour, F. H., Hakim, A. A. A., e Bassyouni, M. (2022). Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. In *npj Materials Degradation* Vol. 6, p.2–29.
- [57] SASTRE, R. M., de Paula, I. C., e Echeveste, M. E. S. (2022). A Systematic Literature Review on Packaging Sustainability: Contents, Opportunities, and Guidelines. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14.
- [58] SEIBT, D. C., Olivo, C. J., Alessio, V., Sauter, C. P., Bratz, V. F., e Aguirre, P. F. (2021). Forage mass and nutritional value of elephant grass intercropped with forage legumes¹. *Revista Ceres*, vol.68, p.429–440.
- [59] SOUZA, S. de M. P., Dutra, M. B. de L., e Guitiérrez, A. L. L. (2019). Desenvolvimento de Bandeja Biodegradável a partir de Amido de Milho e fibra da Moringa Oleífera. *Conhecimento Verde*, vol.2, p.3–9.
- [60] SUDELL FIMMM, B. C., e Rosemaund, A. (1995). *Industrial Fibres: Recent and Current Developments*.
- [61] SUN, J. X., SUN, X. F., ZHAO, H., e SUN, R. (2004). *Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. Polymer Degradation and Stability*.
- [62] UENO, R. K., Neumann, M., Perussolo, L. F., Gheller, L. F. M., Poczynek, M., Barcellos, J. O. J., e Bumbieris, V. H. (2016). Introduction of sugar cane bagasse pellets in diets devoid of long fiber for feedlots finished steers. *Semina:Ciencias Agrarias*, vol.37, p.3305–3316.
- [63] VAN DER BURGT, M. C. (1996). *The influence of starch molecular mass on the properties of extruded thermoplastic starch* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal De Campinas.
- [64] VAVERKOVÁ, M. D., e Adamcová, D. (2015). Biodegradability of bioplastic materials in a controlled composting environment. *Journal of Ecological Engineering*, vol. 16, p.155–160.
- [65] WAHLANG, B. (2011). Utilization of sugarcane bagasse fibre in functional food formulations. [Master of Science]. In *Indian Journal of Pure e Applied Biosciences*, Vol. 8.

6.2. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- [1] ASTM 6400-03. *ASTM D 6400 Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions Report Prepared For: Aseem Das World Centric.*
- [2] *Color Reader CR-10 Operation Manual.*
- [3] COSTA, É. K. de C. (2016). *Produção e caracterização de nanocristais de amido de mandioca e efeito da sua incorporação em filmes a base da mesma matriz polimérica* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal da Bahia.
- [4] DECRETO N.º 67. (2010). Revisão e actualização dos padrões de qualidade ambiental e à revisão das taxas e multas aplicáveis.
- [5] ISOTTON, F. S., B. G. L., Baldasso, C., Rosa, L. M., e Zeni, M. (2015). The plasticizer effect on preparation and properties of etherified corn starches films. *Industrial Crops and Products*, p.717–724.
- [6] MCKEEN, L. W. (2012). *The effect of sterilization on plastics and elastomers* W. Andrew, Ed.; 4th ed.
- [7] MOHAJERANI, A., Ashdown, M., Abdihashi, L., e Nazem, M. (2017). Expanded polystyrene geofoa m in pavement construction. In *Construction and Building Materials* Vol. 157, p.438–448.
- [8] Plastics Europe. (2016). *Plastics-the Facts 2016 An analysis of European plastics production, demand and waste data.*
- [9] SCHUSTER, J., Duhovic, M., e Bhattacharyya, D. (2012). Manufacturing and Processing of Polymer Composites. *Synthetic Polymer-Polymer Composites*, vol.3, p.1–38.
- [10] SHAH, A. A., Hasan, F., Hameed, A., e Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. In *Biotechnology Advances* Vol. 26, p. 246–265.
- [11] TOLEDO, M. (2020). *3 Ways to Measure Density Know-How, Hints, and More*, Vol. 2, p.7–8.

Apêndices

Apêndice 1: Propriedades Físicas e Químicas dos farelos

Tabela A1- 1: Determinação dos parâmetros de cor

Amostra	L*	\bar{L}	a*	\bar{a}	b*	\bar{b}	c*	\bar{c}	h*	\bar{h}
BC	38,70	38,56	3,60	3,57	18,20	18,16	18,55	18,51	1,37	1,37
BC	38,40		3,50		18,10		18,43		1,37	
BC	38,60		3,60		18,20		18,55		1,37	
PM	31,50	33,40	5,80	6,17	20,30	21,60	21,11	22,46	1,29	1,29
PM	34,50		6,30		22,10		22,98		1,29	
PM	34,20		6,40		22,40		23,29		1,29	
CE	29,60	30,07	3,60	3,87	22,10	22,36	22,39	22,69	1,40	1,39
CE	30,70		4,00		22,60		22,95		1,39	
CE	29,90		4,00		22,40		22,75		1,39	

Tabela A1- 2: Determinação da Densidade

amostra	T _(H₂O) (°C)	P _(H₂O)	P _{picnometro}	P _{Amostra}	P _{Mistura}	$\rho_{Amostra} (\frac{g}{cm^3})$	$\bar{\rho}$	Desvio Padrao
BC	28,00	1,00	137,82	0,30	137,02	0,27	0,29	0,02
	28,00	1,00	137,79	0,30	137,10	0,30		
	28,00	1,00	137,82	0,30	137,08	0,29		
PM	27,80	1,00	137,83	0,31	137,61	0,58	0,52	0,06
	27,40	1,00	137,83	0,30	137,56	0,53		
	28,40	1,00	137,87	0,31	137,50	0,45		
CE	29,00	1,00	137,84	0,30	137,47	0,45	0,38	0,06
	29,60	1,00	137,83	0,31	137,30	0,36		
	29,60	1,00	137,85	0,30	137,25	0,33		

Tabela A1- 3: Determinação do teor de proteína bruta

Amostra	P _{Amostra}	V _{HCl} gasto na titulação	Média	%N	%P.B	$\bar{\%P. B}$	Desvio padrão
BC	1,02	0,48	0,49	0,52	3,23	3,35	0,25
	1,00	0,47		0,51	3,19		
	1,02	0,53		0,58	3,64		
PM	1,08	0,63	0,68	0,68	4,25	4,96	0,83
	1,01	0,65		0,76	4,77		
	1,01	0,78		0,94	5,88		
CE	1,01	0,35	0,38	0,35	2,16	2,44	0,49
	1,01	0,35		0,35	2,17		
	1,02	0,45		0,48	3,00		

Tabela A1- 4: Determinação da série de sólidos

Amotra	P _{cadinho}	P _{Amostra}	P _{Amostra-105°C}	ST	\overline{ST}	Desvio padrão	H	\overline{H}	Desvio Padrao
BC	44,80	5,04	49,49	0,93	0,94	0,01	0,07	0,06	0,01
	39,19	5,00	43,87	0,94			0,06		
	39,19	5,01	43,94	0,95			0,05		
CE	43,27	5,09	48,00	0,93	0,92	0,01	0,07	0,08	0,01
	23,15	5,04	27,77	0,92			0,08		
	43,27	5,07	47,95	0,92			0,08		
PM	50,42	5,00	55,18	0,95	0,94	0,01	0,05	0,06	0,01
	50,42	5,01	55,19	0,95			0,05		
	42,32	5,00	46,98	0,93			0,07		

Amotra	P _{Amostra-550°C}	SV	\overline{SV}	Desvio padrão	SF	\overline{SF}	Desvio padrão
BC	46,03	0,69	0,83	0,13	0,25	0,10	0,12
	39,30	0,91			0,02		
	39,43	0,90			0,05		
CE	43,87	0,81	0,72	0,07	0,12	0,24	0,07
	24,31	0,69			0,23		
	44,52	0,68			0,25		
PM	50,84	0,87	0,86	0,01	0,08	0,08	0,01
	50,95	0,85			0,11		
	42,72	0,85			0,08		

Apêndice 2: Propriedades físicas e químicas dos biocompósitos produzidos

Tabela A2- 1: Determinação de cor dos Biocompósitos

Amostra	L	a+	b+	ΔE	$\overline{\Delta E}$	Desvio Padrão
BC	42,10	11,10	25,20	50,31	52,76	2,18
	46,70	9,20	26,50	54,48		
	46,10	8,50	25,80	53,51		
PM10	43,70	10,90	24,90	51,46	51,74	0,26
	44,10	10,30	25,10	51,78		
	44,20	10,40	25,30	51,97		
PM20	42,00	11,10	25,40	50,32	50,65	0,28
	42,70	10,80	25,40	50,84		
	42,00	11,30	26,20	50,78		
PM30	41,30	11,80	25,60	50,00	49,83	0,16
	40,70	11,00	26,10	49,70		
	41,10	11,40	25,70	49,80		
CE10	43,80	9,80	25,90	51,82	51,50	0,30
	43,40	9,90	25,60	51,3510467		
	43,90	9,90	24,70	51,34		
CE20	42,60	10,00	24,60	50,20	50,12	0,30
	42,10	10,00	24,70	49,82		
	42,60	10,30	24,80	50,36		
CE30	41,50	10,60	25,90	50,05	49,58	0,71
	41,50	10,50	25,70	49,92		
	40,60	10,50	24,90	48,77		

Tabela A2- 2: Determinação dos gases emitidos na combustão

Tempo (s)	Concentração dos gases em (ppm)					
	CH4	O2	CO2	CO	NO2	SO2
0	0	20,9	396	0	0	0
60	0	20,9	437	0	0	0,1
120	0	20,9	510	0	0	0
180	0	20,9	568	0	0,1	0
240	0	20,9	667	0	0	0,1
300	0	20,9	827	0	0,7	0
360	0	20,9	2125	0	2,5	0
420	0	20,9	554	0	0,1	0,2
480	0	20,9	541	0	0,1	0,2
540	0	20,9	491	0	0	0,2
Limite	-	-	3188	40	0,4	0,5

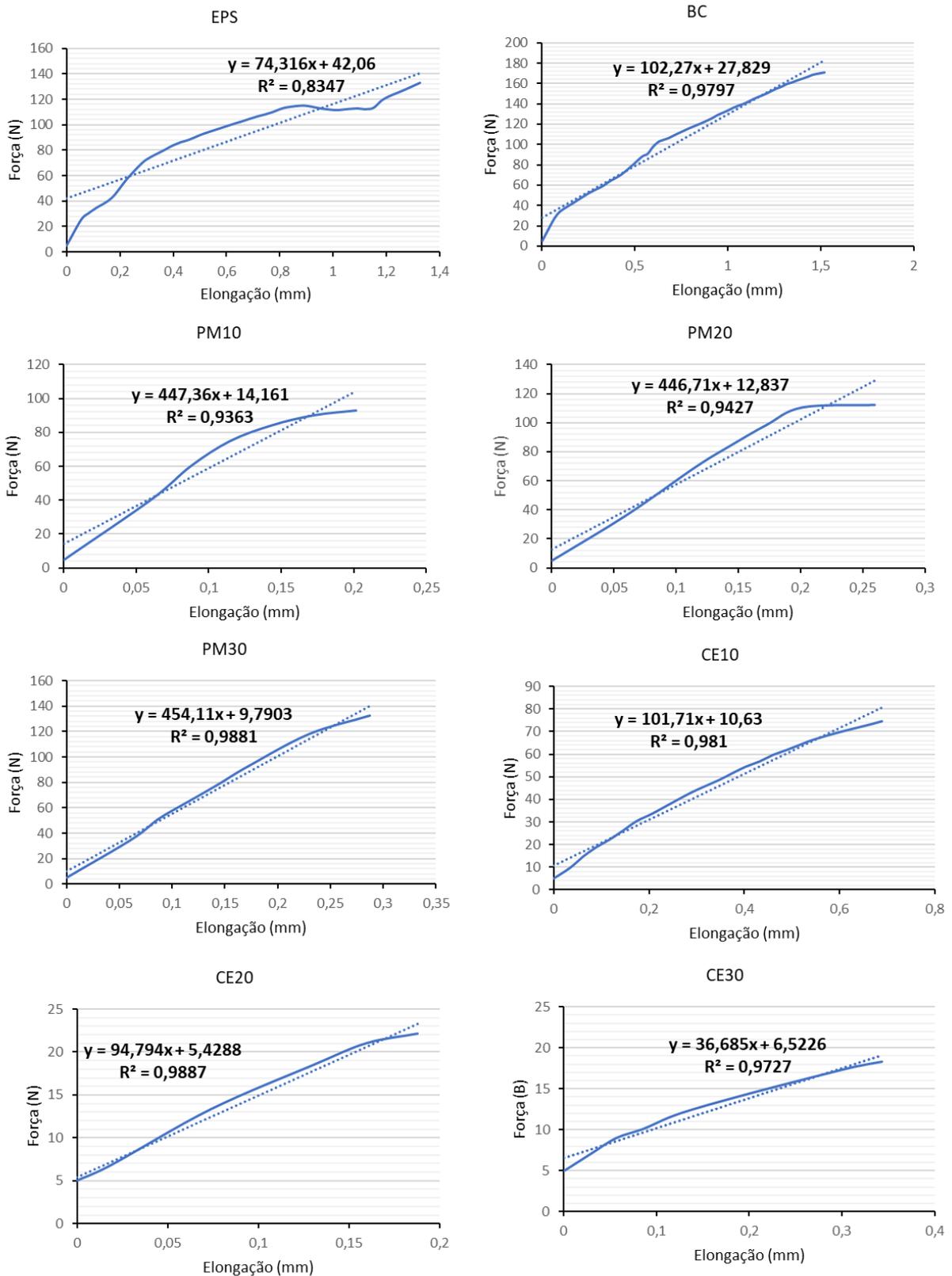
Tabela A2- 3: Determinação da densidade dos Biocompósitos

Amostras	massa	Espessura	C	L	Densidade	Media	Desvi.P
BC	6,84	8,96	51,75	52,03	0,28	0,30	0,02
	6,62	8,46	51,8	51,54	0,29		
	6,82	8,00	51,6	51,72	0,32		
PM10	6,56	8,05	55,64	55,45	0,26	0,30	0,02
	6,51	8,04	51,59	50,54	0,31		
	6,60	8,06	55,74	50,11	0,29		
PM20	7,20	8,25	51,56	53	0,32	0,31	0,01
	6,98	8,39	52,02	54,48	0,29		
	7,12	8,06	51,41	53,87	0,32		
PM30	6,14	7,59	50,45	52,21	0,31	0,31	0,01
	6,22	7,54	49,5	52,1	0,32		
	6,11	7,67	50,37	52,25	0,30		
CE10	5,56	7,53	50,07	52	0,28	0,30	0,01
	5,75	7,48	49,25	52,15	0,30		
	5,92	7,43	50,01	51,79	0,31		
CE20	5,97	8,46	49,17	54,67	0,26	0,25	0,01
	5,53	8,78	48,7	53,02	0,24		
	5,77	8,43	49,31	53,74	0,26		
CE30	5,60	7,17	50,17	55,91	0,28	0,29	0,01
	5,99	7,13	56,44	50,17	0,30		
	5,78	7,04	50,91	56,22	0,29		

Tabela A2- 4: Determinação de solubilidade em água

Amostra	m _{inicial}	m _{final}	%S	$\bar{\%S}$	Desvio Padrão
BC	1,20	0,95	20,73	19,32	1,26
	1,10	0,89	18,91		
	1,28	1,05	18,32		
PM10	1,24	1,02	17,97	18,46	0,80
	1,03	0,85	18,03		
	1,21	0,98	19,39		
PM20	1,04	0,71	31,86	32,31	0,43
	0,88	0,60	32,36		
	1,14	0,77	32,72		
PM30	1,36	0,93	31,82	35,76	5,15
	1,22	0,81	33,86		
	1,19	0,69	41,59		
CE10	0,87	0,57	34,86	35,61	7,67
	0,69	0,39	43,62		
	0,62	0,45	28,34		
CE20	0,91	0,52	42,11	41,15	1,11
	0,76	0,45	41,40		
	0,83	0,50	39,93		
CE30	0,95	0,30	68,83	59,28	11,35
	0,98	0,37	62,30		
	1,20	0,95	20,73		

Figura A2- 1: Gráficos para determinação do Módulo de Young



EPS-Poliestireno Expandido; Material controle (BC) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar);
 Reforço (PM10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar + Palha de Milho);
 Reforço (CE10,20 e 30%) - (amido/água/glicerol e farelo de cana-de-açúcar +Capim Elefante).

Tabela A2- 5: Resultados do teste de corrosão

amostra	m _{inicial}			m _{final}			%m _{perdida}												
	pH4	pH7	pH9	pH4	pH7	pH9	pH4	pH7	pH9	pH4	pH7	pH9	pH4	pH7	pH9	pH4	pH7	pH9	Desv.P.
BC	1,54	1,69	1,79	1,05	1,14	1,2	31,69												
	1,45	1,54	1,68	1,09	1,01	1,09	24,31	28,04	3,69	32,6	34,57	33,59	0,98	33,169	35,235	34,59	1,23		
	1,25	1,47	1,69	0,9	0,97	1,09	28,11			33,6									
PM10	1,81	1,89	1,87	1,04	1,04	1	42,71												
	1,68	1,56	1,33	1	0,89	0,8	40,56	43,75	3,82	45,16	42,87	41,68	4,21	46,77	40,405	43,79	3,2		
	1,33	1,9	1,39	0,69	1,2	0,78	47,99			37									
PM20	2,33	1,78	1,07	1,71	1,32	0,79	26,49												
	2,01	2,23	1,99	1,39	1,53	1,41	31,05	29,2	2,4	26,23	31,06	31,71	5,83	29,165	27,691	27,79	1,33		
	1,88	1,78	2	1,31	1,11	1,44	30,06			37,83									
PM30	2,12	2,13	2,04	1,22	1,15	1,09	42,63												
	1,89	1,56	1,79	1	0,75	0,78	47,16	42,41	4,85	46,01	51,61	52,37	6,77	46,487	56,59	51,67	5,06		
	2,33	1,89	1,78	1,46	0,77	0,85	37,46			59,48									
CE10	2,08	1,61	2,09	0,99	1,03	0,85	52,35												
	2,53	2,33	1,56	1,28	1,46	0,66	49,54	50,65	1,5	35,72	37,62	36,55	0,97	59,293	57,288	56,9	2,6		
	2	1,55	1,96	1	0,99	0,9	50,05			36,31									
CE20	2,25	2,25	1,18	0,89	0,84	0,76	60,48												
	1,99	1,78	1,98	0,69	0,6	1,11	65,14	60,31	4,92	62,53	66,41	64,87	2,06	35,748	43,853	40,56	4,26		
	1,25	1,46	1,55	0,56	0,5	0,9	55,3			65,69									
CE30	1,83	2,11	1,85	0,42	0,59	0,59	77,32												
	2,45	2,22	1,78	0,66	0,69	0,65	73,26	73,09	4,33	72,01	69,16	67,5	5,53	67,903	63,341	65,11	2,45		
	2,55	2,01	2,22	0,8	0,78	0,8	68,67			61,33									