

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CLARISSE CRISTINA BUARQUE BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA IRRADIAÇÃO DE MICRO-ONDAS SOBRE
BIOPOLÍMERO DE AMIDO EXTRAÍDO DA BATATA INGLESA**

Recife
2024

CLARISSE CRISTINA BUARQUE BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA IRRADIAÇÃO DE MICRO-ONDAS SOBRE
BIOPOLÍMERO DE AMIDO EXTRAÍDO DA BATATA INGLESA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Química Industrial da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial à obtenção
do grau de Bacharel em Química Industrial.

Orientador: Prof. Dra. Ana Paula Lima Pacheco

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Barbosa, Clarisse Cristina Buarque.

Avaliação da influência da irradiação de micro-ondas sobre biopolímero de amido extraído da batata inglesa / Clarisse Cristina Buarque Barbosa. - Recife, 2024.

58p. : il., tab.

Orientador(a): Ana Paula Lima Pacheco

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Química Industrial - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Amido de batata. 2. Biopolímero. 3. Glicerol. 4. Tratamento com micro-ondas. I. Pacheco, Ana Paula Lima. (Orientação). II. Título.

540 CDD (22.ed.)

CLARISSE CRISTINA BUARQUE BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA IRRADIAÇÃO DE MICRO-ONDAS SOBRE
BIOPOLÍMERO DE AMIDO EXTRAÍDO DA BATATA INGLESA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Química Industrial da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial à obtenção
do grau de Bacharel em Química Industrial.

Aprovado em: 07/10/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ANA PAULA LIMA PACHECO
Data: 25/10/2024 11:11:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Ana Paula Lima Pacheco (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^º. Dr^º. Felipe Pedro da Costa Gomes (1^º Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^ª. Dr^ª. Magda Rosângela Santos Vieira (2^a Examinadora)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me conferido discernimento, forças e saúde durante todo o processo de elaboração deste projeto, me mantendo mentalmente focada e estabilizada.

Ao meu pai, agradeço por todo esforço, dedicação, pelas longas viagens a Recife e suporte financeiro que foram me oferecidos ao longo dos 5 anos de graduação. Seu apoio foi fundamental para minha educação e persistência diante dos obstáculos enfrentados.

À minha mãe, agradeço por ter sido a peça principal na minha vida, por ter me educado e sido a melhor conselheira e apoiadora que eu poderia ter. Sua crença em mim e nos meus sonhos sempre foram o meu combustível e espero que, onde estiver agora, esteja orgulhosa. Ao longo dos últimos 3 anos da minha graduação, sempre senti sua presença. Finalmente, agora posso cumprir minha promessa de que seria forte e não desistiria do curso devido sua ausência.

Agradeço a toda minha família que participou da minha caminhada e me ajudou de algum modo a enfrentar os desafios de morar longe de casa, seja com alimentação, transporte ou lições.

Aos amigos que fiz durante a graduação, agradeço por permanecerem comigo em todos os infortúnios e dificuldades e por sempre me manterem motivada.

À minha orientadora, professora Ana Paula Pacheco, agradeço a confiança e parceria ao longo de todo o período de produção desta pesquisa; por ter me oferecido sua disponibilidade, seu tempo e sua boa vontade em me auxiliar, até mesmo à distância. Sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste projeto, compartilhando seu conhecimento e experiência. Espero ter correspondido às expectativas.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco, sobretudo ao Departamento de Engenharia Química, por oferecer subsídios para a realização deste estudo e por terem me proporcionado uma graduação repleta de ensinamentos necessários para minha vida profissional e pessoal.

Agradeço à Central Analítica do Departamento de Química Fundamental e ao Instituto Nacional de União e Revestimento em Materiais pelas análises fornecidas para esta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que colaboraram, de forma direta ou indireta, para a conclusão do presente trabalho.

RESUMO

A produção e o descarte desenfreado de itens plásticos são responsáveis por uma poluição prejudicial ao meio ambiente, como consequência da sua longevidade e baixa degradabilidade. Neste contexto, os biopolímeros surgem como uma alternativa sustentável para a substituição de polímeros sintéticos convencionais a fim de amenizar a quantidade de resíduos gerados e enfraquecer os danos causados, atenuando a utilização de matérias-primas derivadas do petróleo que, além de poluentes, podem se tornar escassas. Além da biodegradabilidade, os biopolímeros apresentam propriedades vantajosas, como não toxicidade, renovabilidade e alta estabilidade térmica. O amido é um material biodegradável e biocompatível com perspectivas favoráveis em relação aos outros polímeros naturais em decorrência de sua origem vegetal, capacidade de formação de filme e baixo custo. O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um biopolímero à base de amido de batata inglesa, utilizando glicerol como plastificante, tratá-lo com irradiação de micro-ondas, e estudar os efeitos sobre as propriedades estruturais do composto polimérico obtido e a degradação do material. A caracterização polimérica foi feita através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). O aquecimento do biopolímero de amido pela ação da irradiação de micro-ondas se mostrou um método físico altamente promissor para modificar o amido em virtude de suas vantagens, como operação homogênea por toda amostra, menor tempo de processamento, maior profundidade de penetração e por oferecer uma melhor qualidade no produto elaborado. Visualmente, foram observadas mudanças no aspecto físico e o melhoramento das propriedades mecânicas do material. O filme, apesar de não ter apresentado bons resultados para a avaliação de fornecimento de nutrientes ao solo, demonstrou ter boa degradabilidade física e biológica. O percentual de perda de massa pela degradação física causada pelo contato com a água foi menor no biopolímero irradiado, atestando sua maior resistência. Morfologicamente, os resultados obtidos constataram a alteração da estrutura do biopolímero pela irradiação ao modificar a estrutura granular do amido, a partir da sua destruição. Tanto as micrografias quanto os espectros evidenciaram tal modificação, apontando um estado mais amorfo nas amostras irradiadas em comparativo com as amostras de controle. Portanto, o estudo demonstrou ser eficaz em comprovar as alterações promovidas pelo micro-ondas às propriedades do biopolímero de amido de batata inglesa, sendo um importante aliado a gestão de resíduos sólidos, visto que a produção do material reduz a poluição plástica e o descarte inadequado de resíduos de batata durante o processamento industrial. A modificação deve ser estudada com mais profundidade em pesquisas futuras para descobrir meios de regular e manipular essa técnica para que os polímeros biodegradáveis produzidos sejam aplicáveis à indústria de forma efetiva e vantajosa.

Palavras-chave: Amido de batata, Biopolímero, Glicerol, Tratamento com micro-ondas.

ABSTRACT

The unbridled production and disposal of plastic items are responsible for harmful pollution to the environment, as a consequence of their longevity and low degradability. In this context, biopolymers emerge as a sustainable alternative for replacing conventional synthetic polymers in order to reduce the amount of waste generated and mitigate the damage caused, mitigating the use of raw materials derived from petroleum, which, in addition to being pollutants, may become scarce. In addition to biodegradability, biopolymers have advantageous properties, such as non-toxicity, renewability and high thermal stability. Starch is a biodegradable and biocompatible material with favorable prospects in relation to other natural polymers due to its plant origin, film-forming capacity and low cost. The objective of this work was to develop a biopolymer based on potato starch, using glycerol as a plasticizer, treat it with microwave irradiation, and study the effects on the structural properties of the polymeric compound obtained and the effects of irradiation on the strength and degradation of the material. The polymer characterization was performed using Scanning Electron Microscopy and Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Heating the starch biopolymer by microwave irradiation proved to be a highly promising physical method for modifying starch due to its advantages, such as homogeneous operation throughout the sample, shorter processing time, greater penetration depth and for offering better quality in the manufactured product. Visually, changes in the physical aspect and improvement in the mechanical properties of the material were observed. Although the film did not present good results for the evaluation of nutrient supply to the soil, it demonstrated good physical and biological degradability. The percentage of mass loss due to physical degradation caused by contact with water was lower in the irradiated biopolymer, attesting to its greater resistance. Morphologically, the results obtained confirmed the alteration of the biopolymer structure by irradiation by modifying the granular structure of the starch, starting from its destruction. Both the micrographs and the spectra evidenced this modification, indicating a more amorphous state in the irradiated samples compared to the control samples. Therefore, the study proved to be effective in proving the changes promoted by microwaves in the properties of the English potato starch biopolymer, being an important ally in solid waste management, since the production of the material reduces plastic pollution and the inadequate disposal of potato waste during industrial processing. The modification should be studied in more depth in future research to discover ways to regulate and manipulate this technique so that the biodegradable polymers produced can be applied to the industry in an effective and advantageous way.

Keywords: Potato starch, Biopolymer, Glycerol, Microwave treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pesquisas para tipos de amido e plastificante glicerol (Fonte: Reis <i>et al.</i> , 2011)	21
Figura 2. Estrutura do amido, representando o polímero a) linear de amilose e b) ramificado de amilopectina (Fonte: Dala-Paula & Kringel, 2021)	22
Figura 3. Estrutura química do glicerol (Fonte: <i>National Center for Biotechnology Information</i> , 2024)	25
Figura 4. Diagrama esquemático das mudanças na estrutura do amido após tratamento por micro-ondas (Fonte: Adaptado de Cai <i>et al.</i> , 2024)	28
Figura 5. Fotomicrografias dos amidos de (a) batata, (b) trigo, (c) milho e (d) mandioca com ampliação de 1000 x para amidos de batata e de mandioca e de 1500 x para os amidos de trigo e de milho (Fonte: Luchese, 2018)	30
Figura 6. Espectroscopia por Infravermelho de amostras das substâncias individuais: água, amido, ácido acético, alginato e glicerol e das substâncias conjugadas: amido, ácido acético e glicerol (A+AC+G) e amido, alginato e glicerol (A+AG+G) (Fonte: Adaptado de Romeira, 2019)	31
Figura 7. Fluxograma da síntese do biopolímero de batata inglesa	32
Figura 8. A) Peneiramento das batatas inglesas trituradas; B) Destinação dos resíduos gerados no processo de produção do biopolímero	33
Figura 9. Procedimento para o tratamento do biopolímero com fluxo contínuo com água	35
Figura 10. Amido extraído da batata inglesa (A) não oxidado; (B) oxidado	37
Figura 11. Biopolímero de amido de batata inglesa A) Amostra do biopolímero sem irradiação por micro-ondas; B) Amostra do biopolímero com irradiação por micro-ondas	38
Figura 12. Biopolímero de amido de batata inglesa moldado em diferentes formas e cores	39
Figura 13. Vasos de planta de biopolímero de amido de batata inglesa: (A) e (B) não irradiados; (C) e (D) irradiados	39
Figura 14. Plantio de feijão, após 5 dias. Da esquerda para direita: vaso irradiado com micro-ondas, sem irradiação e copo descartável	40
Figura 15. Ensaio de degradação de amostras padrão sem (A) e com (B) exposição as micro-ondas, em água salgada da praia do Pina (A' e B') e doce do Canal do Arruda (A'' e B''), em Recife-PE, ao biopolímero de amido da batata inglesa	42

Figura 16. Micrografias do biopolímero de amido de batata inglesa, com resolução de 500x (A); 1000x (B e C) e 3000x (D)	43
Figura 17. Micrografias do biopolímero de amido de batata inglesa com irradiação por micro-ondas, com magnitude de 500x (A); 1000x (B e C) e 3000x (D)	45
Figura 18. Micrografias do biopolímero de amido de batata inglesa após tratamento com água: Sem irradiação (A) e irradiado com micro-ondas (B)	46
Figura 19. Comparação dos espectros de infravermelho por Transformada de Fourier do biopolímero, de amido de batata inglesa, antes e após passar pelo tratamento com micro-ondas	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Potencial de redução das emissões de CO ₂ eq decorrentes dos materiais recicláveis coletados em 2019 (Fonte: Abrelpe, 2021)	17
Tabela 2. Mecanismos de plastificação do glicerol (Fonte: Adaptado de Ben, Samsudin & Yhaya, 2022)	26
Tabela 3. Principais fragmentos identificados no FTIR	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ONU	Organização das Nações Unidas
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i> – Associação Internacional de Resíduos Sólidos
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i> – Fundo Mundial para Natureza
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
ACV	Avaliação do ciclo de vida
PLA	Poli(ácido láctico)
PBAT	Polibutileno adipato tereftalato
PHA	Poli-hidroxialcanoato
ATP	Amido termoplástico
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> – Infravermelho com Transformada de Fourier
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> – Calorimetria Exploratória Diferencial
TGA	<i>Thermogravimetric analysis</i> – Análise Termogravimétrica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
SE	<i>Secondary electron</i> – Elétrons secundários
BSE	<i>Backscattering electron</i> – Elétrons retroespalhados

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1 GESTÃO AMBIENTAL E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS	16
3.2 BIOPOLÍMEROS.....	18
3.2.1 Matérias-primas dos biopolímeros	20
3.3 AMIDO.....	21
3.4 AGENTES PLASTIFICANTES	24
3.4.1 Glicerol	25
3.5 MÉTODOS DE MODIFICAÇÃO DO AMIDO	26
3.5.1 Tratamento por micro-ondas	27
3.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO POLIMÉRICA	29
4 METODOLOGIA.....	32
4.1 EXTRAÇÃO DE AMIDO.....	32
4.2 SÍNTESE DO BIOPOLÍMERO	33
4.3 MOLDAGEM.....	34
4.4 AVALIAÇÃO DE DEGRADAÇÃO MICROBIOLÓGICA	34
4.5 TRATAMENTO COM FLUXO DE ÁGUA	34
4.6 ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO	35
4.6.1 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier	36
4.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
6 CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Os questionamentos relacionados ao manejo dos resíduos sólidos urbanos (RSU) envolvem um complexo cenário no qual estão interligadas conjunturas econômicas, sociais, políticas e ambientais (Silva *et al.*, 2020). Desde a década de 70, há uma crescente preocupação de pesquisadores acerca do montante de resíduo produzido pelo homem moderno, ocasionando problemas derivados da poluição ambiental gerada e do descarte incorreto de materiais que, em teoria, poderiam ser reutilizados (Telles, 2020). O volume de RSU originado e destinado a locais inadequados afeta diretamente a saúde dos seres humanos e o meio ambiente, necessitando da atenção de políticas públicas.

É evidente que em países da Europa, como Alemanha, França e Reino Unido, há uma adesão a tecnologias e políticas específicas que visam elevar os índices de reaproveitamento de resíduos, evitando o direcionamento a aterros sanitários (Aguilar *et al.*, 2021). Como tentativa para administrar efetivamente a produção e o manejo dos resíduos gerados, o Governo Federal instituiu a Lei 12.305 (Brasil, 2010), de 2 de agosto de 2010, que vigora a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). É reunido o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações empregadas para uma boa gestão e gerenciamento ambientalmente adequado. Deste modo, prioriza-se a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos (Brasil, 2010).

No Brasil, a quantidade de resíduos orgânicos que são enterrados, queimados e lançados a céu aberto ainda chega a milhões de toneladas, sendo resultado da insipiência popular em relação ao potencial de reaproveitamento e dos impactos negativos que atingem o meio ambiente (Zago; Barros, 2019). O Panorama Global do Manejo de Resíduos em 2024 (UNEP, 2024), levantado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em conjunto com a *International Solid Waste Association* (ISWA), aponta uma tendência de crescimento na geração de resíduos sólidos em municípios, de 2,3 bilhões de toneladas em 2023 para 3,8 bilhões de toneladas em 2050.

Apesar de se passarem mais de 10 anos de implementação da referida legislação, análises críticas como a realizada por Picanço (2020) apontam que a PNRS ainda não alcançou sua efetividade, considerando que municípios justificam a falha por ausência de recursos e incentivos do poder público. No entanto, pode-se observar um direcionamento à valoração de materiais reciclados, como pneus, óleos lubrificantes usados e embalagens. Este fato fortalece um sistema de economia circular, que se baseia na mudança na forma de consumir, de explorar

matérias-primas e resíduos, e no conflito entre o desenvolvimento sustentável e o crescimento econômico (Cosenza; Andrade; Assunção, 2020). Sendo assim, o modelo pode ser um agente atenuante ao impacto ambiental oriundo do consumo e da tecnologia do mundo moderno.

Estima-se que, em 2022, a quantidade de resíduos plásticos gerados no país chegou a 64 kg por pessoa, segundo um levantamento da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Dentre os materiais poluentes que são encontrados nos corpos hídricos, os plásticos correspondem a 48,5%, configurando a maioria (Abrelpe, 2022). Embora seja uma matéria-prima versátil e ilimitada, seu uso no futuro vem sendo questionado, visto que fatores como vida útil curta de embalagens e obsolescência agravam a situação. No Brasil, políticas públicas voltadas para a gestão e reciclagem deste resíduo ainda são insuficientes, mesmo que se trate do quarto maior produtor mundial (Conceição *et al.*, 2019).

De acordo com um relatório executado para o Fundo Mundial para a Natureza (WWF), o custo total do plástico – não apenas para o meio ambiente, como também para a saúde e para a economia mundial – chega a ser até dez vezes superior para um país de baixa renda, mesmo estes consumindo três vezes menos plástico per capita comparados aos países de alta renda. Para Alice Ruhweza, diretora sênior de Política, Influência e Engajamento do WWF Internacional, “em vez de resolver a crise mundial de poluição plástica da forma mais eficiente, o sistema transfere a maior parte dos custos para aqueles que estão menos equipados para gerenciá-los, sem qualquer responsabilidade colocada sobre aqueles que produzem e utilizam os produtos” (Silva; Miyashiro, 2023).

Embora sejam componentes indispensáveis para uma extensa parcela de bens de consumo, os plásticos contribuem significativamente para a contaminação dos oceanos (Ghasemlou; Barrow; Adhikari, 2024). Diante deste cenário, alternativas para a substituição desse resíduo polimérico devem ser analisadas e desenvolvidas. O desenvolvimento de plásticos sintéticos, além de apresentarem risco ambiental, e consequentemente aos seres humanos, também pode ser inviabilizado futuramente, em virtude de uma possível escassez das fontes petroquímicas. Assim, a adoção de biopolímeros é tido como um caminho sustentável e econômico para a substituição, por possuírem características semelhantes aos plásticos tradicionais e reduzirem as emissões de gases de efeito estufa (Ali *et al.*, 2024).

Em teoria, os bioplásticos são eliminados do ambiente através da degradação causada por microrganismos – todavia, ainda representam uma pequena parte do mercado mundial de plásticos (Ghasemlou; Barrow; Adhikari, 2024). A comercialização, no entanto, é dificultosa devido às propriedades mecânicas e de barreira desses polímeros naturais. Tais propriedades podem ser melhoradas a partir da adição de alguns enchimentos a sua composição, sejam eles

quimicamente sintéticos ou naturais, oferecendo as funções de proteção requeridas para aplicação em embalagens, por exemplo (Siddiqui *et al.*, 2024).

Também há obstáculos na manufatura à nível industrial devido ao baixo rendimento e elevados custos. O direcionamento sustentável da produção dos biofilmes está na utilização de fontes renováveis e de baixo custo, como resíduos orgânicos, agroindustriais e microalgas, o que pode auxiliar de forma eficaz na gestão de resíduos sólidos (Ali *et al.*, 2024). Um exemplo disso são os resíduos de batata inglesa (*Solanum tuberosum*), cuja indústria alimentícia produz e desperdiça um grande volume de cascas, agregando-lhes nenhum valor econômico e desconsiderando seu potencial de aproveitamento para confecção de filmes biodegradáveis (Borah; Das; Badwaik, 2017).

O amido, polissacarídeo presente nas batatas, é um material de grande interesse em razão de sua capacidade termoplástica, ter boa disponibilidade em diversas plantas, ser acessível e renovável, além de possuir propriedades de barreira a gases. Contudo, é uma matéria-prima limitada ao apresentar propriedade hidrofílica e fragilidade. Por isso, é comum que seja submetido à mistura com polímeros sintéticos ou incorporação a agentes plastificantes orgânicos, como lignina e celulose (Lopes *et al.*, 2021).

Existem outras maneiras de tornar os materiais poliméricos amiláceos ajustáveis às necessidades de aplicações desejadas. A irradiação por micro-ondas é uma forma proveitosa de manipular a estrutura do amido, sendo uma área de foco de pesquisas em ascensão nos últimos anos (Zhao *et al.*, 2024). As micro-ondas podem induzir, de modo direto ou indireto, modificações morfológicas e no arranjo interno dos grânulos de amido, referente às propriedades dielétricas do sistema à energia de entrada das micro-ondas (Tao *et al.*, 2020). Tal tratamento também é atrativo pelas altas taxas de aquecimento e menor perda de qualidade nutricional quando comparado com outros estudos (Zhao *et al.*, 2024).

A finalidade deste trabalho é desenvolver um biopolímero à base de amido utilizando glicerol como plastificante e tratá-lo com irradiação não ionizante advinda de um aparelho de micro-ondas convencional. Por conseguinte, busca-se caracterizar as propriedades estruturais do composto polimérico obtido, avaliando os efeitos da irradiação à resistência degradativa do material e aos seus aspectos físicos, permitindo que sua moldagem e aplicação sirvam como possibilidade para melhorar o gerenciamento de resíduos. A pesquisa foi promovida no Laboratório de Sistemas Poliméricos (LASP) no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco (DEQ-UFPE) em parceria com outros laboratórios da própria instituição.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Sintetizar um biopolímero utilizando amido de batata inglesa, água, glicerina e ácido acético como matérias-primas e irradiá-lo com micro-ondas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o material obtido em relação ao biopolímero sem tratamento com micro-ondas;
- Avaliar degradabilidade do material em água doce e salgada, a fim de estimar o comportamento em corpos hídricos na natureza;
- Avaliar a influência da irradiação do micro-ondas à degradação e aos aspectos físicos do material, principalmente se houveram alterações;
- Estudar o fornecimento de nutrientes do biopolímero ao solo, a partir do cultivo em vasos moldados com o material.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 GESTÃO AMBIENTAL E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS

A sociedade enfrenta desafios ambientais cada vez maiores em decorrência da elevação dos padrões de vida e do crescimento populacional, o que originou regiões com alta densidade demográfica. Consequentemente, há uma maior geração de resíduos sólidos (Chien *et al.*, 2023). O consumo exagerado e a urbanização são fatores agravantes para a produção de resíduos, que na maioria das vezes não são descartados corretamente, geralmente sendo destinados a lixões, promovendo uma degradação ambiental (Silva *et al.*, 2020). A preocupação com o meio ambiente tem sido um ponto marcante no cenário mundial, motivando discussões e a proposição de metas em vários países para minimizar os impactos causados, como a redução do lançamento de poluentes (Oliveira *et al.*, 2021).

À exemplo disso, tem-se a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015), um plano de ação que reúne objetivos e metas para os países participantes da ONU a fim de proteger o planeta da degradação por meio do consumo e produção sustentável, do gerenciamento dos recursos naturais e de medidas a respeito das mudanças climáticas. São propostos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas voltados para as pessoas, o planeta e a prosperidade. Esta Agenda reconhece que seus objetivos, como a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões, pode ser considerado como o maior desafio global e um requisito indispensável para o desenvolvimento sustentável.

Especificamente no Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) prioriza a geração mínima de resíduos, institui como objetivos a redução, reutilização e reciclagem de resíduos e, ainda, a destinação ambientalmente adequada de rejeitos. Também equipara o Brasil no mesmo patamar que os principais países desenvolvidos no que respeita ao marco legal e traz inovação ao incluir catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis, tanto na Logística Reversa quanto na Coleta Seletiva. Apesar do progresso atingido pela PNRS, a reciclagem continua sendo um desafio e ainda é evidente a necessidade de melhorias na gestão de resíduos sólidos no país (Bruhn *et al.*, 2023).

Os plásticos constituem uma grande parte não degradável dos RSU e seu descarte e reciclagem são algumas das principais adversidades no gerenciamento de resíduos, em decorrência do grande acúmulo residual pelo seu uso substancial. Em geral, a maioria destes resíduos são lançados em aterros sanitários, solo, oceanos e corpos d'água, o que oferece um

risco eminente para fauna, flora e seres humanos (Nanda *et al.*, 2022). Neste sentido, a atual transição para a sustentabilidade e a economia circular pode ser interpretada como uma resposta sociotécnica aos impactos ambientais e à necessidade de melhorar o desempenho geral do paradigma de produção e consumo linear (Ali *et al.*, 2023).

Conforme dados fornecidos pela Abrelpe (2021), em 2019, 354 mil toneladas de materiais recicláveis secos que foram coletados permitiram a redução de 174 mil toneladas de CO₂ equivalentes em relação aos materiais virgens que deixaram de ser retirados do meio ambiente para a geração de novos produtos. Dentro dessa fração, os materiais plásticos (Polietileno de Alta Densidade – PEAD; Polietileno de Baixa Densidade – PEBD; Polietileno Tereftalato – PET; Polipropileno – PP; Poliestireno – PS) recuperados por meio de coleta seletiva representam 50,4% do potencial de redução de emissão de CO₂ equivalentes (Tabela 1), evidenciando a importância da logística reversa, da reciclagem e do descarte ambientalmente adequado desses materiais.

Tabela 1. Potencial de redução das emissões de CO₂eq decorrentes dos materiais recicláveis coletados em 2019.

Material	Volume coletado		Emissões	
	Toneladas	%	tCO ₂ eq	%
PEAD	15.455	3,9	16.710	9,6
PEBD	23.613	5,9	33.253	19,1
PET	23.452	5,9	29.049	16,7
PP + PS	11.831	2,9	8.761	5,0
Plástico	74.341	18,6	87.773	50,4
Alumínio	3.217	0,8	27.022	15,5
Aço	27.914	7,0	35.451	20,3
Metal	31.131	7,8	62.473	35,8
Papel	190.822	47,6	22.827	13,1
Vidro	104.204	26,0	1.235	0,7
Total	400.498	100%	174.308	100%

Fonte: Abrelpe (2021).

É notória a crescente popularidade do conceito de refinarias de biorresíduos para produzir bioprodutos e biocombustíveis, constituindo um sistema eficaz de gerenciamento de resíduos biológicos ambientais (Ali *et al.*, 2023). Esta alternativa é de extrema valia quando se trata de reduzir a produção de plásticos, visto que a produção em escala mundial chegou a 368

milhões de toneladas em 2019 (Nanda *et al.*, 2022). No entanto, algumas substituições produtivas devem ser analisadas por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV), que é uma ferramenta que estuda o desempenho ambiental e econômico de um produto ou processo, comparando tipos de impactos ambientais (Ali *et al.*, 2023).

Neste contexto, para continuarem alinhadas com o 12º ODS – padrões de consumo e produção sustentáveis, as empresas buscam alternativas para o desenvolvimento de produtos de forma ecologicamente viável. Por exemplo, a indústria de embalagens tenta reduzir o consumo de materiais de origem não renovável como o petróleo, substituindo sua matéria-prima por materiais de origem biológica (Ben; Samsudin; Yhaya, 2022). Tal iniciativa é importante pois a indústria de embalagens é uma das maiores contribuidoras para o desperdício de plástico e o fim da vida útil deste material tem um efeito prejudicial ao meio ambiente, como a formação de poluição de microplásticos e o aumento de emissões de gases de efeito estufa (Westlake *et al.*, 2022).

3.2 BIOPOLÍMEROS

O descarte de materiais poliméricos, tanto pelo setor industrial quanto pela população, pode ser processado por reciclagem mecânica, em que o material é fundido para produzir um novo produto, igual ao de origem ou não. Deste modo, tende-se a diminuir o montante de resíduos gerados, possibilitando sua recuperação (Araújo *et al.*, 2021). Esta prática se torna cada vez mais imprescindível, pois a produção e o descarte desenfreado de itens plásticos são responsáveis por uma vasta e persistente poluição, como consequência da sua longevidade e baixa degradabilidade (Ghasemlou; Barrow; Adhikari, 2024). À medida que os países avançam no desenvolvimento econômico, a poluição plástica se faz crescente, contaminando ecossistemas marinhos e criando uma crise ambiental.

O processo de reciclagem desses materiais requer classificação, lavagem, moagem, mistura e extrusão completas, levando à uma degradação prévia, além de que o índice de aceitação ainda é inferior aos polímeros virgens. Neste sentido, a substituição de polímeros sintéticos convencionais por bioplásticos vem sendo um caminho alternativo, atingindo uma maior conscientização ambiental por parte dos consumidores (Siddiqui *et al.*, 2024). Os biopolímeros são um subconjunto de bioplásticos empregados na confecção de produtos plásticos, como recipientes, copos e embalagens. São encontrados nos seres vivos, como proteínas, carboidratos e ácidos nucleicos encontrados em plantas, animais e micróbios, ou podem ser sintetizados (Ali *et al.*, 2024).

O mercado de materiais à base de bioplásticos vêm crescendo nos últimos anos (Darie-Niță; Râpă, 2021). Estima-se que produção total de bioplásticos em 2021 foi de aproximadamente 2,36 milhões de toneladas, sendo cerca de 1,55 milhões de toneladas de materiais degradáveis e 0,86 milhões de toneladas de materiais não degradáveis (Ali *et al.*, 2023). Os bioplásticos comerciais mais expressivos que tem disponibilidade no mercado são os poliésteres, como o poli(ácido láctico) (PLA), o polibutileno adipato tereftalato (PBAT) e o poli-hidroxialcanoato (PHA), acompanhados pelos biopolímeros à base de amido (Darie-Niță; Râpă, 2021).

Pode-se afirmar que nem todos os bioplásticos são biodegradáveis; no entanto, são provindos de recursos renováveis e podem ter suas propriedades modificadas pela adição de aditivos adequados para ter boas características mecânicas e térmicas, bem como fácil processamento em escala industrial (Darie-Niță; Râpă, 2021). Tanto podem ser gerados a partir de fontes primárias de matéria-prima, como arroz, soja, beterraba, cana-de-açúcar, como também de matérias-primas secundárias, incluindo resíduos biológicos e resíduos de óleo de cozinha (Ali *et al.*, 2023). Os bioplásticos, normalmente, demoram de 3 a 6 meses para a sua completa biodegradação, enquanto a maioria dos plásticos de base petroquímica levam vários séculos para se desintegrar (Nanda *et al.*, 2022).

Entre as principais vantagens dos bioplásticos é a capacidade de degradação biológica, significando uma redução do impacto ambiental proveniente dos resíduos plásticos convencionais. Isto porque, com o tempo, se transformam em substâncias naturais (Ali *et al.*, 2024). A biodegradação é um processo no qual os compostos orgânicos sofrem ação enzimática de microrganismos, como fungos e bactérias, que os convertem em compostos mais simples, redistribuindo em ciclos elementares como o do carbono, nitrogênio e enxofre. Além de ser uma alternativa proveitosa por ser menos destrutiva ao meio ambiente, a degradação do biopolímero, quando submetido à compostagem, pode ser benéfica ao solo por fornecer um material rico em carbono (Araújo *et al.*, 2021).

Além da biodegradabilidade, os biopolímeros apresentam propriedades vantajosas, como não toxicidade, renovabilidade, alta estabilidade térmica, química e estrutural, porosidade controlável, alta diversidade química e biocompatibilidade. A abundante disponibilidade de sítios ativos possibilita sua modificação por funcionalização, expandindo a viabilidade para aplicações ambientais, farmacêuticas, alimentícias, agrícolas, cosméticas, entre outras (Román-Hidalgo *et al.*, 2023). Apesar de tantos aspectos positivos, os bioplásticos representam apenas uma fração de aproximadamente 1% de todo o mercado de plásticos. Por serem derivados de materiais renováveis à base de plantas, como o amido, são mais custosos em relação aos

plásticos derivados de petróleo, o que é visto como obstáculo para um mercado movido por commodities de baixa tecnologia e grandes volumes de produção (Govil; Salem; Sani, 2021).

3.2.1 Matérias-primas dos biopolímeros

Proteínas e polissacarídeos são alvo de estudos e explorados para o desenvolvimento de bioplásticos por conta de sua capacidade de formar filmes afilados e por apresentar propriedades ópticas, mecânicas, de barreira de O₂ e umidade favoráveis (Siddiqui *et al.*, 2024). É comum a produção de biofilmes a partir de resíduos orgânicos, como casca de abacaxi, laranja, banana, limão, fibras de óleo de palma, entre outros materiais baratos e acessíveis. Estes resíduos, comumente descartados pela indústria agrícola, possuem alto teor de pectina, amido e celulose, sendo adequados como matéria-prima para biopolímeros (Ali *et al.*, 2024).

A batata (*Solanum tuberosum*), da família das solanáceas, é considerada a terceira principal fonte de alimento no mundo, atrás apenas do arroz e do trigo (Luchese, 2018). Como consequência, o processamento industrial deste tubérculo é amplo, sendo destinado à produção de batatas fritas, chips, purê, além de suas cascas, que estão inseridas nos ingredientes de salgadinhos (Jeddou *et al.*, 2016). Entretanto, diante de tamanho destaque industrial, há também a geração de grandes quantidades de casca como subproduto, que no geral, é tratado como resíduo e descartado (Pathak *et al.*, 2017). Isso traz uma preocupação ambiental ao que tange a sistemática de gestão de resíduos, evidenciando a necessidade de buscar uma solução integrada e ecológica (Jeddou *et al.*, 2016).

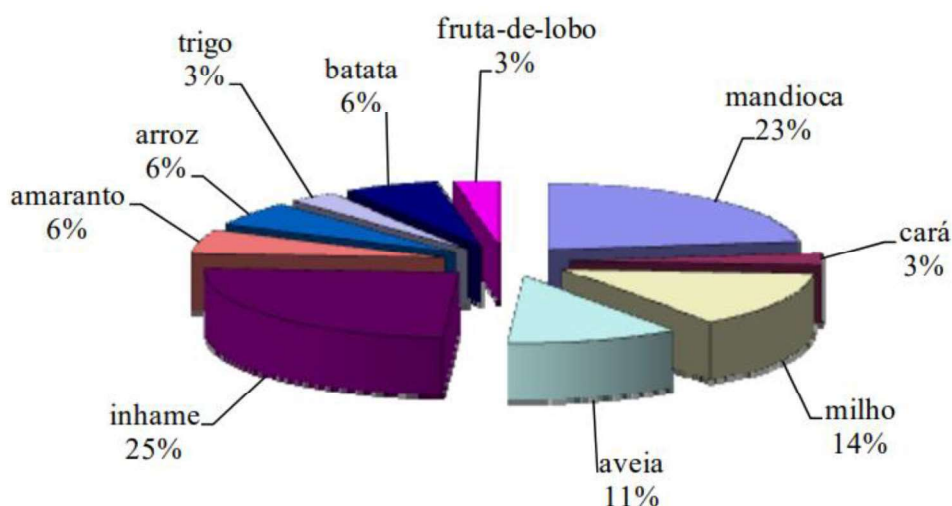
Alguns estudos defendem que a batata é uma valorosa fonte de compostos bioativos, que podem ser convertidos em produtos de valor agregado ou ainda, destinados à produção de energia, inibição de corrosão e desenvolvimento de filmes de biopolímeros (Pathak *et al.*, 2017). A batata tem como característica suas boas propriedades nutricionais e seu principal componente é o amido, que representa 12 a 20% do seu peso total. A utilização da batata como fonte de amido colabora para a evolução tecnológica da planta e diversifica suas aplicações, como o emprego na produção de biopolímeros. No entanto, seu uso industrial é limitado e está sujeito às alterações físicas, químicas e enzimáticas (Karrow *et al.*, 2024).

Na maioria das vezes, os plásticos obtidos – tanto convencionais quanto os biodegradáveis – não são polímeros puros, podendo serem constituídos em até 70% em peso por aditivos, que são inseridos propositalmente na matriz polimérica durante o seu processamento de modo a aprimorar as propriedades funcionais, a performance e/ou a aparência física do produto (Megill *et al.*, 2024). Tais aditivos são conjugados em diversas classes

químicas, como antioxidantes, retardadores de chama, estabilizadores de luz e plastificantes. Podem ser aplicados como agentes de reforço alguns materiais lignocelulósicos ou celulósicos provenientes de resíduos agrícolas, como fibras de algodão, casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e palha de trigo (Siddiqui *et al.*, 2024).

Em um mapeamento realizado por Reis *et al.* (2011), foi possível observar que na produção científica, o amido de inhame (25%) e de mandioca (23%) são os mais utilizados para confecção de biopolímeros plastificados com glicerol (Figura 1), enquanto a batata ainda representava um percentual de apenas 6%.

Figura 1. Pesquisas para tipos de amido e plastificante glicerol.



Fonte: Reis *et al.* (2011).

Quando se trata do bioplástico derivado de amido residual de batata, Romeira (2019) destaca seu desenvolvimento como um campo promissor em virtude do crescimento de patentes e das produções científicas nos últimos anos. No entanto, há uma evidente influência dos custos dos componentes secundários utilizados em conjunto com o amido para a viabilidade econômica do produto. A autora ainda enfatiza que uma formulação contendo amido residual de batata, glicerol e ácido acético é mais acessível frente a outras composições de bioplástico com características semelhantes.

3.3 AMIDO

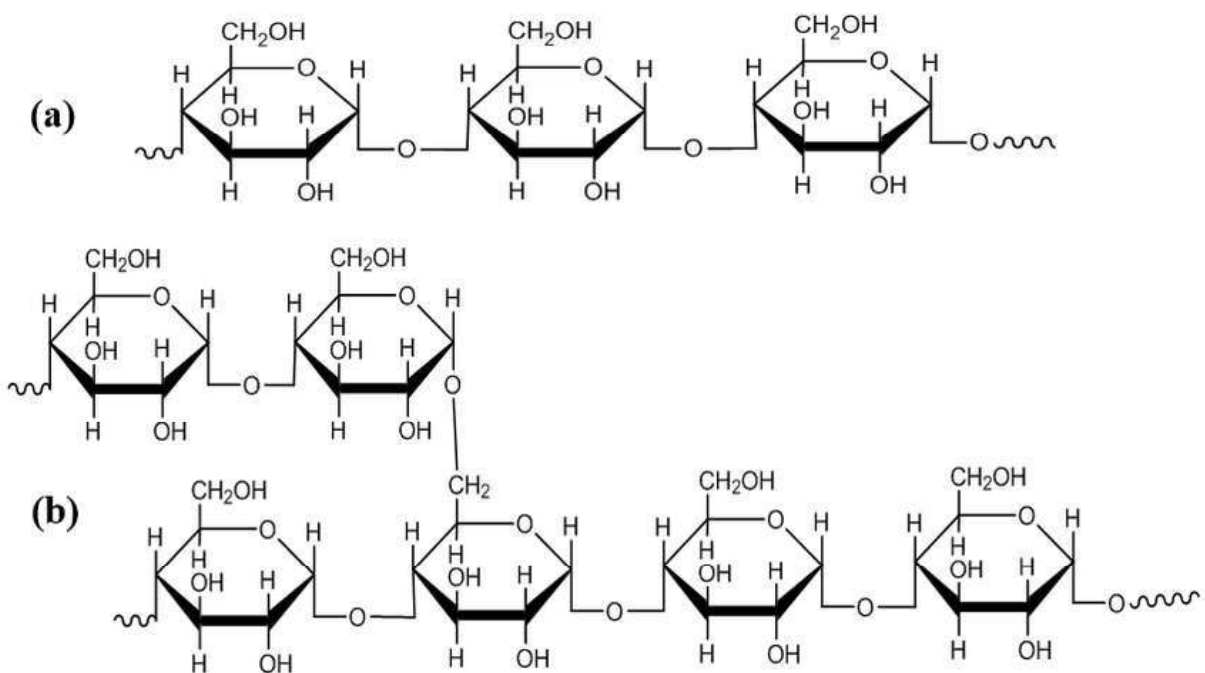
O amido é um material biodegradável e biocompatível com perspectivas favoráveis em relação aos outros polímeros naturais em decorrência de sua origem vegetal, renovabilidade,

capacidade de formação de filme, não haver toxicidade, ter baixo custo, além de ser rentável para o setor agrícola (Jha, 2020). Segundo biopolímero mais abundante do mundo, o amido é obtido a partir de diversas fontes vegetais, como cereais, raízes, tubérculos, frutas e legumes (Luchese, 2018).

Estudos sobre amido têm despertado interesse, visto que a criação de polímeros à base de amido pode diminuir os efeitos ambientais causados pelo setor petroquímico na produção de plásticos. O desenvolvimento desses biopolímeros é vantajoso por ser razoavelmente barato e necessitar do fornecimento de matérias-primas renováveis (Imoisili; Jen, 2023). Entretanto, os filmes de amido possuem limitações, como caráter hidrofílico, que o torna sensível à umidade, e fragilidade em suas propriedades mecânicas (Jha, 2020).

O amido é formado por dois polímeros de anidroglicose, a amilose e a amilopectina (Figura 2). Essas moléculas estão ordenadas em uma estrutura granular semicristalina, com partículas que variam de 1 a 100 μm de diâmetro (Souza *et al.*, 2023). A amilose consiste em um polímero linear que é composto por unidades de D-glicose ligadas por ligações α -(1 $\rightarrow$ 4), com grau de polimerização variando de 200 a 3000, a depender da fonte a qual o amido é proveniente. Já a amilopectina é um polímero altamente ramificado, com unidades de D-glicose ligadas por meio de ligações α -(1 $\rightarrow$ 4) e ramificações em α -(1 $\rightarrow$ 6) (Romeira, 2019).

Figura 2. Estrutura do amido, representando o polímero (a) linear de amilose e (b) ramificado de amilopectina.



Fonte: Amaya (2019).

A ocorrência de ramificações na estrutura faz com que a amilopectina apresente um caráter menos solúvel em água do que a amilose. O amido se torna funcional a depender do modo pelo qual estas duas frações estão organizadas dentro da estrutura do grânulo. Os amidos podem ser especificados como amidos cerosos (teor de amilose em torno de 1%), amidos normais (teor de amilose entre 17 e 24%) e amidos com alto teor de amilose (teor de amilose em torno de 70% ou mais), que são destinados à venda comercial (Dala-Paula; Kringel, 2021). Os grânulos de amido exibem o fenômeno óptico de birrefringência devido sua estrutura semicristalina, na qual as regiões cristalinas dos grânulos são formadas a partir da fração linear das moléculas de amilopectina que, constituída por estruturas helicoidais duplas, são estabilizadas por ligações de hidrogênio. Já a região amorfa é composta pelas cadeias de amilose e pelas ramificações de amilopectina (Romeira, 2019).

Quando o amido é processado em altas temperaturas e passa por tensões de cisalhamento, é chamado de amido termoplástico (ATP). As propriedades físicas e de barreira do ATP são responsáveis pela diferença da proporção de amilose para amilopectina e no teor de água de vários amidos nativos (Nascimento, 2021). Um material termoplástico é formado quando há uma destruição organizacional dos grânulos de amido, que pode ocorrer por meio de dois processos distintos: a fusão e a gelatinização. A fusão ocorre quando o amido é aquecido com um singelo teor aquoso, carecendo de temperaturas maiores para sua efetividade (Jacobs *et al.*, 2020).

No processo de gelatinização do amido, a água penetra na região amorfa, resultando no inchamento do grânulo e na desorganização da molécula. A responsável pelo inchamento é a amilopectina, que absorve água demasiadamente, enquanto a amilose favorece o acréscimo da viscosidade da fase contínua da dispersão amido-água durante a cocção do amido em meio aquoso. O gel amiláceo pode ter a aparência opaca ou de uma pasta viscoelástica (Luchese, 2018). A água em excesso é um fator importante para que este processo ocorra, além da energia térmica, pois exerce o papel como agente plastificante volátil (Ferreira; Almeida, 2022).

A gelatinização é uma propriedade característica exclusiva dos amidos e é irreversível – ou seja, se o amido gelatinizado passar por um processo de secagem, seus grânulos apresentarão estrutura amorfa. Em geral, os amidos apresentam temperaturas de gelatinização (ponto em que os grânulos de amido perdem a estrutura semicristalina) na faixa de 55 a 80°C, podendo chegar até 130°C quando se trata de amidos cerosos, por conta de uma maior cristalinidade percentual da amilopectina (Ferreira; Almeida, 2022). Quando a temperatura de gelatinização é alcançada, as pontes de hidrogênio continuam sendo quebradas e o intumescimento dos grânulos prevalece até que sua ruptura seja concluída, momento em que a

perda da birrefringência indica a perda da estrutura granular como consequência do rompimento (Dala-Paula; Kringel, 2021).

Após gelatinizar, o amido pode ser reestruturado – contanto que esteja em condições favoráveis – retornando à forma cristalina. Esse fenômeno é chamado de retrogradação ou recristalização (Azevedo *et al.*, 2018). Tal processo acontece quando há a diminuição da temperatura, permitindo um rearranjo das moléculas por ligações de hidrogênio (Nascimento, 2021). As moléculas de amilopectina e amilose começam uma reassociação e por conseguinte, percebe-se uma elevação de opacidade com a formação de um precipitado insolúvel ou de um gel viscoelástico firme (Ferreira; Almeida, 2022). Ao longo da retrogradação, as moléculas de amilose se unem a outras unidades de glicose, formando uma dupla hélice, ao passo que as moléculas de amilopectina são recristalizadas ao associarem suas pequenas cadeias. A molécula reestruturada induz o efeito da redução no volume e expulsão da água ligada às moléculas; este fenômeno é conhecido como sinérese (Dala-Paula; Kringel, 2021).

3.4 AGENTES PLASTIFICANTES

Os agentes plastificantes são substâncias que atuam como aditivos, capazes de melhorar o processamento dos polímeros e alterar propriedades como temperatura de amolecimento, temperatura de transição vítrea e propriedades mecânicas, tais como a elasticidade e alongamento à ruptura (Rosa *et al.*, 2013). Os plastificantes são estruturas de baixo peso molecular, geralmente de tamanho pequeno como polióis, glicerol e sorbitol, que preenchem as lacunas nas cadeias poliméricas, reduzindo a cristalinidade do biofilme (Jha, 2020; Imoisili; Jen, 2023). Para que sejam devidamente aplicados, é essencial que haja boa compatibilidade com o polímero e em proporções adequadas entre os componentes do material desenvolvido (Rosa *et al.*, 2013).

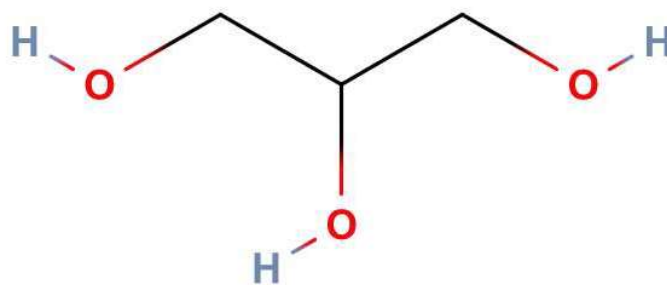
No caso dos filmes de amido, em virtude da sua fragilidade, o papel do plastificante é melhorar sua flexibilidade, processamento e trabalhabilidade. Tais propriedades dependem da concentração do plastificante e da umidade relativa do ambiente onde está armazenado, visto que, à medida que tais fatores aumentam, também se eleva a permeabilidade ao vapor de água e a resistência à tração (Jha, 2020). Os plastificantes melhoram a vida útil e a elasticidade dos polímeros à base de amido, os tornando mais adaptáveis e permitindo que possam ser misturados com variados constituintes poliméricos para diversas aplicações (Imoisili; Jen, 2023). Isso ocorre pois são capazes de alterar a organização molecular da rede, atribuindo um

aumento de volume à molécula, o que reduz as interações intermoleculares entre as cadeias adjacentes do amido, tornando-as mais móveis (Nascimento, 2021).

3.4.1 Glicerol

Devido seu baixo custo e toxicidade, o glicerol (Figura 3) é o plastificante mais utilizado como aditivo ao amido, embora constitua um material de fácil envelhecimento e com características higroscópicas (Ouyang *et al.*, 2024). O emprego de glicerol na tecnologia de polímeros tem atraído interesse no campo acadêmico devido suas propriedades notáveis, reunindo um crescente número de trabalhos de pesquisa nos últimos 10 anos, com o desenvolvimento da indústria de biodiesel (Ben; Samsudin; Yhaya, 2022).

Figura 3. Estrutura química do glicerol.



Fonte: Autora (2024).

Geralmente esse composto recebe o nome de glicerina para venda comercial. É uma molécula flexível capaz de formar ligações de hidrogênio, tanto intra quanto intermoleculares. Classificado como álcool poli-hídrico, a solubilidade em água se deve a ocorrência de três grupos hidroxila em sua estrutura química, que desempenham um papel crítico interação com moléculas de amido hidrofílicas (Beatriz; Araújo; Lima, 2011; Ben; Samsudin; Yhaya, 2022).

As literaturas revisadas por Ben, Samsudin e Yhaya (2022) apontam que a plastificação acontece em decorrência da interrupção da ligação de hidrogênio intra e intermolecular das cadeias poliméricas, onde o pequeno tamanho molecular do glicerol preencheria os vazios entre as cadeias, iniciando a interação polímero-glicerol. Assim, os mecanismos do glicerol como plastificante (Tabela 2) cumprem a teoria da lubricidade, a teoria do gel, a teoria mecanicista e a teoria do volume livre.

Tabela 2. Mecanismos de plastificação do glicerol

Teoria da lubricidade	A presença do plastificante atua como lubrificante para diminuir o atrito causado pelo movimento das cadeias poliméricas; torna material mais flexível e maleável.
Teoria do gel	O polímero atua como um material inchado com pontos de atração de hidrogênio ao longo das cadeias poliméricas. A introdução do gel faz com que as cadeias poliméricas adjacentes fiquem mais distantes.
Teoria mecanicista	Moléculas plastificantes não ligadas ou fracamente ligadas não permanecem estacionárias nos pontos de ligação de hidrogênio.
Teoria do volume livre	Pequenas moléculas de glicerol conferem vasto volume livre ao sistema polimérico. O inchaço da rede polimérica plastificada impede a reforma da estrutura rígida original

Fonte: Adaptado de Ben, Samsudin & Yhaya (2022).

Apesar do glicerol melhorar a flexibilidade do filme, deve-se ter cautela ao adicionar esse agente à formulação de biofilmes de amido, pois uma concentração de 45% a 50% ou mais pode conferir ao material um aspecto pegajoso. Caso o filme seja plastificado de forma excessiva, pode haver fenômenos como uma separação de fases, em que os plastificantes são fracamente aderidos à matriz do polímero base e podem precipitar na superfície do filme. Também pode ocorrer a lixiviação do glicerol, à medida em que o filme envelhece ou quando a umidade que está exposto é maior (Ben; Samsudin; Yhaya, 2022).

3.5 MÉTODOS DE MODIFICAÇÃO DO AMIDO

Os amidos nativos são comumente modificados para obter as propriedades almejadas devido à limitação de suas aplicações (Zhao *et al.*, 2024). Entre as barreiras para seu uso industrial estão a baixa resistência a temperaturas altas, ao cisalhamento e à digestão, baixo poder emulsificante, baixa solubilidade em água fria, elevado grau de retrogradação e instabilidade em ácidos. Logo, são modificados para atenuar estas desvantagens, podendo ser realizada por métodos enzimáticos, genéticos, químicos e físicos ou pela combinação desses (Yilmaz; Tugrul, 2023).

As modificações físicas têm despertado um crescente interesse em estudiosos, pois não envolve necessariamente algum tipo de tratamento químico e é considerada uma tecnologia verde. Alguns exemplos de modificação física são os tratamentos por ultrassom e por micro-ondas (Kaul *et al.*, 2023). O tratamento por micro-ondas é uma tecnologia vista como altamente

promissora por se tratar de uma técnica segura, rápida e higiênica, previne os efeitos das diferenças cinéticas que são proeminentes em outras formas de aquecimento (Kumar *et al.*, 2020). O processo de ultrassonicação envolve o uso de frequência de áudio maior do que 20 kHz gerada com transdutores magnetostritivos ou piezoelétricos que criam vibrações de alta energia. Esse tipo de tratamento atua principalmente na região amorfa dos grânulos de amido e geram estruturas microporosas dentro dos grânulos (Kaul *et al.*, 2023).

3.5.1 Tratamento por micro-ondas

O tratamento do amido por aquecimento em micro-ondas é um método físico de modificação considerado promitente, pois tem como vantagens a operação homogênea sobre a amostra, rapidez no processamento, profundidade de penetração e melhor qualidade do produto (Oyeyinka *et al.*, 2021). As micro-ondas são ondas eletromagnéticas que operam na faixa de frequência de 300 MHz a 300 GHz e consistem em um tipo de energia radiante não ionizante, aplicada para modificar o amido e alterar sua estrutura de forma efetiva (Yilmaz; Tugrul, 2023). A irradiação de micro-ondas oferece economia de tempo para a preparação de materiais poliméricos (Gizdavic-Nikolaidis *et al.*, 2023).

No método de aquecimento convencional, a irradiação do micro-ondas intensifica aceleradamente a temperatura global do material até o ponto ajustado manualmente pelo operador, momento em que a potência é desligada automaticamente (Gizdavic-Nikolaidis *et al.*, 2023). Pelas abordagens levantadas por Zhao *et al.* (2024), a ação do campo de micro-ondas sobre a matéria tem foco principal no aquecimento dielétrico, que inclui polarização dipolo com efeito térmico suave e condução iônica com efeito térmico intenso. O campo elétrico da irradiação vibra cerca de $4,9 \times 10^9$ vezes por segundo, estimulando a reorganização de moléculas polares e íons e a colisão destes com as moléculas circundantes, transformando a energia eletromagnética em energia térmica. As propriedades dielétricas têm influência de fatores como a frequência do micro-ondas, a composição do sistema, densidade e temperatura (Tao *et al.*, 2020).

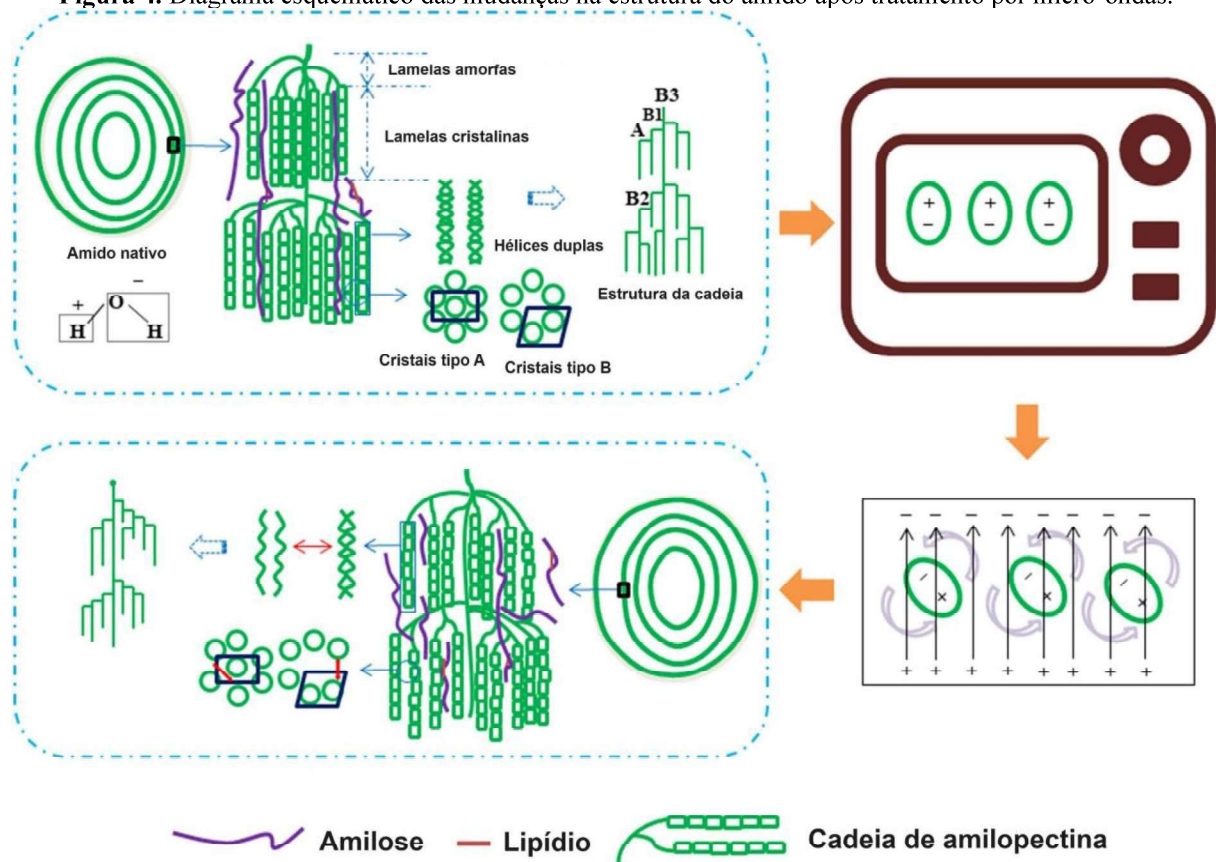
As aplicações desse tipo de irradiação podem alterar a estrutura e as funcionalidades do amido. Oyeyinka *et al.* (2021) observaram que o micro-ondas provavelmente afeta a cadeia da amilopectina, desordenando a estrutura amilácea. Além disso, perceberam que a deformação da superfície do grânulo aumentou com o prolongamento do tempo de micro-ondas. De acordo com Tao *et al.* (2020), quando o amido, contendo uma elevada quantidade de grupos hidroxila e um pouco de água, é submetido a uma alta potência de micro-ondas, tende a se reorganizar

continuamente, esfregar e colidir. Deste modo, quanto mais calor gerado, mais mudanças significativas são causadas ao estado e à morfologia dos grânulos (Tao *et al.*, 2020).

Diante do levantamento na literatura feito por Cai *et al.* (2024), os resultados obtidos por diversos autores apontam que o tratamento por micro-ondas pode interromper a microestrutura interna dos grânulos de amido, o que afeta a rugosidade da superfície e a deformação das partículas. O desdobramento em que as partículas são modificadas varia com a potência e o tempo de exposição a energia e a radiação penetrante. Na Figura 4, é esquematizado um diagrama das mudanças sofridas pela estrutura do amido após o tratamento por micro-ondas.

Os cristais do tipo A e do tipo B agrupados de forma ordenada e as duplas hélices facilitam a formação de estruturas lamelares (empilhadas com lamelas amorfas e cristalinas). As cadeias de amido podem se autoformar em estruturas helicoidais (Cai *et al.*, 2024). As lamelas cristalinas abrangem mais estrutura de dupla hélice de amilopectina, ao passo que as lamelas amorfas consistem em lipídios, amilose e menos estrutura de dupla hélice de amilopectina (Zhao *et al.*, 2024).

Figura 4. Diagrama esquemático das mudanças na estrutura do amido após tratamento por micro-ondas.



Fonte: Adaptado de Cai *et al.* (2024).

Pode-se afirmar que as propriedades dos derivados de amido assistidos por micro-ondas são superiores às dos sintetizados sem o tratamento. Apesar de haver desvantagens, como a ocorrência de superfícies mais ásperas, o método se torna vantajoso por oferecer maior grau de substituição, menor tempo de reação, maior inchaço, entre outros, que também podem ser adaptados com base na potência e tempo de micro-ondas (Zhao *et al.*, 2024).

3.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO POLIMÉRICA

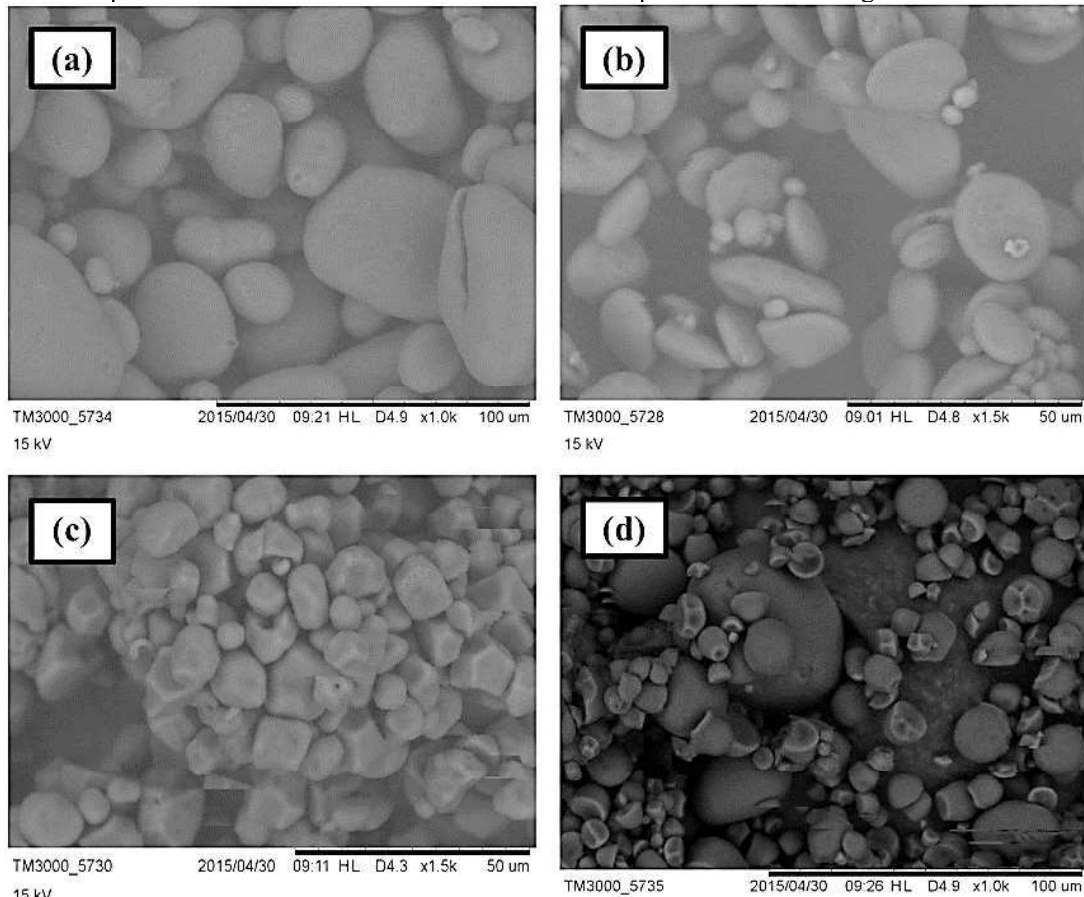
Após o processamento do material, métodos experimentais podem avaliar e estimar a durabilidade e a resistência oxidativa de biopolímeros. As principais técnicas adotadas para examinar a degradação do biofilme, ou seja, modificações estruturais e de propriedades, podem ser resumidas como: a) técnicas de espectrometria, para detectar alterações de peso molecular; b) técnicas de espectroscopia, como Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), para acompanhar mudanças estruturais e conformacionais de macromoléculas; c) calorimetria e termogravimetria, como a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Análise Termogravimétrica (TGA), para averiguar alterações estruturais, de entalpia de reação e detecção de valores de temperatura de transição; d) técnicas de viscosimetria; e) teste mecânico; entre outros (Dintcheva, 2024).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma ferramenta analítica largamente utilizada para investigar a morfologia e a composição da microestrutura na superfície de substâncias sólidas (Cai *et al.*, 2024). O microscópio utilizado é um instrumento considerado versátil por fornecer imagens da amostra com alta resolução e aparência tridimensional como resultado da sua profundidade de campo. O princípio de funcionamento da MEV se fundamenta na aplicação de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro, explorando cada ponto da superfície da amostra por linhas sucessivas e por fim, transmitindo o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente (Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

A imagem proveniente do sinal captado na varredura eletrônica pode exibir diferentes características e a amostra pode emitir diferentes sinais. Os mais utilizados para obtenção de imagem são os originários dos elétrons secundários (SE) – resultantes de baixa energia (<50eV), formadores de imagem de alta resolução (3-5 nm) e gera a topografia da superfície; e/ou dos elétrons retroespalhados (BSE) – aqueles que sofreram espalhamento elástico, provêm de camadas mais superficiais da amostra e permitem a caracterização química da amostra (Dedavid; Gomes; Machado, 2007). No caso do amido, como sua forma nativa existe na

configuração de grânulos, estes podem apresentar formatos variados em uma imagem obtida por MEV: esférico, elipsoidal, poliédrico, hemisférico, em forma de martelo e em forma de pera (Cai *et al.*, 2024). Em sua maioria, apresentam morfologia ovoide, esférica ou irregular, de tamanho que varia a partir da fonte vegetal (Tao *et al.*, 2020), como visto na Figura 5, que apresenta micrografias para os amidos de batata (a), trigo (b), milho (c) e mandioca (d).

Figura 5. Fotomicrografias dos amidos de (a) batata, (b) trigo, (c) milho e (d) mandioca com ampliação de 1000 x para amidos de batata e de mandioca e de 1500 x para os amidos de trigo e de milho.



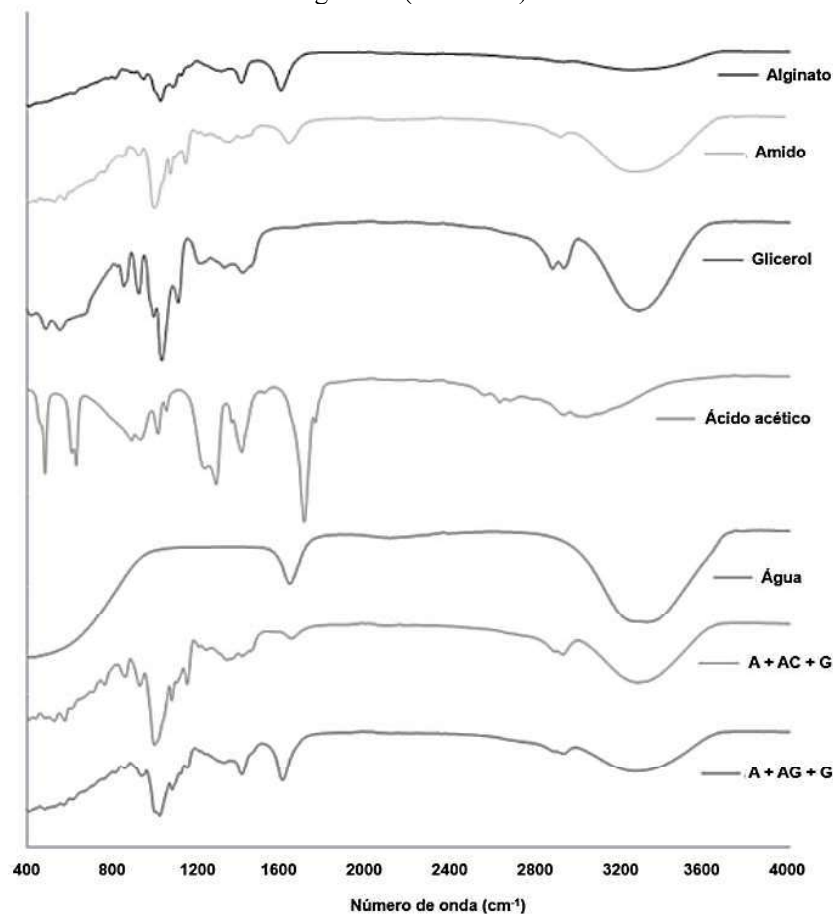
Fonte: Luchese (2018).

O FTIR é uma ferramenta analítica que provê informações sobre a estrutura de curto alcance e ligação de moléculas (Kumar *et al.*, 2020), usada para obter o espectro infravermelho de absorção ou emissão de um sólido, líquido ou gás (Fadlelmoula *et al.*, 2022). Baseia-se na vibração e rotação de átomos; assim, as moléculas com momento dipolar são detectadas por meio de uma “impressão digital”, visto que todas as substâncias se diferem no tipo, número e/ou posição de átomos (Gongo; Chen; Wu, 2024). O espectrômetro FTIR colhe de forma simultânea informações de alta resolução em uma ampla faixa espectral (no intervalo de comprimento de onda entre 4000 e 400 cm^{-1}) e quantifica quanta luz uma amostra absorve em cada frequência (Fadlelmoula *et al.*, 2022).

A espectroscopia FTIR é aplicada como um instrumento analítico qualitativo ou quantitativo rápido e preciso há mais de 50 anos em áreas como ciência de alimentos, análises de fármacos, ciência forense e ciência de materiais (Gongo; Chen; Wu, 2024). Essa tecnologia é útil para identificar e caracterizar materiais poliméricos e biopoliméricos, além de avaliar o processo de polimerização, caracterizar a estrutura, superfície, degradação e modificação do polímero (Kowalczyk; Pitucha, 2019). Logo, a técnica de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier tem sido adotada com a finalidade de caracterizar mudanças na estrutura do amido após o processamento, como modificações na ordem de dupla hélice, cristalinidade, conformação da cadeia de amido e helicidade (Cai *et al.*, 2024).

No estudo realizado por Romeira (2019), bioplásticos foram elaborados a partir de amido residual a partir de diferentes proporções de amido residual e glicerol combinado com alginato e com ácido acético. Em seus resultados, a autora obteve espectros (Figura 6) para a água, amido, ácido acético, alginato, glicerol e do bioplástico com ácido acético (A + AC + G) e bioplástico com alginato (A + AG + G).

Figura 6. Espectroscopia por Infravermelho de amostras das substâncias individuais: água, amido, ácido acético, alginato e glicerol e das substâncias conjugadas: amido, ácido acético e glicerol (A+AC+G) e amido, alginato e glicerol (A+AG+G).



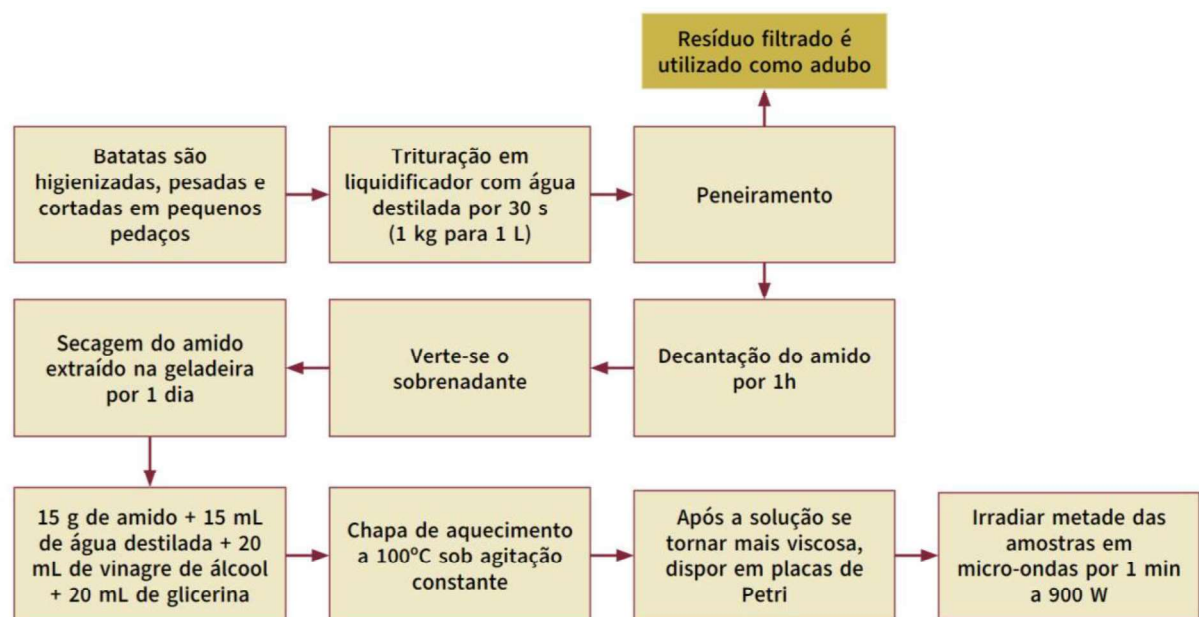
Fonte: Adaptado de Romeira (2019).

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi realizada, de forma geral, no Laboratório de Sistemas Poliméricos (LASP) no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco – Campus Recife. Os procedimentos de extração do amido e produção dos biofilmes foram adaptados de metodologias como as de Dobrachinski e Finkler (2022) e Imoisili e Jen (2023). A síntese biopolímero é resumida no fluxograma exposto na Figura 7.

De forma semelhante à Nascimento (2021), os biopolímeros foram obtidos através da técnica conhecida como *casting*, que se traduz na solubilização do amido em um solvente e aplicação sobre um suporte para evaporação, ocorrendo a desidratação da dispersão filmogênica sobre placas de Petri. Nesse caso, a amilopectina e amilose que estão dispersas na solução aquosa após a gelatinização térmica dos grânulos de amido se reorganizam durante a secagem, originando uma matriz contínua que forma o bioplástico (Romeira, 2019).

Figura 7. Fluxograma da síntese do biopolímero de batata inglesa.



Fonte: Autora (2024).

4.1 EXTRAÇÃO DE AMIDO

As amostras do biopolímero foram desenvolvidas com amido extraído de batatas do tipo Inglesa, escolhidas preferencialmente maduras e com boa aparência física, prezando pela integridade da casca e ausência de fissuras. As batatas foram higienizadas, pesadas e cortadas

em pequenos pedaços. Em seguida, triturou-se com água destilada em um liquidificador doméstico, utilizando a proporção de 1 L de água para 1 kg de batata. O equipamento foi acionado algumas vezes no modo “pulsar” até a desintegração parcial dos pedaços do tubérculo e depois se processou por 30 segundos, evitando o escurecimento da solução.

Peneirou-se o material dispondo a solução contendo amido, água e resquícios de biomassa em um recipiente, observado na Figura 8A. O resíduo filtrado serviu como adubo para plantas, visto na Figura 8B, evitando o desperdício e descarte inadequado. A solução passou por decantação durante 1 hora e após esse tempo, o sobrenadante foi vertido cuidadosamente. Deste modo, pôs-se o amido extraído para secar na geladeira por cerca de 1 dia. O amido seco foi pesado e triturado manualmente para o preparo de amostras.

Figura 8. A) Peneiramento das batatas inglesa trituradas; B) Destinação dos resíduos gerados no processo de produção do biopolímero.



Fonte: Autora (2024).

4.2 SÍNTESE DO BIOPOLÍMERO

Para a elaboração das amostras do biopolímero, pesou-se 15 g do amido obtido em um béquer, umidificando com 15 mL de água destilada. Adicionou-se 20 mL de vinagre de álcool (solução de ácido acético 4,0%), foi feita a homogeneização e posteriormente, acrescentou-se 20 mL de glicerina (marca Anidrol, Glicerina PA ACS; marca QUIMESP QUÍMICA, glicerina branca - glicerol) à solução, homogeneizando novamente. A mistura foi levada para a chapa de aquecimento em uma temperatura aproximada de 100°C, agitando a solução constantemente, entre 10 e 15 minutos, até a obtenção de uma solução mais viscosa. O material preparado foi distribuído em placas de Petri, dispondo cerca de 30 g em cada uma. Metade das amostras foram

irradiadas em um forno micro-ondas (Brastemp BMS45CBBNA) operando a 900 W de potência por 1 minuto. O tempo de irradiação foi feito em dois períodos de operação: primeiro por 30 segundos, um descanso de 15 segundos com o micro-ondas desligado e aberto, e mais 30 segundos. Deste modo, evitou-se a caramelização do material. Após isso, todas as amostras foram direcionadas a uma bancada para secagem natural em temperatura ambiente.

4.3 MOLDAGEM

O biopolímero foi submetido ao processo de moldagem, a fim de verificar sua funcionalidade e capacidade de aplicação. Para isso, o material sintetizado foi disposto em diferentes formas. Também foram elaborados dois vasos de planta utilizando duas formas comerciais para pudim sobrepostas, prensando a pasta viscoelástica entre elas. Um desses vasos foi levado ao micro-ondas. Nestes vasos, plantou-se sementes de feijão e foi feita a observação contínua durante 30 dias, comparando a eficiência de ambos em relação a um material plástico sintético não-biodegradável. Borrifou-se água diariamente durante o período de observação. Foram analisados os aspectos de degradação apresentados pelos dois vasos (com irradiação do micro-ondas e sem), tais como o crescimento de microrganismos, o consumo do substrato, que neste caso é o próprio polímero, e eventuais mudanças de propriedades.

4.4 AVALIAÇÃO DE DEGRADAÇÃO MICROBIOLÓGICA

Amostras do biopolímero foram avaliadas quanto ao crescimento de microrganismos em sua superfície e a degradação causada. Para isso, amostras não tratadas e amostras com tratamento de micro-ondas, dispostas em placas de Petri, foram umedecidas com água doce, proveniente do Canal do Arruda (8°01'13.7"S 34°52'31.5"W, Google Maps), e água marinha coletada na Praia do Pina (-8.093500, -34.881252, Google Maps), ambos os locais situados no município de Recife – PE. O período de observação foi de 30 dias.

4.5 TRATAMENTO COM FLUXO DE ÁGUA

Foi realizado um tratamento com água que teve a finalidade de analisar o comportamento das amostras ao serem submetidas a um fluxo contínuo, observando a perda de massa e a degradação sofrida. Para isso, as amostras foram colocadas em um cadinho de Gooch

com placa filtrante de vidro sinterizado e com o auxílio de uma bureta, induziu-se um gotejamento de 25 mL de água mineral filtrada (Figura 9).

Figura 9. Procedimento para o tratamento do biopolímero com fluxo contínuo com água.



Fonte: Autora (2024).

Após o procedimento, ambas amostras foram secas em um dessecador de vidro com sílica gel para remoção da água, para avaliar a perda de massa do material e oferecer boas condições para direcioná-lo à análise de MEV.

4.6 ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO

As amostras sintetizadas do biopolímero, sem e com irradiação do micro-ondas, foram condicionadas em temperatura ambiente por no máximo 30 dias e analisadas pelos seguintes métodos: Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

4.6.1 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

As mudanças na representação estrutural do biopolímero devido ao efeito do tratamento de modificação promovido pelas micro-ondas foram avaliadas por análise de FTIR utilizando um espectrofotômetro de transformada de Fourier (Shimadzu IRSpirit) com uma faixa de comprimento de onda de varredura de 400 a 4000 cm^{-1} e uma resolução de 4 cm^{-1} . O procedimento foi realizado na Central Analítica, localizada no Departamento de Química Fundamental do Campus Recife da UFPE.

4.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Análise de microscopia eletrônica de varredura foi usada para examinar as mudanças na morfologia microscópica do biopolímero de amido de batata ao receber tratamento com micro-ondas. Tal procedimento foi realizado no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) localizado no Campus Recife da UFPE. Ao total, foram analisadas 4 amostras: biopolímero sem irradiação, biopolímero com irradiação do micro-ondas e duas amostras que passaram por um fluxo contínuo com água, sem irradiação e com irradiação.

Para a realização do MEV, uma pequena quantidade de cada amostra foi preparada através do processo de revestimento por pulverização catódica a vácuo no equipamento Quorum SC7620 Sputter Coater, necessitando que estivessem previamente secas em estufa. Em seguida, foram mineralizadas e analisadas por um microscópio eletrônico de varredura (MIRA3 TESCAN) com voltagem de aceleração de elétrons de 15 kV e detector BSE.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de extração de amido para 1 kg de batatas (6 batatas de tamanho médio a grande) rende aproximadamente 60 g de amido (Figura 10A), configurando um rendimento de 6%. Segundo Bressanin (2010), fatores como a concentração de amido presente nas batatas e o modo e tempo de processamento são fatores que influenciam o rendimento do amido. Tais parâmetros foram observados durante o processo, o que exigiu uma padronização do tempo de trituração no liquidificador de apenas 30 segundos, de modo que não houvesse um grande escurecimento da solução e nem comprometesse a extração da fécula da batata.

A depender da forma de verter o sobrenadante, alguns resquícios da solução de água e biomassa podem permanecer na superfície do amido decantado, ocasionando a mudança de coloração do amido durante a secagem e armazenamento, consequentemente podendo influenciar na cor do biofilme. O escurecimento do amido (Figura 10B) acontece pela ocorrência de atividade de radicais livres e processos de oxidação catalisados por enzimas presentes no tubérculo, como a polifenoloxidase, que utiliza fenólicos como substratos para suas reações e o O_2 como cofator (Vitti *et al.*, 2019).

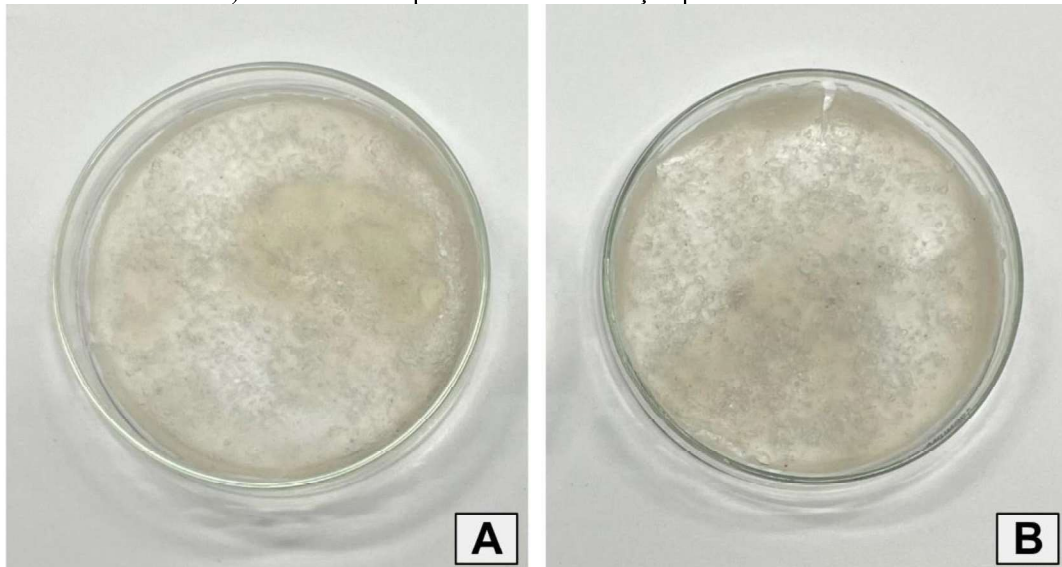
Figura 10. Amido extraído da batata inglesa (A) não oxidado; (B) oxidado.



Fonte: Autora (2024).

Para a obtenção do biopolímero, foram testadas diferentes formulações até se adquirir uma pasta viscoelástica que, após secagem, não manifeste um aspecto muito pegajoso. Deste modo, realizando esse controle, foi possível desenvolver amostras do biopolímero com uma coloração transparente, como vistas na Figura 11A e 11B. Priorizou-se uma espessura fina, de modo que possibilite analisar suas características.

Figura 11. Biopolímero de amido de batata inglesa A) Amostra do biopolímero sem irradiação por micro-ondas; B) Amostra do biopolímero com irradiação por micro-ondas.



Fonte: Autora (2024).

Durante o aquecimento da formulação do biopolímero, o amido passa por uma transição cooperativa em que a água entra nas regiões amorfas dos grânulos, fazendo com que inchem e as regiões cristalinas sejam desestabilizadas. Assim, há um derretimento dos cristais e uma perda completa da estrutura ordenada (Warren; Gidley; Flanagan, 2016). Após a secagem, a evaporação da água promove o rearranjo de moléculas do amido, favorecendo a cristalização e formação do biofilme (Bressanin, 2010).

As amostras expostas as micro-ondas, sendo o caso do exemplar da Figura 11B, apresentaram um aspecto opaco após a irradiação, além de se mostrar um pouco mais rígida e seca. Porém, também foi observado o surgimento de bolhas na superfície, possivelmente atribuídas a evaporação da umidade pelo tratamento térmico (Kumar *et al.*, 2020). O bioplástico não-irradiado manifestou um aspecto pegajoso e úmido, principalmente à medida em que envelhecia, provavelmente ocasionada pela lixiviação do glicerol da matriz do polímero para a superfície (Ben; Samsudin; Yhaya, 2022).

Kumar *et al.* (2020) ao realizarem o aumento do tratamento de micro-ondas sobre o amido de batata de 1 minuto para 3 minutos, verificaram que houve uma redução de 1,2% no valor de L* (luminosidade) em virtude do processo de caramelização. Entretanto, concluíram que a cor não pôde ser apontada como uma ferramenta de triagem visual para definir as propriedades do amido (e consequentemente do biopolímero), considerando que não houve uma alteração significativa em outros parâmetros de cor. Experimentalmente, notou-se o processo de caramelização promovido pelo micro-ondas, o que exigiu cautela ao irradiar o bioplástico, estabelecendo um tempo máximo de irradiação de 1 minuto.

O biopolímero obtido pôde ser moldado em diferentes formas e teve boa performance ao ser misturado a corantes alimentícios (Figura 12).

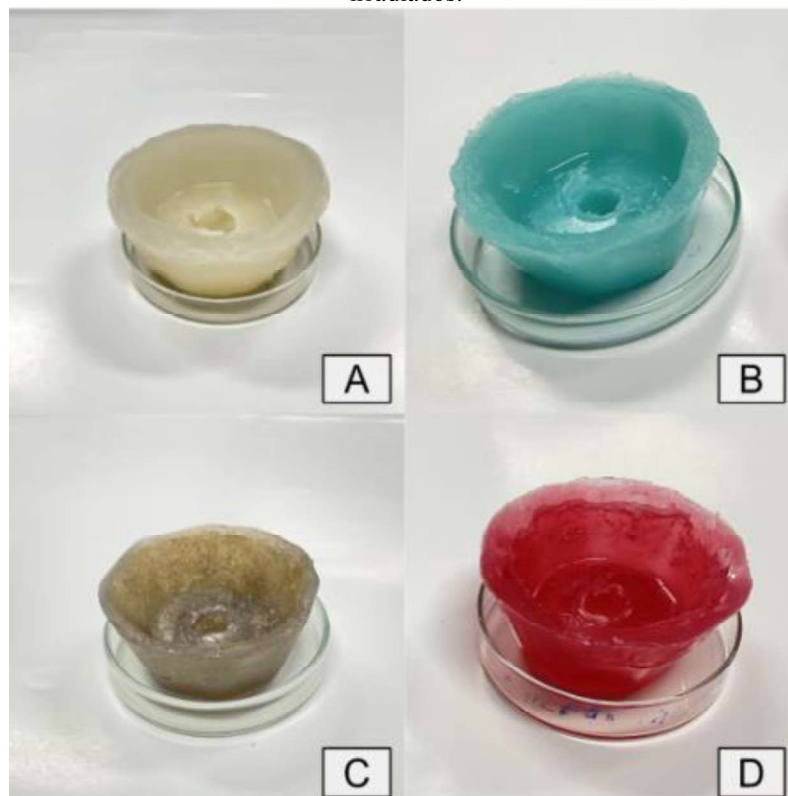
Figura 12. Biopolímero de amido de batata inglesa moldado em diferentes formas e cores.



Fonte: Autora (2024).

Também foram moldados vasos, sem e com irradiação (Figura 13) para verificar o potencial de aplicação do biopolímero como substrato para o crescimento de vegetação.

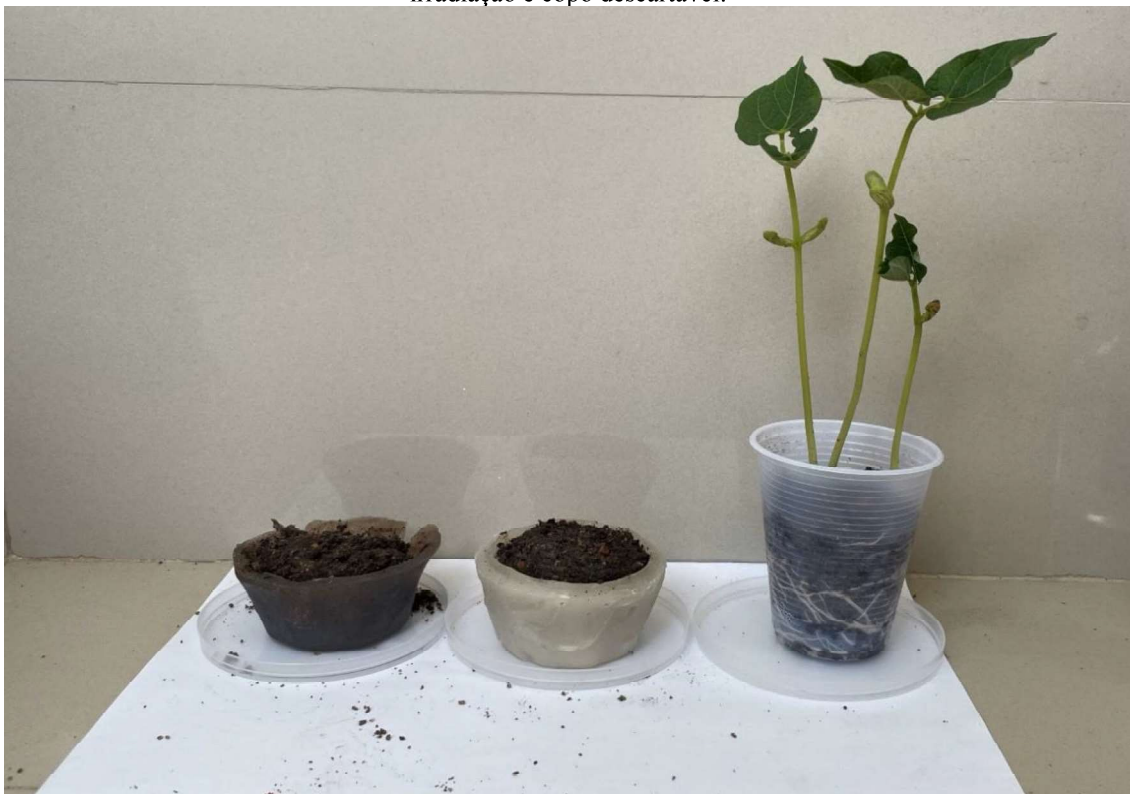
Figura 13. Vasos de planta de biopolímero de amido de batata inglesa: (A) e (B) não irradiados; (C) e (D) irradiados.



Fonte: Autora (2024).

Vale ressaltar que na Figura 13C, a coloração do vaso irradiado tem aparência mais escurecida pois o amido utilizado para sua confecção foi armazenado por mais tempo antes da produção da pasta. O orifício central foi coberto com um pequeno disco de papel filtro. Foram plantadas sementes de feijão em ambos os vasos e em um copo descartável, para fins de comparação. Infelizmente, não houve germinação nos vasos feitos com o biopolímero, apenas no copo descartável (Figura 14).

Figura 14. Plantio de feijão, após 5 dias. Da esquerda para direita: vaso irradiado por micro-ondas, sem irradiação e copo descartável.



Fonte: Autora (2024).

A ausência de germinação nos vasos confeccionados provavelmente se deu por conta da acidez da terra que reduziu ao entrar em contato com o biopolímero que tem pH em torno de 4,5 a 5. Segundo citado por Heinrichs *et al.* (2008), a plantação de feijão alcança sua produtividade máxima quando o pH do solo medido em água está entre 6,0 e 7,0.

Posteriormente, outras tentativas de cultivo foram efetuadas usando sementes de girassol e de feijão verde, que também falharam. Logo, conclui-se que, apesar de Araújo *et al.* (2021) apontarem os biopolímeros como potenciais substituintes para materiais plásticos sintéticos convencionais como uma alternativa de baixo custo, renovável e benéfica para o solo por se tratar de um material rico em carbono, a presente pesquisa demonstra que outros fatores podem influenciar essa aplicação. No entanto, o material ainda pode ser submetido à

compostagem em um cultivo de maior escala, podendo oferecer nutrientes ao solo ao passar pela biodegradação promovida por microrganismos, servindo de substrato (Araújo *et al.*, 2021).

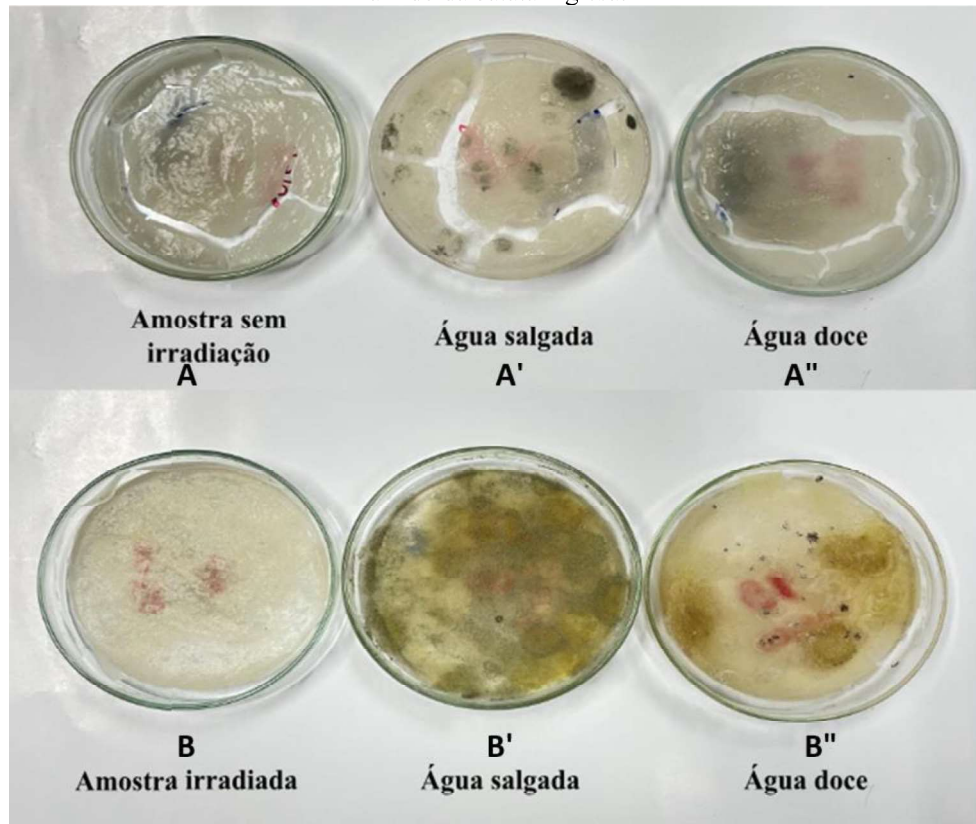
Em geral, os biofilmes apresentaram boa resistência ao ataque microbiológico de microrganismos presentes no ambiente ao qual estão expostos. O crescimento de fungos e bactérias pode ocorrer em decorrência de más condições de manipulação, de processamento e de higiene durante a extração do amido e da produção do biopolímero, além de condições de secagem inadequadas. Oliveira, Cidade e Oliveira (2022), em sua primeira tentativa de formulação padrão para um biopolímero composto por amido de batata, glicerina, água e ácido clorídrico, perceberam a formação de colônias de microrganismos e atribuíram esse problema ao excesso de umidade na amostra, corrigindo o problema reduzindo a quantidade de água introduzida na formulação.

Luchese (2018), ao realizar a avaliação da biodegradabilidade de biofilmes de amido de diferentes fontes vegetais, verificou após 7 dias de ensaio que houve mudanças de cor, tonalidade e integridade. A autora salienta que essa degradação ocorre por ação do calor, presença de umidade e atividade enzimática de microrganismos, que enfraquecem as cadeias poliméricas do amido. Porém, esses problemas puderam ser evitados com o seguimento cuidadoso da metodologia do presente trabalho.

Durante o período de 30 dias foi observado o comportamento da superfície do biopolímero, sem irradiação e irradiada, ao ser embebida em água marinha e em água doce (Figura 15). Uma amostra de cada uma, produzida no mesmo dia, foi mantida no mesmo ambiente sem a adição de água. A presença de rachaduras apenas nas amostras sem irradiação (devido ao envelhecimento da amostra) evidencia o efeito do tratamento com micro-ondas sobre as propriedades de colagem do material, em que a estabilidade da pasta aumenta e os grânulos de amido se tornam menos suscetíveis à ruptura (Cai *et al.*, 2024).

Em termos gerais, as amostras que passaram por tratamento com micro-ondas sofreram um ataque microbiológico bem mais significativo. Também se pode afirmar que as amostras com água salgada degradaram mais expressiva e rapidamente do que as de água doce. Medeiros (2023), ao realizar ensaios de degradação de filmes de ágar com adição de glicerol em água doce, atestou uma perda de massa de 22% em 40 dias. Em pesquisas citadas pela autora, os tempos de degradação e as perdas de massa, de filmes de diferentes formulações, foram respectivamente de 56 semanas e 120 dias com 4,7 e 66%, o que mostra que a biodegradação em água doce ou em água do mar é variável dependendo da composição do material. O estudo da degradação do biopolímero pela ação da água é importante para evidenciar seu potencial em substituir materiais plásticos poluidores de ambientes aquáticos (Ali *et al.*, 2024).

Figura 15. Ensaio de degradação de amostras padrão sem (A) e com (B) exposição as micro-ondas, em água salgada da praia do Pina (A' e B') e doce do Canal do Arruda (A'' e B''), em Recife-PE, ao biopolímero de amido da batata inglesa.



Fonte: Autora (2024).

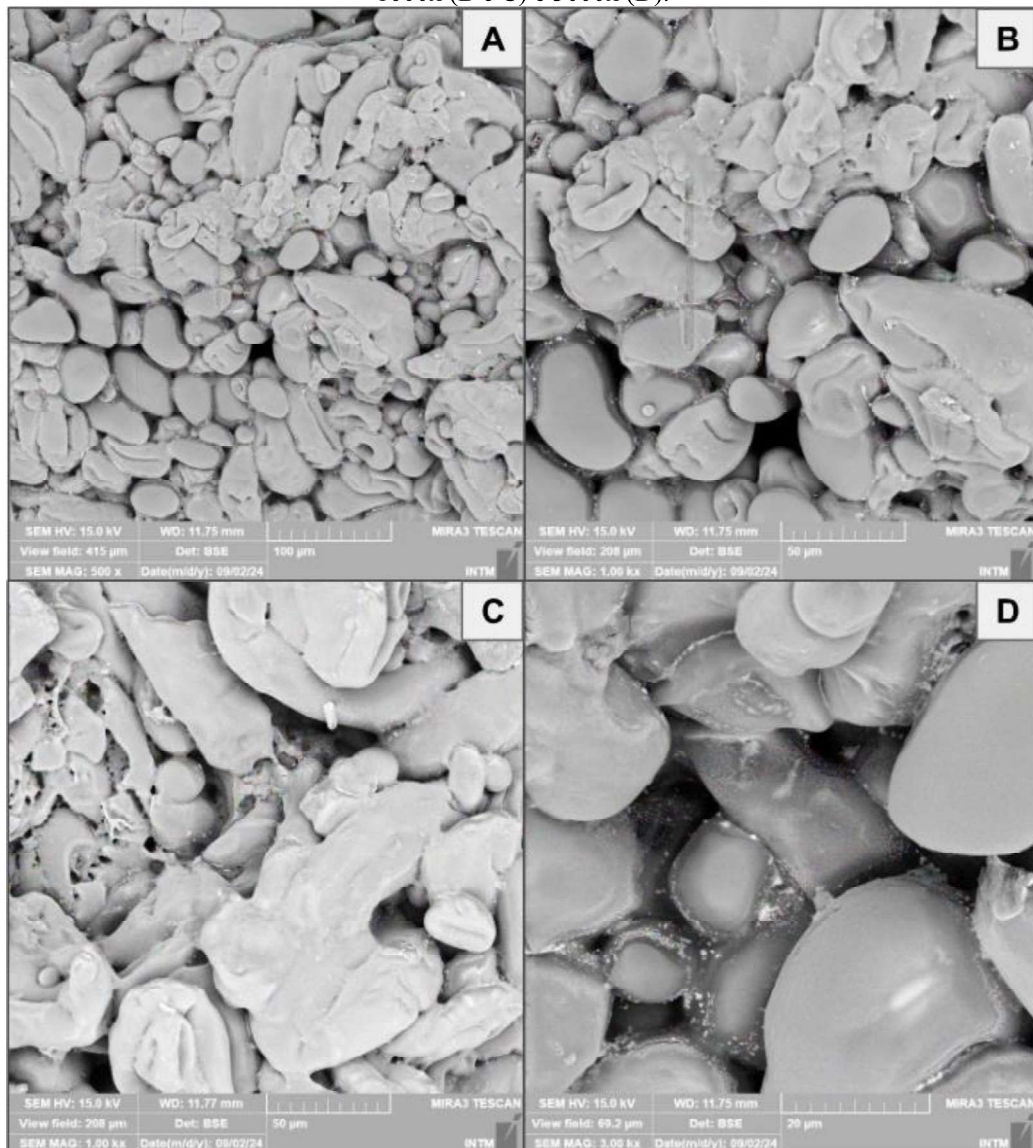
Nesse contexto, o procedimento de tratamento com fluxo contínuo de água citado na seção 3.5.2 deste trabalho também é necessário para avaliar a perda de massa. Inicialmente foram pesados 1,70 g de cada amostra; a amostra sem irradiação perdeu cerca de 35% de massa enquanto a irradiada perdeu 29%. Apesar de tal diferença não ser tão expressiva, é um bom indicativo da resistência do biopolímero tratado com micro-ondas à degradação física, o que fomenta sua potencialidade como matéria-prima para outros produtos, como as embalagens de alimentos (Ghasemlou; Barrow; Adhikari, 2024).

Na Figura 15, é possível visualizar as imagens obtidas pelo MEV para o biopolímero de amido de batata inglesa antes do tratamento com micro-ondas. As micrografias foram capturadas com resolução de 500x (Figura 16A), 1000x (Figuras 16B e 16C) e 3000x (Figura 16D). As imagens possibilitaram identificar uma estrutura granular típica de um biofilme contendo amido de batata, com a presença de grânulos menores com formato esferoide, grânulos maiores em formato ovalado e grânulos de superfície irregular com alguns desníveis.

Tais imagens se assemelham às micrografias obtidas por Ronko, Travalini e Demiate (2020), ao caracterizarem e compararem amido industrial com amido de mandioca; por Luchese

(2018), que definiu a estrutura morfológica do amido de batata como uma forma ovalar; e por Oyeyinka *et al.* (2021), ao analisarem o amido de batata nativo sem acetilação ou aquecimento por micro-ondas. Kumar *et al.* (2020) mostraram que os grânulos de amido de batata sem irradiação, usados como controle para um estudo de tratamento com micro-ondas, apresentaram-se com uma mistura de vários formatos e tamanhos com superfície lisa. Os menores eram principalmente de formatos esféricos com tamanho variando entre 8 e 27 μm , enquanto os grânulos maiores (40 a 80 μm) eram uma mistura de formatos ovais, esféricos, poligonais e irregulares. Kaul *et al.* (2023) corroboram com esses resultados.

Figura 16. Micrografias do biopolímero de amido de batata inglesa, com resolução de 500x (A); 1000x (B e C) e 3000x (D).

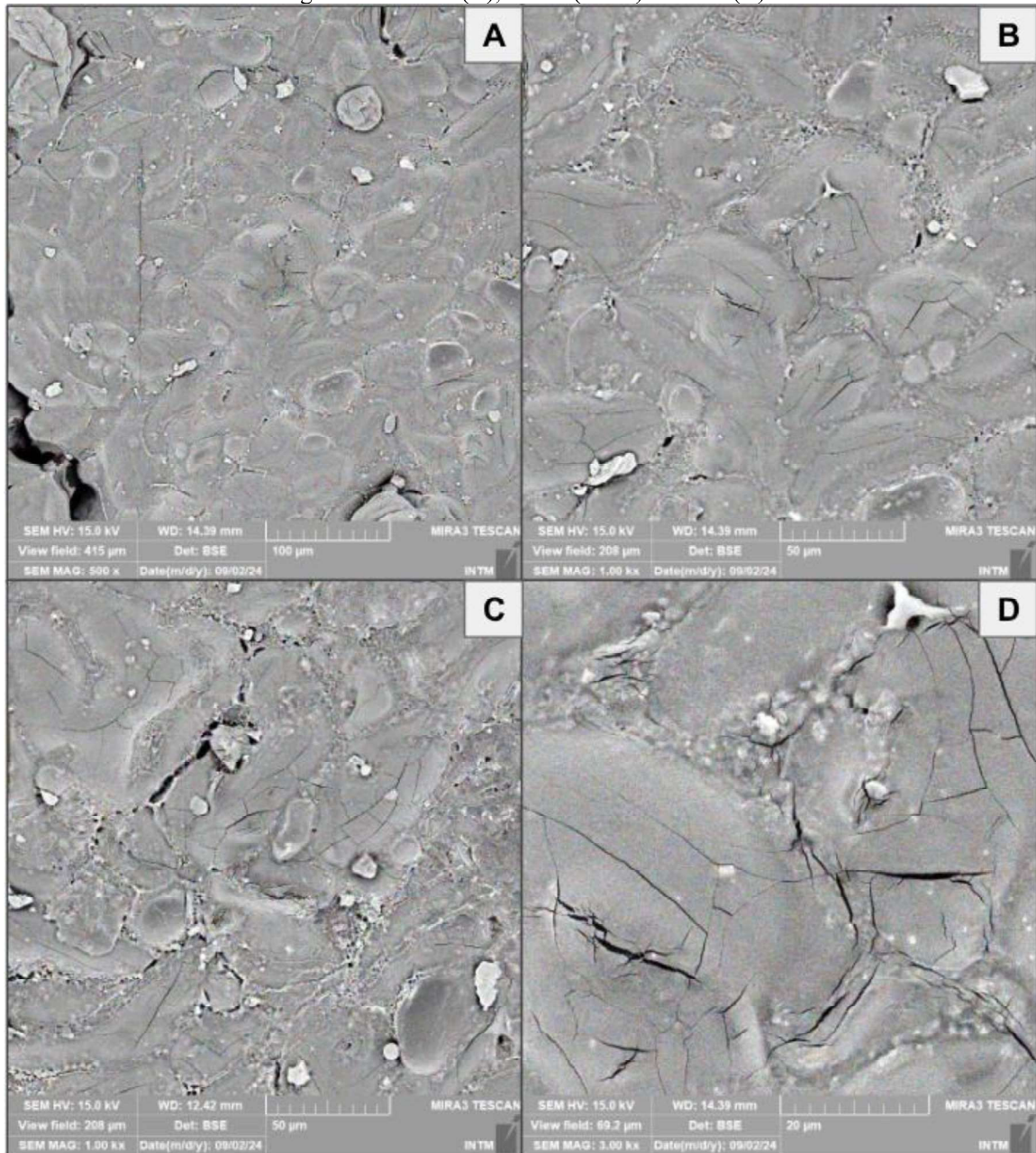


Fonte: Autora (2024).

As micrografias do biofilme de amido irradiado pela ação das micro-ondas (Figura 17) forneceram resultados bastante diferentes em comparação a amostra de controle, o que significa que o tratamento com a irradiação não-ionizante efetivamente altera a estrutura morfológica do amido e, conseqüentemente, do biopolímero. A superfície se mostrou mais lisa e homogênea, com presença de amido não-dissolvido e algumas rachaduras. Conforme analisado por Zhao *et al.* (2024), à medida que a potência de micro-ondas aumenta, a maioria dos grânulos de amido se torna áspera em termos de aparência e tem seu formato distorcido em função das diferentes tensões geradas por diferentes taxas de hidratação dos grânulos.

Oyeyinka *et al.* (2021) afirmaram que o aquecimento do amido por micro-ondas reduz significativamente o inchaço do amido, provavelmente devido ao rearranjo das regiões cristalinas dentro dos grânulos, que podem se tornar mais aleatoriamente distribuídas. Li *et al.* (2018) acreditam que o amido passa por expansão, inchamento e recristaliza logo após o tratamento com micro-ondas; logo, a estrutura se torna mais resistente e pode resistir à hidrólise enzimática.

Figura 17. Micrografias do biopolímero de amido de batata inglesa com irradiação por micro-ondas, com magnitude de 500x (A); 1000x (B e C) e 3000x (D).



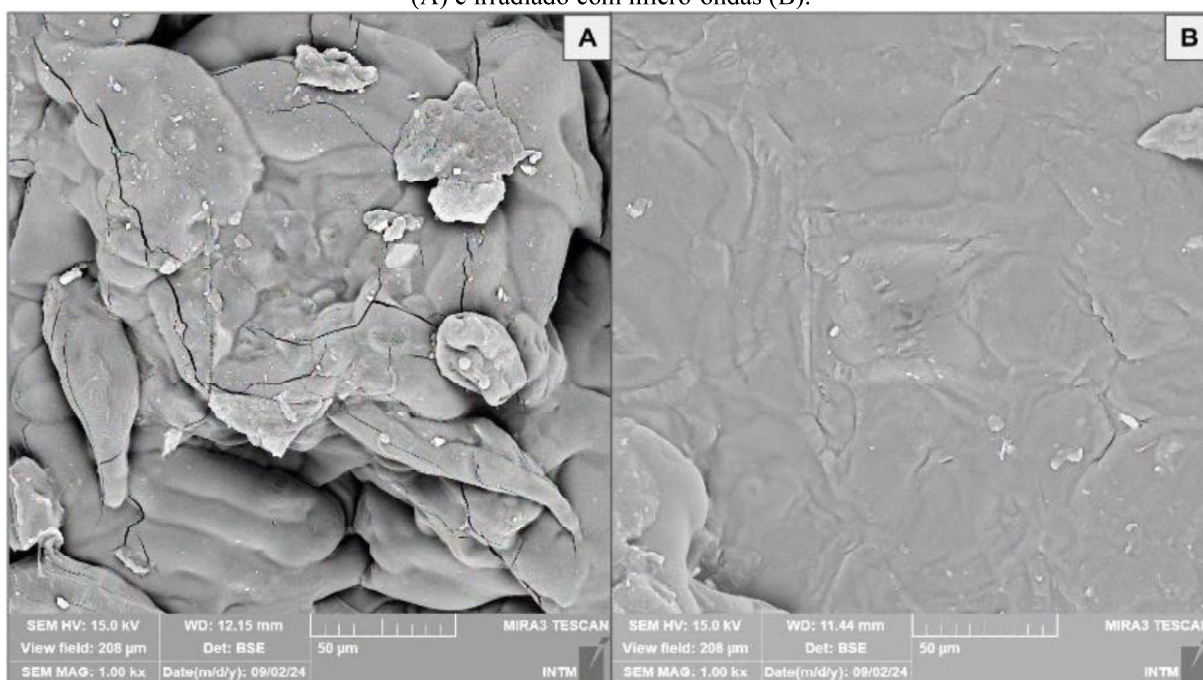
Fonte: Autora (2024).

Ao tratar com micro-ondas, autores como Kaul *et al.* (2023) também observaram uma deformação no amido e a presença de rachaduras, marcas e migalhas na superfície. De acordo com Kumar *et al.* (2020), a formação de tais rachaduras acontece pela alta pressão desenvolvida dentro dos grânulos ao se converter umidade em vapor. A morfologia da superfície do biopolímero irradiado apresenta similaridades com as micrografias eletrônicas de varredura do amido granular de batata durante o tratamento por micro-ondas estudado por Ma *et al.* (2015).

As análises sobre o tratamento de amido de batata com micro-ondas sob potência de 800 W feito por Przetaczek-Rożnowska *et al.* (2019) mostraram que quanto maior a potência do tratamento de micro-ondas, maior é o impacto causado à estrutura do amido.

A Figura 18 apresenta as micrografias das amostras que passaram pelo tratamento com água. As imagens mostram que houve uma modificação da estrutura em ambas as amostras. A amostra sem irradiação perdeu as formas bem definidas esféricas e ovaladas dos grânulos de amido presentes no filme, enquanto a amostra irradiada por micro-ondas se tornou ainda mais homogênea. Assim, pode-se concluir que a presença de umidade relativa ao contato com água influenciou na destruição dos grânulos (Tao *et al.*, 2020) e desse modo, promoveu uma perda de massa do biopolímero.

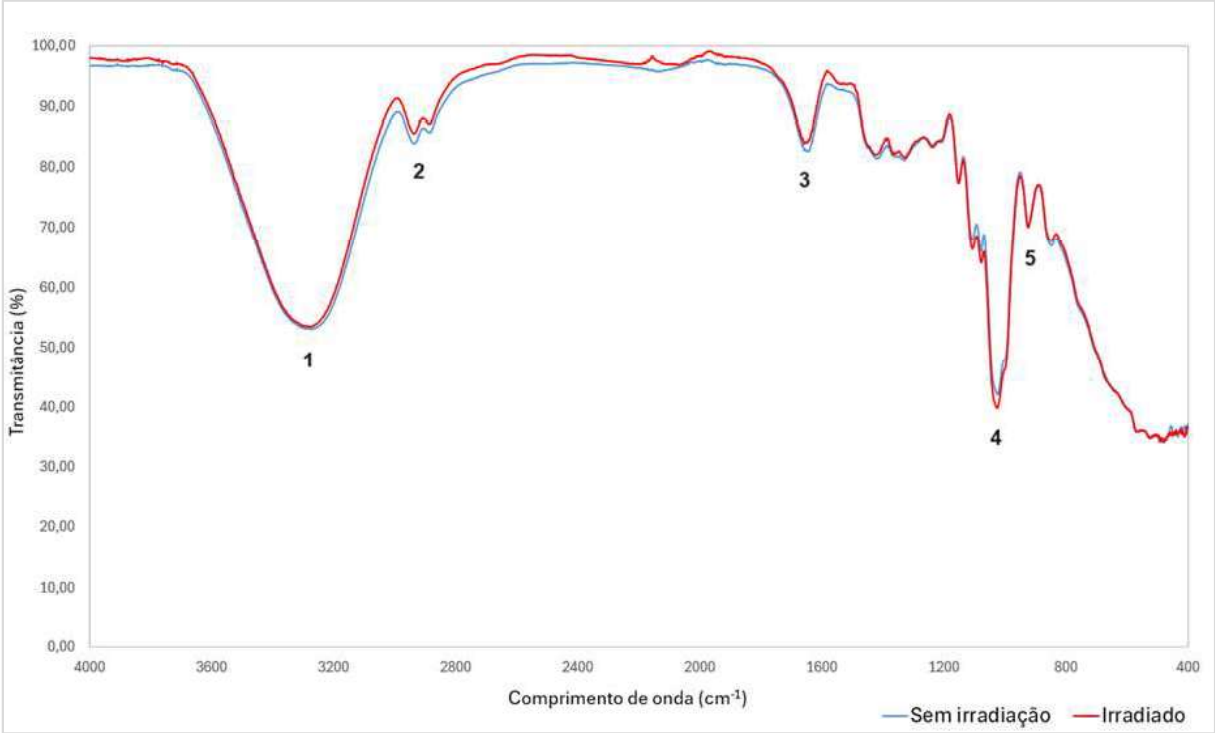
Figura 18. Micrografias do biopolímero de amido de batata inglesa após tratamento com água: Sem irradiação (A) e irradiado com micro-ondas (B).



Fonte: Autora (2024).

Os espectros obtidos na análise de FTIR, para a amostra sem irradiação e a amostra irradiada em micro-ondas, foram compilados em um único gráfico (Figura 19) a fim de facilitar a visualização de possíveis alterações de picos ou deslocamentos promovidos pelo tratamento com micro-ondas. Os fragmentos identificados estão dispostos na Tabela 3.

Figura 19. Comparação dos espectros de infravermelho por Transformada de Fourier do biopolímero, de amido de batata inglesa, antes e após passar pelo tratamento com micro-ondas.



Fonte: Autora (2024).

Tabela 3. Principais fragmentos identificados no FTIR.

	Região (cm ⁻¹)	Identificação do fragmento	Literatura
1	3500-3000	Estiramento O-H	Kumar <i>et al.</i> (2020); Nascimento (2021); Luchese (2018).
2	2947-2881	Estiramento C-H	Warren, Gidley & Flanagan (2016); Luchese (2018); Romeira (2019).
3	1634	Vibração de grupos -OH de água presente no amido	Nascimento (2021); Kaul <i>et al.</i> (2023); Luchese (2018).
4	1022	Estiramento C-O em ligações C-O-H	Romeira (2019); Warren, Gidley & Flanagan (2016).
5	921	Estiramento C-O em ligações C-O-C	Romeira (2019); Nascimento (2021)

Fonte: Autora (2024).

Romeira (2019) comparou o espectro de um biopolímero formado por amido, ácido acético e glicerol com os espectros de cada um desses componentes separado e concluiu que o a associação das três substâncias em água reúne os picos característicos de cada uma delas. Conforme levantado por Tao *et al.* (2020) o aquecimento por micro-ondas de uma composição contendo amido pode ter causado uma redução na intensidade da vibração do C–H na cadeia

de anéis de glicose perto da temperatura de gelatinização, mas não apresentou significância na intensidade de vibração de ligações glicosídicas e anéis piranoides, por exemplo.

Observou-se picos na região de $1700\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$, provavelmente decorrentes de componentes menores (proteína, lipídio) no amido, bem como os picos de estiramento C-H em aproximadamente 2900 cm^{-1} (Warren; Gidley; Flanagan, 2016; Luchese, 2018; Romeira, 2019). Luchese (2018) alega que a absorção na região próxima a 1640 cm^{-1} é uma banda típica correspondente ao amido e seus derivados, relacionada à água fortemente ligada. Kaul *et al.* (2023) e Nascimento (2021) corroboram. Já a banda larga apresentada na região de $3500\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$ está associada ao estiramento de hidroxilas (-OH) de glicose, glicerol e água (Kumar *et al.* 2020; Luchese, 2018). Segundo Romeira (2019), as bandas entre 800 cm^{-1} e 1200 cm^{-1} no amido está relacionada com a estrutura polissacarídica.

De acordo com Cai *et al.* (2024), a técnica de espectroscopia de infravermelho permite analisar o amido estruturalmente, como ordem de dupla hélice e conformação da cadeia; deste modo, os autores relacionam os picos de absorbância em torno de 995 cm^{-1} e 1047 cm^{-1} às regiões ordenadas, enquanto o pico em torno de 1022 cm^{-1} está relacionado à fase amorfa. Warren, Gidley e Flanagan (2016) afirmam que a banda em 1022 cm^{-1} aumenta em amostras mais amorfas. De modo geral, a partir dos espectros obtidos, pode-se notar que o biopolímero irradiado apresentou suaves variações na intensidade dos picos, em comparação ao não exposto às micro-ondas. A observação de maior absorbância na região de 1022 cm^{-1} significa que houve alteração morfológica na estrutura amilácea presente no filme, em concordância com os resultados da análise de MEV.

6 CONCLUSÕES

O gerenciamento de resíduos é um grande desafio enfrentado globalmente, sendo crucial para determinar as perspectivas de saúde humana, o futuro do meio ambiente e a disponibilidade de fontes de matéria-prima que podem se tornar escassas. Neste sentido, a substituição de materiais poliméricos convencionais por biopolímeros mostrou ser uma alternativa sustentável viável para atenuar os impactos causado ao meio ambiente. O presente trabalho foi bem-sucedido em mostrar que um biopolímero de amido de batata inglesa plastificado com glicerol, embora já tenha sido exaustivamente estudado, pode ser aprimorado ao ser submetido ao tratamento com irradiação de micro-ondas. Esta pesquisa é uma importante aliada à gestão de resíduos sólidos, visto que a produção do material reduz a poluição plástica e o descarte inadequado de resíduos de batata durante o processamento industrial.

De modo geral, os objetivos de avaliação pretendidos pelo projeto foram atendidos, com exceção do estudo de aplicação do biopolímero na moldagem de recipientes para plantio com simultâneo uso como uma fonte de nutrientes para o solo, que mostrou resultados insatisfatórios na germinação estudada. No entanto, as análises efetuadas para caracterização do material e da sua degradação foram promissoras. O bioplástico apresentou boa degradabilidade por microrganismos e pela ação da água. A perda de massa por um fluxo de água ser menor após o tratamento com micro-ondas foi um bom indicativo de que o material aumenta sua resistência com a irradiação, e continua se mantendo biodegradável. Foi possível demonstrar efetivamente os efeitos da irradiação sobre a estrutura morfológica do biopolímero, o tornando um filme mais resistente à degradação física e menos quebradiço, tendo sido observada uma aparente melhoria na rigidez do material.

Houve mudanças visuais no aspecto do filme, além de uma maior remoção de umidade presente, reduzindo a textura pegajosa. As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura e os espectros de infravermelho atestaram as modificações na estrutura do amido do biopolímero. Morfologicamente, os grânulos de amido se deformaram, agregaram e perderam sua integridade. O amido modificado, devido seu caráter amorfo obtido pela alta potência do micro-ondas, tem maior grau de compatibilidade com vários materiais em comparação com sua contraparte de amido natural, o que permite a confecção de um material com mais qualidade. Portanto, os resultados são favoráveis aos objetivos deste estudo.

Conforme observado, o tratamento por micro-ondas altera de fato algumas propriedades do amido que precisam ser analisadas com mais profundidade em pesquisas

futuras para descobrir meios de regular e manipular essa técnica para que os polímeros biodegradáveis produzidos sejam aplicáveis à indústria de forma efetiva e vantajosa.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021. **Abrelpe**, São Paulo/SP. Disponível em: <<https://abespb.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama-2021-ABRELPE.pdf>>. Acesso em: 06/08/2024
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. **Abrelpe**, São Paulo/SP. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>>. Acesso em: 14/05/2024.
- AGUIAR, E. S. de.; RIBEIRO, M. M.; VIANA, J. H.; PONTES, A. N. (2021). Panorama da disposição de resíduos sólidos urbanos e sua relação com os impactos socioambientais em estados da Amazônia brasileira. *Urbe. Revista Brasileira De Gestão Urbana*, 13, e20190263. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20190263>
- ALI, S. S.; ABDELKARIM, E. A.; ELSAMAHY, T.; AL-TOHAMY, R.; LI, F.; KORNAROS, M.; ZUORRO, A.; ZHU, D.; SUN, J. (2023). Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review. **Environmental Science and Ecotechnology**. Vol. 15, 100254, ISSN 2666-4984, <https://doi.org/10.1016/j.esec.2023.100254>.
- ALI, Z.; ABDULLAH, M.; YASIN, M. T.; AMANAT, K.; AHMAD, K.; AHMED, I.; QAISRANI, M. M.; KHAN, J. Organic waste-to-bioplastics: Conversion with eco-friendly technologies and approaches for sustainable environment. **Environmental Research**, Volume 244, 2024, 117949, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117949>
- AMAYA, J. Estudio de la dosificación del almidón extraído del banano en un polímero de tipo termoplástico. 2019. *Revista Colombiana de Química*, v. 48, p. 43-51. DOI: 10.15446/rev.colomb.quim.v48n1.74469.
- ARAÚJO, B. A.; FREITAS, L. S. de; SARMENTO, K. K. F.; BEZERRA, V. R.; LIMA, C. A. P. de; MEDEIROS, K. M. de. The application of biodegradable polymers as a sustainable alternative. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 9, p. e49010918248, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i9.18248. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18248>>. Acesso em: 23/05/2024
- BEATRIZ, A.; ARAÚJO, Y. J. K.; LIMA, D. P. de. (2011). Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas. **Química Nova**, 34(2), 306–319. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000200025>
- BEN, Z. Y.; SAMSUDIN, H.; YHAYA, M. F. Glycerol: Its properties, polymer synthesis, and applications in starch based films. **European Polymer Journal**, v. 175, 2022, 111377, ISSN 0014-3057, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111377>.
- BORAH, P. P.; DAS, P.; BADWAIK, L. S. Ultrasound treated potato peel and sweet lime pomace based biopolymer film development. **Ultrasonics Sonochemistry**, Volume 36, 2017, Pages 11-19, ISSN 1350-4177, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.11.010>
- BRASIL. Lei Federal nº 12.305. **Diário Oficial da União**, 2 de ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em:

05/05/2024

BRESSANIN, H. R. Bioplásticos a partir de amidos (2010). 56 f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)** – Curso de Química Industrial, Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, São Paulo, 2010.

BRUHN, N. C. P.; VIGLIONI, M. T. D; NUNES, R. F.; CALEGARIO, C. L. L. Recyclable waste in Brazilian municipalities: A spatial-temporal analysis before and after the national policy on solid waste. **Journal of Cleaner Production**, Volume 421, 2023, 138503, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138503>

CAI, Mengdi; ZHANG, Yu; CAO, Hongwei; LI, Sen; ZHANG, Ying; HUANG, Kai; SONG, Hongdong; GUAN, Xiao. Exploring the remarkable effects of microwave treatment on starch modification: From structural evolution to changed physicochemical and digestive properties. **Carbohydrate Polymers**, 2024, 122412, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122412>.

CHIEN, C.; AVISO, K.; TSENG, M.; FUJII, M.; LIM, M. K. Solid waste management in emerging economies: opportunities and challenges for reuse and recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, Volume 188, 2023, 106635, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106635>

CONCEIÇÃO, M. M.; CONCEIÇÃO, J. T. P.; DALMAS, F. B.; ROSINI, A. M. (2019). O plástico como vilão do meio ambiente. **Revista Geociências UNG-Ser**, Guarulhos-SP, v. 18, n. 1, p. 50-53. <https://doi.org/10.33947/1981-7428-v18n1-4024>

COSENZA, J. P.; ANDRADE, E. M. de; ASSUNÇÃO, G. M. de. (2020). Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista De Gestão Ambiental E Sustentabilidade**, 9(1), e16147. <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.16147>

DALA-PAULA, B. M.; KRINGEL, D. H. (2021). Carboidratos. In: DALA-PAULA, B. M.; GOZZI, W. P.; KRINGEL, D. H.; PELOSO, E. de F.; CUSTÓDIO, F. B. Química & Bioquímica de Alimentos. **Editora Universidade Federal de Alfenas**. 1ª ed. 250 f., cap. 2, p. 31-67, ISBN 978-65-86489-32-3. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/598853>. Acesso em: 15/07/2024.

DARIE-NIȚĂ, R.N.; RÂPĂ, M. (2021). Processing of Commercially Available Bioplastics. In: Kuddus, M., Roohi (eds). Bioplásticos para o desenvolvimento sustentável. **Springer**, Cingapura. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1823-9_4

DEDAVID, A. B.; GOMES, I. C.; MACHADO. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparo de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: **EDIPUCRS**, 2007. p. 10-13.

DINTCHEVA, N. T. Overview of polymers and biopolymers degradation and stabilization towards sustainability and materials circularity. **Polymer**, 2024, 127136, ISSN 0032-3861, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127136>.

DOBRACHINSKI, G. W.; FINKLER, G. H. (2022). Produção experimental de bioplástico a partir de amido de batata. **Salão Do Conhecimento**, 8(8). Disponível em: <<https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/22240>>. Acesso em: 22/05/2024

FADLELMOULA, A.; PINHO, D.; CARVALHO, V. H.; CATARINO, S. O.; MINAS, G. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy to Analyse Human Blood over the Last 20 Years: A Review towards Lab-on-a-Chip Devices. **Micromachines**, 2022, 13(2), 187. <https://doi.org/10.3390/mi13020187>

FERREIRA, P. S.; ALMEIDA, E. L. (2022). Amido – uma abordagem acerca da composição, estrutura, propriedades, modificação e aplicação. **Capítulo de livro publicado no livro do II Congresso Brasileiro de Produção Animal e Vegetal: “Produção Animal e Vegetal: Inovações e Atualidades – Vol. 2”**. p. 892-908, <https://doi.org/10.53934/9786585062039-79>.

GHASEMLOU, M.; BARROW, C. J.; ADHIKARI, B. The future of bioplastics in food packaging: An industrial perspective. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 43, 2024, 101279, ISSN 2214-2894, <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101279>

GIZDAVIC-NIKOLAIDIS, M. R.; PUPE, J. M.; JOSE, A.; SILVA, L. P.; STANISAVLJEV, D. R.; SVIRSKIS, D.; SWIFT, S. Eco-friendly enhanced microwave synthesis of polyaniline/chitosan-AgNP composites, their physical characterisation and antibacterial properties. **Synthetic Metals**, v. 293, 2023, 117273, ISSN 0379-6779, <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2022.117273>

GONG, Y.; CHEN, X.; WU, W. Application of fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in sample preparation: Material characterization and mechanism investigation. **Advances in Sample Preparation**, Volume 11, 2024, 100122, ISSN 2772-5820, <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2024.100122>.

GOVIL, T.; SALEM, D. R.; SANI, R. K. (2021). Bioplastics Production. In: **Biomolecular Engineering Solutions for Renewable Specialty Chemicals** (eds R.N. Krishnaraj and R.K. Sani). <https://doi.org/10.1002/9781119771951.ch9>

HEINRICHS, R.; MOREIRA, A.; FIGUEIREDO, P. A. M. de.; MALAVOLTA, E. (2008). Atributos químicos do solo e produção do feijoeiro com a aplicação de calcário e manganês. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, 32(3), p. 1157–1164. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300024>

IMOISILI, P. E.; JEN, T. Synthesis and characterization of bioplastic films from potato peel starch; effect of glycerol as plasticizer. **Materials Today: Proceedings**, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.565>.

JACOBS, V.; SOUZA, F. S.; HAMM, J. B. S.; MANCILHA, F. S. Produção e caracterização de biofilmes de amido incorporados com polpa de acerola. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, 2020, 21(3), 107-119.

JEDDOU, K. B.; CHAARI, F.; MAKTOUF, S.; NOURI-ELLOUZ, O.; HELBERT, C. B.; GHORBEL, R. E. (2016). Structural, functional, and antioxidant properties of water-soluble polysaccharides from potatoes peels. **Food Chemistry**, v. 205, p. 97-105, ISSN 0308-8146, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.108>.

JHA, P. Effect of plasticizer and antimicrobial agents on functional properties of bionanocomposite films based on corn starch-chitosan for food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 160, 2020, p. 571-582, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.242>.

KARROW, M. F.; SANTOS, F. N. dos.; BIDUSKI, B.; KROLOW, A. C. R.; SILVA, F. T. da.; EL HALAL, S. L. M.; MACAGNAN, K. L.; ZAVAREZE, E. da R.; DIAS, A. R. G.; DIAZ, P. S. Natural fermentation of potato (*Solanum tuberosum* L.) starch: Effect of cultivar, amylose content, and drying method on expansion, chemical and morphological properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 261, Part 1, 2024, 129608, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129608>

KAUL, S.; KAUR, K.; KAUR, J.; MEHTA, N.; KENNEDY, J. F. Properties of potato starch as influenced by microwave, ultrasonication, alcoholic-alkali and pregelatinization treatments. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 226, 2023, p. 1341-1351, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.246>

KOWALCZUK, D.; PITUCHA, M. Application of FTIR Method for the Assessment of Immobilization of Active Substances in the Matrix of Biomedical Materials. **Materials**, 2019, 12(18), 2972. <https://doi.org/10.3390/ma12182972>

KUMAR, Y.; SINGH, L.; SHARANAGAT, V. S.; PATEL, A.; KUMAR, K. Effect of microwave treatment (low power and varying time) on potato starch: Microstructure, thermo-functional, pasting and rheological Properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 155, 2020, p. 27-35, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.174>.

LI, Y.; XU, T.; XIAO, J.; ZONG, A.; QIU, B.; JIA, M.; LIU, L.; LIU, W. Efficacy of potato resistant starch prepared by microwave-toughening treatment. **Carbohydrate Polymers**, v. 192, 2018, p. 299-307, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.076>.

LOPES, J.; GONÇALVES, I.; NUNES, C.; TEIXEIRA, B.; MENDES, R.; FERREIRA, P.; COIMBRA, M. A. Potato peel phenolics as additives for developing active starch-based films with potential to pack smoked fish fillets. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 28, 2021, 100644, ISSN 2214-2894, <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100644>.

LUCHESI, C. L. Desenvolvimento de embalagens biodegradáveis a partir de amido contendo subprodutos provenientes do processamento de alimentos (2018). **Tese de Doutorado em Engenharia Química pela UFRGS**. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/178251>>. Acesso em: 18/05/2024

MA, S.; FAN, D.; WANG, L.; LIAN, H.; ZHAO, J.; ZHANG, H.; CHEN, W. (2015). The impact of microwave heating on the granule state and thermal properties of potato starch. **Starch**, v. 67, p. 391-398. <https://doi.org/10.1002/star.201400154>

MEDEIROS, A. M. de. Biodegradação de filmes Poliméricos de Ágar em água doce. 2023. 50f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos)** – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/8350>>. Acesso: 07/09/2024

MEGILL, C.; SHAW, K.; KNAUER, K.; SEELEY, M.; LYNCH, J. Plastic additives in the ocean: Use of a comprehensive dataset for meta-analysis and method development. **Chemosphere**, v. 358, 2024, 142172, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142172>

NANDA, S.; PATRA, B. R.; PATEL, R.; BAKOS, J.; DALAI, A. K. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review. *Environmental Chemistry Letters*, vol. 20, p. 379–395. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01334-4>

NASCIMENTO, N. M. do. Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis de araruta com própolis vermelha de Alagoas. 2022. 65 f. **Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais)** – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/8688>>. Acesso em: 15/07/2024

OLIVEIRA, E. A. de; CIDADE, E. B.; OLIVEIRA, K. da S. Estudos dos aditivos aplicados aos biopolímeros a partir do amido (2022). 41f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Química)**. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Escola Técnica Estadual - ETEC Trajano Camargo, Limeira. Disponível em: <<http://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/10869>>. Acesso em: 08/09/2024

OLIVEIRA, U. R. de.; NETO, L. A.; ABREU, P. A. F.; FERNANDES, V. A. Risk management applied to the reverse logistics of solid waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 296, 2021, 126517, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126517>

ONU - Organização das Nações Unidas. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 15 dez. 2015. **Nações Unidas Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 17/05/2024

OUYANG, H.; JIN, D.; HE, Y.; TANG, K.; GUO, X. LIN, Y.; CHENG, F. ZHU, P.; WU, D., ZHANG, K. Effect of branched 1,4-butanediol citrate oligomers with different molecular weights on toughness and aging resistance of glycerol plasticized starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 268, Part 1, 2024, 131603, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131603>.

OYEYINKA, S. A.; AKINTAYO, O. A.; ADEBO, O. A.; KAYITESI, E.; NJOBEH, P. B. A review on the physicochemical properties of starches modified by microwave alone and in combination with other methods. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 176, 2021, p. 87-95, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.066>

PATHAK, P. D.; MANDAVGANE, S. A.; PURANIK, N. M.; JAMBHULKAR, S. J.; KULKARNI, B. D. (2017). Valorization of potato peel: a biorefinery approach. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(2), 218–230. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1331337>

PICANÇO, A. P. 10 anos da Política Nacional de Resíduos Sólidos: análise jurídica da

eficácia dos instrumentos existentes na lei. 39f. **Artigo (Graduação) Curso de Direito**, Universidade Federal do Tocantins, Palmas-TO, 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11612/3382>>. Acesso em: 11/05/2024

PRZETACZEK-ROŻNOWSKA, I; FORTUNA, T.; WODNIAK, M.; ŁABANOWSKA, M.; PAJAŁ, P.; KRÓLIKOWSKA, K. Properties of potato starch treated with microwave radiation and enriched with mineral additives. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 124, 2019, p. 229-234, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.153>.

REIS, L. C. B.; BARCELLOS, A. D.; MACHADO, B. S.; DRUZIAN, J. I. Filme biodegradável incorporado com glicerol e aditivos naturais. **Cadernos de Prospecção**, v. 4, n.4, p.23-32. 2011. ISSN 1983-1358 (print) 2317-0026 (online). <http://dx.doi.org/10.9771/S.CPROSP.2011.004.003>

ROMÁN-HIDALGO, C.; BARREIROS, L.; VILLAR-NAVARRO, M.; LÓPEZ-PÉREZ, G.; MARTIN-VALERO, M. J.; SEGUNDO, M. A. Electromembrane extraction based on biodegradable materials: Biopolymers as sustainable alternatives to plastics. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 162, 2023, 117048, ISSN 0165-9936, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117048>

ROMEIRA, K. M. Desenvolvimento e caracterização de bioplástico obtido a partir do amido residual proveniente da industrialização de batata frita. 2019. **Tese de Mestrado - Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos**. Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP, Araraquara, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/191222>>. Acesso em: 16/07/2024

RONKO, L.; TRAVALINI, A.; DEMIATE, I. (2020). Amido e bagaço de mandioca (*Manihot esculenta* C.): obtenção e caracterização de diferentes variedades. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**. V. 14, n.1, : p. 2962-2982, DOI: 10.3895/rbta.v1n1.10799.

ROSA, D. dos S.; SILVEIRA, A. de F.; MADALENO, E.; TAVARES, M. I. B. Estudo do efeito da incorporação de plastificante de fonte renovável em compostos de PVC. **Polímeros [online]**. 2013, v. 23, n. 4, pp. 570-581. Disponível em: <<https://doi.org/10.4322/polimeros.2013.090>>. ISSN 1678-5169. Acesso em: 18/05/2024

SIDDIQUI, S. A; YANG, X.; DESHMUKH, R. K.; GAIKWAD, K. K.; BAHMID, N. A.; CASTRO-MUNÓZ, R. Recent advances in reinforced bioplastics for food packaging – A critical review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 263, Part 2, 2024, 130399, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130399>

SILVA, M. H. C. da.; LIMA, L. N. F. de; SILVA, C. S. e; SILVA, B. V. da.; TAVARES, H. S. de A.; FALCÃO, W. H. da R.; SOUSA, M. L. P. S.; LIMA, S. C. (2020). Resíduos sólidos: o uso da gestão ambiental como ferramenta para o manejo adequado do lixo urbano / Solid waste: the use of environmental management as a tool for the proper management of urban waste. **Brazilian Journal of Development**, 6(11), 85668–85677. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-113>

SILVA, R.; MIYASHIRO, S. (2023). Poluição Plástica: o custo real para países de baixa renda é até 10 vezes maior. **EcoDebate**. Disponível em:

<<https://www.ecodebate.com.br/2023/11/08/poluicao-plastica-o-custo-real-para-paises-de-baixa-renda-e-ate-10-vezes-maior/>>. Acesso em: 14/05/2023

SOUZA, M. V. de C.; DOS SANTOS JÚNIOR, J. R.; SILVA, R. B. da.; SANTOS, L. P. M. dos.; ANDRADE, I. L. X. C.; FREIRE, S. de O.; MELO, S. M. (2023). Desempenho físico-químico, térmico e mecânico de biopolímero à base do amido do mesocarpo do coco babaçu. **Research, Society and Development**. v. 12, n. 7, e12612742604. ISSN 2525-3409, <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i7.42604>

TAO, Y; YAN, B.; FAN, D.; ZHANG, N.; MA, S.; WANG, L.; WU, Y.; WANG, M. ZHAO, J.; ZHANG, H. Structural changes of starch subjected to microwave heating: A review from the perspective of dielectric properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 99, 2020, p. 593-607, ISSN 0924-2244, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.020>

TELLES, Dirceu D'Alkmin. Resíduos sólidos: gestão responsável e sustentável. São Paulo: **Editora Blucher**, 2022. 1ª ed.

UNEP - United Nations Environment Programme (2024). **Global Waste Management Outlook 2024**: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource. Nairobi. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>>. Acesso em: 08/05/2024

VITTI, M. C. D.; PRECZENHAK, A. P.; CALABONI, C.; Kluge, R. A. (2019). Atividade enzimática e conteúdo fenólico em batatas minimamente processadas influenciados pela aplicação de antioxidantes. **Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha**, v. 20, n. 1, p. 102-11. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81359562010>>. Acesso em: 07/09/2024

WARREN, F. J.; GIDLEY, M. J.; FLANAGAN, B. M. Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure—a joint FTIR–ATR, NMR, XRD and DSC study. **Carbohydrate Polymers**, v. 139, 2016, p. 35-42, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.066>.

WESTLAKE, J.; TRAN, M.; JIANG, Y.; ZHANG, X.; BURROWS, A.; XIE, M. (2022). Biodegradable biopolymers for active packaging: demand, development and directions. **Sustainable Food Technology**. Vol. 1, p. 50-72, <https://doi.org/10.1039/D2FB00004K>

YILMAZ, A.; TUGRUL, N. Effect of ultrasound-microwave and microwave-ultrasound treatment on physicochemical properties of corn starch. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 98, 2023, 106516, ISSN 1350-4177, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106516>

ZAGO, V. C. P.; BARROS, R. T. de V. (2019). Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 24(2), p. 219–228. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019181376>

ZHAO, Y.; TU, D.; WANG, D.; XU, J.; ZHUANG, W.; WU, F.; TIAN, Y. Structural and property changes of starch derivatives under microwave field: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 256, Part 2, 2024, 128465, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128465>