



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Maria Eduarda Martins Duarte da Costa

**Desenvolvimento de embalagem biodegradável com potencial bioativo à base de
amido de mandioca**

Campina Grande - PB

2024

Maria Eduarda Martins Duarte da Costa

**Desenvolvimento de embalagem biodegradável com potencial bioativo à base de
amido de mandioca**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Alimentos como requisito à obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Alimentos

Orientadores: Profa. Dra. Ana Paula Trindade Rocha

Dr. Newton Carlos Santos

Campina Grande - PB

2024

C837d Costa, Maria Eduarda Martins Duarte da.
Desenvolvimento de embalagem biodegradável com potencial bioativo à base de amido de mandioca / Maria Eduarda Martins Duarte da Costa. – Campina Grande, 2025.
72 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.
"Orientação: Profa. Dra. Ana Paula Trindade Rocha, Dr. Newton Carlos Santos".

Referências.

1. Mandioca – Córtex da Raiz. 2. Filme Biodegradável. 3. Biodegradabilidade. 4. Embalagem para Alimento. 5. Potencial Antioxidante. 6. Teste de Migração. I. Rocha, Ana Paula Trindade. II. Santos, Newton Carlos. III. Título.

CDU 633.68(043.3)

Maria Eduarda Martins Duarte da Costa

**Desenvolvimento de embalagem biodegradável com potencial bioativo à base de
amido de mandioca**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Alimentos como requisito à obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Alimentos

Aprovado em: 12/12/2024

Profa. Dra. Ana Paula Trindade Rocha
Universidade Federal de Campina Grande

Dr. Newton Carlos Santos
Universidade Federal de Campina Grande

Dra. Deyzi Santos Gouveia
Universidade Federal de Campina Grande

Dra. Thais Jaciane Araújo Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS, REALIZADA EM 12 DE DEZEMBRO DE 2024.

Aos 12 dias do mês de DEZEMBRO de 2024 às 08:30 horas, em sessão pública no Bloco de Engenharia de Alimentos - LEA, na presença da Banca Examinadora presidida pela professora **Dr^a. Ana Paula Trindade Rocha (Orientadora)**, **Matricula/SIAPE nº 2503922**, o professor **Dr. Newton Carlos Santos (Coorientador)**, a professora **Dr^a. Deyzi Santos Gouveia (Avaliador-Membro Interno)** - **Matricula/SIAPE nº 1805305**, a **Dra. Thais Jaciane Araujo Rodrigues (Avaliadora-Membro Externo)** a aluna **Maria Eduarda Martins Duarte da Costa**, **Mat. 223173020021**, apresentou a Defesa Da Dissertação, intitulado "**Desenvolvimento de embalagem biodegradável com potencial bioativo à base de amido de mandioca**", como requisito curricular indispensável para a integralização do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos. Após reunião em sessão reservada, a Banca Examinadora deliberou e decidiu pela **APROVAÇÃO** do referido trabalho, divulgando o resultado formalmente a aluna e demais presentes e eu, na qualidade de Presidente da Banca, lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos demais examinadores e pela aluna.



Documento assinado eletronicamente por **ANA PAULA TRINDADE ROCHA, COORDENADOR(A)**, em 24/02/2025, às 14:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **DEYZI SANTOS GOUVEIA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/02/2025, às 14:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Newton Carlos Santos, Usuário Externo**, em 24/02/2025, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **THAIS JACIANE ARAUJO RODRIGUES, Usuário Externo**, em 24/02/2025, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5260052** e o código CRC **DC3510D7**.

Referência: Processo nº 23096.086263/2024-67

SEI nº 5260052

Dedico esse trabalho a minha mãe e meu pai, que são os amores da minha vida e os melhores pais que Deus poderia me dar. Também a minha avó Marlene (*in memorian*) e meu avô Duarte (*in memorian*), que sei que de onde estiverem sentirão essa vitória como se fossem deles.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, pelas oportunidades e pelas pessoas que ele colocou em minha vida. Sem ele nada disso seria possível. Os caminhos nem sempre são fáceis, mas através da força e das bênçãos de Deus sei que é possível chegar aos meus objetivos. Foi através dele que foi possível concluir o mestrado.

Agradeço à minha família, que sempre me apoiou em tudo, sempre me deu suporte em todas as etapas da minha vida, e principalmente durante o mestrado. À minha mãe, meu profundo agradecimento pelo exemplo de força, inteligência e determinação. Ao meu pai, meus sinceros agradecimentos pela paciência, pelo exemplo de fé e por todo suporte durante a trajetória do mestrado. Agradeço imensamente às pessoas que mais sinto saudade: minha avó Marlene e meu avô Duarte, todos os dias sinto vocês em meu coração e tenho certeza que se estivessem aqui, estariam comemorando essa vitória junto a mim. Agradeço a minha tia Elita e às minhas primas, por todo o carinho e apoio durante minha trajetória acadêmica.

Minha eterna gratidão à professora Ana Paula por todos os direcionamentos, por toda ajuda e por toda alegria que ela traz dentro si. Muito obrigada ao meu coorientador, professor Newton Carlos, que me ajudou durante esse mestrado, e se fez presente em muitos momentos em que me vi diante de obstáculos. Agradeço a professora Deyzi e a Thais pelas valiosas contribuições durante o decorrer do mestrado e por participarem da banca. Agradeço também às técnicas de laboratório Leila e Renata por toda paciência, suporte e amizade.

Ao meu namorado, agradeço por todo apoio, momentos de descontração, carinho e por me ajudar sempre com palavras de ânimo e suporte emocional. Aos amigos que mesmo de longe se fizeram presentes durante essa etapa da minha vida e que, sem dúvida, tornaram tudo mais leve. Aos meus companheiros de laboratório, que se tornaram amigos durante o processo, muito obrigada por dividirem a rotina comigo, podem ter certeza que vocês me ajudaram muito com todas as conversas, ajudas e momentos de descontração.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente me ajudaram durante o meu mestrado.

RESUMO

O impacto ambiental gerado pelo descarte indevido de embalagens a base de polímeros sintéticos propicia os estudos para o desenvolvimento de embalagens a partir de polímeros biodegradáveis. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar filmes biodegradáveis com potencial bioativo, produzidos com amido de mandioca, glicerol contendo diferentes quantidades de extrato de córtex de mandioca. Os filmes foram produzidos por casting. O amido (2,1g) e a água (100ml) foram misturados e submetidos a aquecimento para a gelatinização do amido, em seguida foi colocado o glicerol e incorporado ao amido gelatinizado. Posteriormente, a solução foi colocada em formas de silicone e submetidas à secagem em estufa com circulação de ar, na temperatura de 35°C por 24h. Os filmes foram caracterizados quanto as suas propriedades físicas (teor de água, solubilidade, permeabilidade ao vapor de água, cor e espessura), físico-químicas (compostos fenólicos totais e atividade antioxidante), mecânicas (módulo de Young, alongamento na ruptura e resistência a tração), morfológicas (MEV superficial e transversal, estruturais (FT-IR), funcionais (teste de migração) e quanto a biodegradabilidade. A quantidade de compostos fenólicos nos filmes e aumentou de 61,30 mg EAG/100g para 187,03 mg EAG/100g, conforme houve aumento da quantidade de extrato. A atividade antioxidante dos filmes pelo método FRAP aumentou de 1,42 para 19,62 mmol Fe²⁺/kg, de 4,53 para 12,91 mmol Trolox/kg pelo método ABTS e de 3,05 para 4,95 mmol Trolox/kg pelo método DPPH. As propriedades físicas de teor de água, espessura, solubilidade, permeabilidade a vapor de água e cor foram influenciadas pelo aumento da quantidade de extrato na composição dos filmes. O módulo de Young e o alongamento na ruptura também tiveram influência da quantidade de extrato. O teste de migração foi feito utilizando três simuladores (água, ácido acético e álcool) e em duas temperaturas (28°C e 4°C). Os filmes apresentaram comportamento de migração de compostos fenólicos diferentes nos três simuladores utilizados (meio aquoso, meio ácido e meio alcóolico) e foi constatada influência da temperatura na migração dos compostos fenólicos. Os filmes apresentaram perda de massa no decorrer das seis semanas analisadas, embora não tenha sido tempo suficiente para a sua completa biodegradação. Assim, foi constatado que os filmes de amido de mandioca com adição de extrato do córtex da mandioca são boas opções para a substituição das embalagens convencionais feitas de materiais de fontes não renováveis.

Palavras-chave: Biodegradabilidade, C3rteX da raiz de mandioca, embalagem para alimentos, potencial antioxidante, teste de migra33o.

ABSTRACT

The environmental impact generated by the improper disposal of packaging based on synthetic polymers encourages studies for the development of packaging from biodegradable polymers. The present work aims to develop and characterize biodegradable films with bioactive potential, produced with cassava starch, glycerol containing different amounts of cassava cortex extract. The films were produced by casting. The starch (2.1 g) and water (100 ml) were mixed and subjected to heating for starch gelatinization, then the glycerol was added and incorporated into the gelatinized starch. Subsequently, the solution was placed in silicone molds and subjected to drying in an oven with air circulation, at a temperature of 35°C for 24h. The films were characterized according to their physical properties (water content, solubility, water vapor permeability, color and thickness), physicochemical properties (total phenolic compounds and antioxidant activity), mechanical properties (Young's modulus, elongation at break and tensile strength), morphological properties (surface and cross-sectional SEM, structural properties (FT-IR), functional properties (migration test) and biodegradability. The amount of phenolic compounds in the films increased from 61.30 mg EAG/100g to 187.03 mg EAG/100g, as the amount of extract increased. The antioxidant activity of the films by the FRAP method increased from 1.42 to 19.62 mmol Fe²⁺/kg, from 4.53 to 12.91 mmol Trolox/kg by the ABTS method and from 3.05 to 4.95 mmol Trolox/kg by the DPPH method. Thickness, solubility, water vapor permeability and color were influenced by the increase in the amount of extract in the composition of the films. The Young's modulus and elongations at break were also influenced by the amount of extract. The migration test was performed using three simulants (water, acetic acid and alcohol) and at two temperatures (28°C and 4°C). The films presented different migration behavior of phenolic compounds in the three simulants used (aqueous medium, acid medium and alcoholic medium) and an influence of temperature on the migration of phenolic compounds was observed. The films showed mass loss over the six weeks proven, although this was not enough time for their complete biodegradation. Thus, it was found that cassava starch films with the addition of cassava cortex extract are good options for replacing conventional packaging made from materials from non-renewable sources.

Keywords: Biodegradability, Cassava root cortex, food packaging, antioxidant potential, migration test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Partes da macaxeira de quatro variedade.....	23
Figura 2: Estrutura química da amilose e da amilopectina.....	26
Figura 3: Fotografias dos filmes. FC é a formulação sem extrato, F20 é a formulação com 20% de extrato, F30 é a formulação com 30% de extrato, F40 é a formulação com 40% de extrato e F50 a formulação com 50% de extrato.....	46
Figura 4: Teste de migração dos compostos fenólicos dos filmes em meio aquoso, ácido e alcóolico. a) Meio aquoso; b) Meio ácido; c) Meio alcóolico. Legenda: Barras com letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística significativa entre os filmes na mesma temperatura do teste de migração; Barras com letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística significativa entre as temperaturas do teste de migração para mesmo filme.....	49
Figura 5: Espectro infravermelho do extrato do córtex de mandioca e dos filmes.....	53
Figura 6: Micrografias dos filmes de amido de mandioca adicionados de extrato do córtex de mandioca. A) Micrografias superficiais dos filmes; B) Micrografias transversais dos filmes. FC é a formulação sem extrato, F20 é a formulação com 20% de extrato, F30 é a formulação com 30% de extrato, F40 é a formulação com 40% de extrato e F50 a formulação com 50% de extrato.....	54
Figura 7: Perda de massa dos filmes de amido de mandioca adicionados de extrato de córtex de mandioca em função do tempo.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracteriação físico-química e bioativa do córtex da mandioca.....	25
Tabela 2: Proporções de amido de mandioca, água, glicerol e extrato de córtex de mandioca nas formulações dos filmes.....	35
Tabela 2: Teor de água, amido, amilose e amilopectina do amido de mandioca utilizado para desenvolver os filmes desse estudo.	41
Tabela 3: Parâmetros físicos, teor de compostos fenólicos totais e potencial antioxidante (DPPH, ABTS e FRAP) do extrato do córtex da raiz da mandioca liofilizado.....	42
Tabela 5: Teor de água, solubilidade, permeabilidade a vapor de água, espessura, módulo de Young, alongamento na ruptura, tensão máxima e parâmetros colorimétricos dos filmes	44
Tabela 6: Compostos fenólicos totais e atividade antioxidante dos filmes.....	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Impactos do plástico no meio ambiente.....	17
3.2 Filmes biodegradáveis a base de amido.....	18
3.3 Embalagens ativas.....	20
3.4 Mandioca	22
3.4.1 Componentes bioativos do córtex da raiz da mandioca e aplicação na formação de filmes	24
3.5 Amido da mandioca	25
3.6 Aplicação de filmes biodegradáveis	28
3.7 Estado da arte.....	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1 Materiais	31
4.2 Caracterização do amido de mandioca	31
4.2.1 Teor de água.....	31
4.2.2 Teor de amido, amilose e amilopectina.....	32
4.3 Obtenção do extrato do córtex da raiz da mandioca.....	32
4.4 Caracterização do extrato do córtex da raiz da mandioca liofilizado	33
4.4.1 Teor de água.....	33
4.4.2 Análise colorimétrica	33
4.4.3 Compostos fenólicos totais	33
4.4.4 Atividade antioxidante	34
4.5 Desenvolvimento dos filmes.....	35
4.6 Caracterização dos filmes	36
4.6.1 Teor de água.....	36
4.6.2 Espessura.....	36
4.6.3 Solubilidade em água	36
4.6.4 Permeabilidade a vapor	37
4.6.5 Cor.....	37

4.6.6 Propriedades mecânicas	37
4.6.7 Compostos fenólicos totais	38
4.6.8 Atividade antioxidante	38
4.6.9 Teste de migração dos compostos fenólicos	38
4.6.10 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR)	39
4.6.11 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	39
4.6.12 Biodegradabilidade.....	39
4.7 Análise estatística	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1 Caracterização do amido de mandioca	40
5.2 Caracterização do extrato liofilizado do córtex de mandioca.....	41
5.3 Caracterização dos filmes	43
5.3.1 Caracterização física dos filmes.....	43
5.3.2 Propriedades mecânicas dos filmes.....	46
5.3.3 Compostos fenólicos totais e atividade antioxidante dos filmes.....	48
5.3.4 Teste de migração dos filmes	49
5.3.5 FT-IR dos filmes	52
5.3.6 MEV superficial e transversal dos filmes	54
5.3.7 Biodegradabilidade dos filmes	55
6. CONCLUSÕES	57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

A predominância do uso de plásticos derivados de petróleo na indústria de embalagens alimentícias, embora consolidada ao longo do tempo, tem gerado preocupações significativas relacionadas aos impactos ambientais e à saúde humana (Chang *et al.*, 2024). Esses materiais, amplamente não biodegradáveis, contribuem para o aumento do acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente, afetando ecossistemas terrestres e aquáticos. Em resposta a esses desafios, pesquisas têm explorado alternativas mais sustentáveis, como o desenvolvimento de embalagens baseadas em biopolímeros naturais e extratos obtidos de resíduos agrícolas (Kumar *et al.*, 2024). Além de reduzirem a dependência de recursos fósseis, esses materiais oferecem vantagens funcionais, incluindo propriedades antimicrobianas, barreiras melhoradas e biodegradabilidade (Santos *et al.*, 2024). A adoção dessas soluções contribui para a mitigação da crise ambiental associada aos plásticos e alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo práticas mais responsáveis e sustentáveis em escala global (Wongphan *et al.*, 2024).

O amido tem se consolidado como um dos materiais mais promissores para a indústria de embalagens alimentícias devido à sua origem renovável, ampla disponibilidade e capacidade de formar filmes comestíveis, biodegradáveis e de baixo custo (Guz & Famá, 2024). Entre os diferentes tipos de amido, o de mandioca se destaca por suas características excepcionais, como alta produtividade, versatilidade funcional, resistência mecânica e custo reduzido, tornando-o uma alternativa atraente para o desenvolvimento de soluções de embalagens sustentáveis (Ayyubi & Purbasar, 2022). O Brasil é o maior produtor de mandioca do Hemisfério Ocidental e ocupa o sexto lugar globalmente, seu cultivo abrange todo o país e é uma das culturas mais significativas socioeconomicamente, cultivada predominantemente por pequenos agricultores para consumo interno e fins industriais (Mafaldo *et al.*, 2024). O Brasil, sendo um dos maiores produtores globais de mandioca, encontra-se em uma posição estratégica para liderar o avanço dessas tecnologias, atendendo às crescentes demandas globais por inovações sustentáveis e tecnológicas no setor de embalagens (Leal *et al.*, 2019).

O processamento da mandioca gera resíduos significativos, compostos principalmente pela casca e pelo córtex, que normalmente são descartados ou utilizados como ração animal. O córtex, uma camada esbranquiçada e espessa localizada logo abaixo da fina casca marrom (periderme), representa um subproduto promissor para

aplicações de maior valor agregado (Rodrigues *et al.*, 2024). Estudos recentes conduzidos por Sarma *et al.* (2023), apontam que o córtex da mandioca é rico em compostos bioativos, incluindo antioxidantes naturais, que podem ser extraídos e incorporados em materiais de embalagem para aprimorar sua funcionalidade.

A incorporação de compostos antioxidantes naturais, derivados de resíduos vegetais, em filmes biodegradáveis representa uma abordagem inovadora e sustentável para indústria de embalagens (Osuna *et al.*, 2025). De fato, estudos anteriores conduzidos em nosso laboratório para filmes de amido de arroz com adição de extratos da casca de pitaya (Santos *et al.*, 2024) e filmes de amido de milho e quitosana, com adição de extrato da casca de caju (Lima *et al.*, 2024) sustentem essa hipótese. Esses aditivos naturais não apenas proporcionam funcionalidades ativas às embalagens, como proteção contra oxidação e prolongamento da vida útil dos alimentos, mas também oferecem vantagens significativas em relação aos aditivos sintéticos, que podem apresentar riscos à saúde humana (Yang *et al.*, 2024). Assim, o aproveitamento do córtex da mandioca como fonte de antioxidantes contribui para a criação de embalagens multifuncionais, aliando sustentabilidade ambiental ao desenvolvimento de produtos tecnologicamente avançados.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo desenvolver filmes à base de amido de mandioca e glicerol, explorando o potencial do extrato do córtex da raiz de mandioca como aditivo natural. Serão avaliados os efeitos de diferentes concentrações desse extrato nas propriedades físicas, antioxidantes, mecânicas, morfológicas, estruturais e de biodegradabilidade dos filmes, bem como sua capacidade de liberar compostos fenólicos em diferentes meios simulados, por meio de testes de migração. Ao incorporar um subproduto agrícola de alto potencial, como o córtex da mandioca, este estudo não apenas promove uma solução inovadora e sustentável para a indústria de embalagens, mas também contribui para a valorização de resíduos agroindustriais, reforçando a busca por materiais biodegradáveis e funcionalmente ativos que atendam às crescentes demandas por práticas mais responsáveis e alinhadas aos ODS.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver filmes biodegradáveis a base de amido de mandioca adicionado de extrato de córtex de mandioca e caracterizá-lo quanto às suas propriedades físico-químicas, físicas, mecânicas, morfológicas, estruturais e funcionais.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o amido de mandioca quanto ao seu teor de água, teor de amido, amilose, amilopectina e cor;
- Obter o extrato do córtex de mandioca liofilizado e caracterizar quanto ao teor de compostos fenólicos totais, atividade antioxidante, além de determinar propriedades físicas e estruturais;
- Desenvolver filmes a base de amido de mandioca, glicerol e diferentes concentrações do extrato de córtex de mandioca;
- Caracterizar os filmes desenvolvidos quanto às suas propriedades físicas, físico-químicas, mecânicas, estruturais, morfológicas e funcionais;
- Realizar o teste de migração dos compostos biotivos dos filmes em diferentes meios e temperatura de processo;
- Avaliar a biodegradabilidade dos filmes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Impactos do plástico no meio ambiente

O plástico é um material composto por polímeros, que são longas cadeias de moléculas formadas pela repetição de unidades menores chamadas de monômeros. Essas cadeias podem ser obtidas por meio de reações químicas de polimerização, geralmente utilizando derivados do petróleo ou do gás natural (Alves *et al.*, 2023). Os plásticos são amplamente utilizados devido à sua ampla disponibilidade, leveza, resistência e baixo custo, e podem ser moldados em diversas formas (Yang *et al.*, 2023; Murthy *et al.*, 2024).

Desde 1950, a produção de plásticos tem crescido exponencialmente, com projeções indicando que poderá ultrapassar 650 milhões de toneladas até 2050, pois as emissões globais de macrodetritos plásticos foram estimadas em cerca de 52,1 milhões de toneladas métricas por ano (Fayshal *et al.*, 2023; Cottom *et al.*, 2024; Ciucă *et al.*, 2024). Em virtude da sua elevada resistência à biodegradação, as embalagens plásticas descartadas de forma incorreta em locais indevidos podem permanecer cerca de 400 anos no meio ambiente, de forma que atualmente estima-se que 710 megatoneladas de plástico já tenham se acumulado no meio ambiente (Borrelle *et al.*, 2020; Kjaer; Joly, 2025).

Apesar disso, a produção de plástico continua a crescer, causando uma crise ambiental crescente. A poluição por resíduos plásticos é reconhecida globalmente como um fardo ao planeta. Estima-se que menos da metade desse vasto volume chegou a aterros sanitários ou passou por reciclagem (Murthy *et al.*, 2024).

Tais resíduos plásticos não só ocupam uma grande quantidade de espaço em aterros sanitários, mas também produzem microplásticos a partir da degradação e do intemperismo. Esses microplásticos facilitam a lixiviação do aditivo plástico e a mobilidade de resíduos plásticos e substâncias absorvidas pelos microplásticos, como metais pesados e antibióticos (Kumar *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2024). Após penetrar no solo, os plásticos podem alterar as propriedades do solo, a comunidade microbiana do solo e a atividade enzimática (Wang *et al.*, 2020; Mbachu *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2024). A poluição plástica também entra no oceano por meio do despejo aleatório de resíduos dentro ou ao redor dos vários rios ao longo da costa, descargas de águas pluviais,

transbordamentos de esgoto ou escoamentos de aterros sanitários (Pawar *et al.*, 2016; Ciucă *et al.*, 2024).

Além disso, os microplásticos ingeridos pelos animais acabam passando pela cadeia alimentar até os humanos e têm sido associados a danos no DNA, citotoxicidade, inflamação, estresse respiratório, doenças autoimunes, doenças cardiovasculares, doenças intestinais e vários tipos de câncer em vários estudos (Kumar *et al.*, 2022; Marfella *et al.*, 2024, Yan *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2024). Os resíduos plásticos dominam os continentes, poluem oceanos, permeando todos os cantos do globo e efetivamente o transformam em um "Mundo de Plástico" (Rochman *et al.*, 2013; Murthy *et al.*, 2024).

Em resposta a esse problema, o imperativo de buscar soluções ambientalmente sustentáveis para a degradação do plástico, como a biodegradação, deve ser claro (Ali *et al.*, 2021; Murthy *et al.*, 2024). Uma abordagem promissora, nesse sentido, é substituir plásticos convencionais por materiais biodegradáveis (Kjaer; Joly, 2025).

3.2 Filmes biodegradáveis a base de amido

Um dos motivos que geram interesse pela utilização de materiais sustentáveis na produção de plásticos é a minimização da geração de resíduos plásticos não biodegradáveis, aderindo assim aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) como uma política global. De acordo com a European Bioplastics, um material plástico é definido como um bioplástico se for de base biológica, biodegradável ou apresentar ambas as propriedades (EUBIO_Admin, 2024; Plaeyao *et al.*, 2024).

Para contemplar essas questões, há um interesse crescente em materiais de embalagem biodegradáveis e ecológicos. Esses materiais, incluindo polímeros à base de amido, poli-hidroxialcanoato (PHA), poli(ácido láctico) (PLA) e filmes à base de quitosana, oferecem biodegradabilidade e boas propriedades de barreira a gases, abordando os problemas associados aos plásticos tradicionais (Jayarathna *et al.*, 2022 ; Moshood *et al.*, 2022 ; Perera *et al.*, 2023; Dilkushi *et al.*, 2024).

Nas últimas décadas, houve um avanço considerável no desenvolvimento de plásticos biodegradáveis criados a partir de recursos renováveis, sobretudo os feitos de materiais à base de amido, que possuem vantagens ambientais e funcionais. O amido é uma escolha interessante para a sua produção uma vez que, é acessível, tem baixa densidade, baixa toxicidade, é facilmente obtido e tem a capacidade de formar filmes

biodegradáveis (Bergo *et al.*, 2008; Ferreira, Molina & Pelissari, 2020; Kaisangsri, Kerdchoenchuen & Laohakunjit, 2012; Gunathilake; Somendrika, 2024).

Ao contrário de outros biopolímeros, o amido é abundante, barato, biodegradável e seguro para consumo, o que o torna uma excelente escolha para a criação de filmes. Isso torna o amido uma alternativa altamente promissora para substituir plásticos à base de petróleo. Filmes e compósitos à base de amido possuem um potencial significativo como materiais ecologicamente corretos para embalagens de alimentos (Zolek-Tryznowska & Kaluza, 2021; Plaeyao *et al.*, 2021).

Entre os métodos de produção de filmes, destacam-se três, que são os mais utilizados: *Casting*, extrusão/termo compressão e moldagem por sopro. O método *casting*, é muito utilizado em laboratório em virtude das limitações do espaço e quantidade produzida (Ochoa-Yepes *et al.*, 2019; Cui *et al.*, 2021). Dentre as suas vantagens, estão a boa flexibilidade dos filmes produzidos por este método e a alta transparência. De forma geral, a produção de filmes pelo método de *Casting* consiste em três etapas: Primeiro, adiciona-se o amido à água e essa solução é submetida a aquecimento para gelatinizar o amido enquanto se adiciona o plastificante, em seguida, a solução de amido gelatinizado é transferida para um molde, comumente se utilizam placas de petri ou formas de silicone como molde. A terceira e última etapa é a secagem da solução filmogênica para obtenção do filme à base de amido (Cui *et al.*, 2021). Um fator interessante a se observar é a quantidade de amido colocada na formulação do filme, pois quantidades acima de 10% não são adequadas pois os filmes apresentam baixa fluidez (Cui *et al.*, 2021).

O método de extrusão/termo moldagem, é muito usado para produzir materiais plásticos devido ao seu rápido aumento de temperatura e fácil operação. No preparo de filmes à base de amido por extrusão/prensagem a quente, o amido e o plastificante são misturados uniformemente, extrudados e então termo formados para obter os filmes. Esse método apresenta como vantagem a facilidade da operação e a rapidez com que os filmes são produzidos (Cui *et al.*, 2021). Porém, a extrusão é feita em temperaturas altas (90-130°C), limitando o uso de componentes bioativos, que são sensíveis a altas temperaturas (Chen *et al.*, 2019).

O método de produção de filmes conhecido como moldagem por sopro, requer o uso de uma extrusora de dupla rosca para fazer os pellets do amido e os aditivos e, também uma extrusora de filme soprado de rosca única para preparar filmes à base de amido. Nos últimos anos, o uso desse método para preparar filmes à base de amido recebeu ampla

atenção. Para obter esses filmes os plastificantes e biopolímeros, que podem ser amidos de diferentes fontes, devem ser adicionados. Os filmes a base de amido produzidos pelo método de moldagem por sopro e extrusão têm boas propriedades mecânicas, mas a transparência dos filmes é baixa, limitando sua aplicação como material de embalagem transparente para alimentos (Cui *et al.*, 2021).

No entanto, ainda que diferentes métodos influenciem nas propriedades dos filmes, de forma geral, o plástico biodegradável de amido tem baixa resistência mecânica e é sensível à umidade (Gómez-Guillén *et al.*, 2009; Plaeyao *et al.*, 2021). Para solucionar esse problema, a adição de plastificantes na formulação dos filmes, pode conferir a ele melhores propriedades físicas e mecânicas. O glicerol, por exemplo, é um plastificante biodegradável compatível com filmes de amido uma vez que aumenta as interações com o amido por meio de ligações de hidrogênio (Cervera *et al.*, 2004; H Liu *et al.*, 2013).

Nesse sentido, o amido de mandioca possui excelentes vantagens em sua utilização como base para filmes, dentre elas, a sua capacidade de formar filmes, transparência, biodegradabilidade e não toxicidade (Hernandez-García; Vargas; Chiralt *et al.*, 2021). As propriedades dos filmes à base de amido de mandioca dependem de vários parâmetros, como a origem do amido, a quantidade de amido, o teor de amilose e amilopectina, a cristalinidade, o tipo de plastificante e as condições de armazenamento, como a umidade relativa (Belibi *et al.*, 2014). O teor de amilose é um importante parâmetro, pois pode influenciar as propriedades de formação de filme. Os amidos com alto teor de amilose podem produzir filmes com morfologias mais homogêneas e maior resistência mecânica (Vanier *et al.*, 2019).

3.3 Embalagens ativas

As embalagens ativas são uma inovação no setor de embalagens, além de um campo promissor nas pesquisas. As embalagens ativas são projetadas para interagir com o produto embalado e melhorar sua qualidade, segurança e/ou prolongar sua vida útil. Diferentemente das embalagens convencionais, que apenas protegem o produto contra fatores externos, as embalagens ativas possuem funcionalidades adicionais, como atividade antimicrobiana e atividade antioxidante. Essas embalagens podem absorver ou liberar substâncias para manter as condições ideais do produto (Sahraeian; Abdollahi; Rashidinejad, 2024).

Os alimentos são produtos de alta vulnerabilidade à deterioração microbiológica e bioquímica. Diversos são os fatores externos que favorecem a sua deterioração, e dentre eles a luz, vapor de água e oxigênio são os principais. Por esse motivo, várias técnicas de conservação de alimentos por meio de tecnologias de filmes de barreiras estão sendo desenvolvidas, sendo a tecnologia de embalagem o método de preservação apropriado para aumentar a vida útil desses produtos (Bhardwaj; Alam; Talwar, 2019).

Normalmente, os materiais usados na produção de embalagens são pensados com o intuito de terem a menor interação com o produto que armazenam. Sendo assim, as embalagens atuam como barreiras inertes, com a função de proteger o produto embalado, sem interagir com ele (Santana *et al.*, 2013). Todavia, novas linhas de pesquisa têm sido exploradas com o objetivo de desenvolver embalagens que interajam com o produto acondicionado, adicionando uma vantagem para estes. Algumas dessas embalagens ativas têm sido desenvolvidas a partir de matérias-primas naturais e renováveis, tanto a matriz polimérica como os aditivos funcionais incorporados, apresentando assim o caráter da biodegradabilidade (Machado, 2011; Santana *et al.*, 2013).

Compostos bioativos que ocorrem na natureza são substâncias que fornecem benefícios nutricionais e que possuem efeitos comprovados em processos biológicos dentro do corpo. Peptídeos bioativos, óleos essenciais, polifenóis, carotenoides, esteróis e vitaminas são comprovadamente exemplos de compostos bioativos. Eles estão naturalmente presentes em uma gama diversificada de produtos alimentícios e bebidas (Jafari, Rashidinejad & Simal-Gandara, 2023). Existem vários métodos para incorporar compostos bioativos em biomateriais para formar sistemas de embalagem ativos; por exemplo, adição direta, encapsulamento e complexação (Rashidinejad *et al.*, 2023; Asadi-Yousefabad *et al.*, 2022). O processo de integração dos compostos bioativos é descrito como a formação de ligações físicas com os compostos bioativos, ao invés de estabelecer uma ligação covalente com a matriz do filme (Sahraeian, Abdollahi & Rashidinejad, 2024).

A adição de compostos bioativos em filmes confere a eles propriedades antimicrobianas e/ou antioxidantes (Cui *et al.*, 2021). Os filmes de amido preparados pela adição de substâncias antibacterianas à matriz polimérica podem ser usados como material de embalagem ativa, e podem efetivamente inibir a proliferação de bactérias, prolongando a vida útil dos alimentos (Khalid *et al.*, 2018). A atividade antioxidante é uma função muito importante dos filmes à base de amido como materiais de embalagem de alimentos. A adição de ingredientes antioxidantes aos filmes à base de amido confere

ao filme propriedades antioxidantes que estendem a vida útil dos alimentos embalados (Cui *et al.*, 2021).

Os óleos essenciais e extratos que possuem compostos bioativos, são conhecidos por ter efeitos antioxidantes e têm sido amplamente adicionados a filmes à base de amido com o intuito de aumentar suas propriedades antioxidantes (Cui *et al.*, 2021). Nesse sentido, o presente trabalho tem como um de seus objetivos, utilizar um extrato liofilizado de córtex de mandioca na formulação de filmes e estudar o seu potencial bioativo.

3.4 Mandioca

A mandioca (*Manihot esculenta Crantz*), popularmente conhecida como macaxeira ou aipim, é uma espécie de mandioca mansa ou de mesa que é destinada ao comércio in natura. O termo genérico “mandioca” é usado em função das características físicas da planta, no entanto, existem diferenças significativas entre as espécies, dentre elas destaca-se o fato de que a mandioca mansa é a única variedade que pode ser consumida in natura. As demais espécies, também conhecidas como mandiocas bravas ou amargas, só são usadas na alimentação humana após processamento (Pinheiro, 2019). As formas de consumo da mandioca podem variar, ela pode ser fervida, assada, frita, processada em farinha, fermentada em bebidas fermentadas e ainda, processada em amido (Najjingo; Byakika; Mukisa, 2024). Esse tubérculo é de fundamental importância como alimento básico, sustentando aproximadamente 800 milhões de pessoas na África (55,5%), Ásia (30,2%), América (14,3%) e Oceania (0,1%) (Chisenga *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024).

Segundo o Levantamento Sistemático da Produção (LSPA) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a produção de mandioca no Brasil em 2023 foi de 19,13 milhões de toneladas, produzidas e colhidas em uma área de 1,24 milhões de hectares (CONAB, 2023). Comparado a 2022, a produção de mandioca no Brasil teve um aumento de 2,12%, com uma produtividade de 15 toneladas por hectare, em comparação com as 14,8 toneladas por hectare do ano anterior (CONAB, 2023).

A mandioca é composta por três estruturas anatômicas: a casca, a entrecasca (córtex) e a polpa (parênquima de armazenamento do amido). O córtex da mandioca também chamado de entrecasca, representa a camada espessa esbranquiçada sob a casca fina marrom, que durante o processamento manual ou descasque mecanizado de tubérculos de mandioca a nível doméstico ou industrial para a produção de farinha e

amido acaba sendo descartada (Tweyongyere; Katongole, 2002; Olanbiwoninu; Odunfa, 2012, Ascheri *et al.*, 2014).

Figura 1: Partes da macaxeira de quatro variedades. Fonte: Pedri *et al.* (2018).



A mandioca, uma cultura básica de suma importância, sem dúvida tem imenso potencial para enfrentar os desafios globais contemporâneos, particularmente relacionados à segurança alimentar. É considerada uma cultura valiosa devido à sua alta resistência à seca, tolerância a doenças e rendimentos superiores (Tumwine & Asimwe, 2019; Najjingo; Byakika; Mukisa, 2024). Sua importância se estende além de seu papel como uma fonte valiosa de calorias e renda para pequenos agricultores e processadores (Esuma *et al.*, 2016; Sarpong *et al.*, 2024). Grande parte da sua importância econômica deve-se ao seu teor de amido. Este amido, um biopolímero renovável, barato e facilmente processado, é composto de amilose (uma molécula linear formada por monômeros de D-glucopiranosil ligados em ligações α 1,4) e amilopectina, uma molécula altamente ramificada formada por monômeros de D-glucopiranosil unidos em ligações α 1,4 e α 1,6). Esses componentes são organizados em uma estrutura semicristalina complexa, em forma granular (Zhu, 2015; Hornung *et al.*, 2018; Tao *et al.*, 2020; Cremasco *et al.*, 2024).

3.4.1 Componentes bioativos do córtex da raiz da mandioca e aplicação na formação de filmes

O córtex da mandioca é a camada interna esbranquiçada da casca da mandioca, também chamada de entrecasca, e é gerada por meio de processos manuais de raspagem da casca marrom externa ou descascamento mecanizado. O córtex é considerado um resíduo, e constitui cerca de 20 a 35% do peso total do tubérculo de mandioca. Possui problema de descarte durante o processamento industrial da mandioca em produtos como farinha e outros derivados, pois não recebe aproveitamento adequado sendo descartado ou utilizado na produção de ração para animais (Ekundayo, 1980; Omah; Okafor, 2015).

Esse resíduo contém quantidades significativas de carboidratos, que podem ser categorizados em várias frações: fração A (açúcares simples), fração B1 (amido e pectina), fração B2 (carboidratos fibrosos potencialmente degradáveis) e fração C (carboidratos fibrosos não degradáveis) (Rodrigues *et al.*, 2024).

Em relação aos compostos fenólicos e cianogênicos, as partes da mandioca apresentam composição química diferente, e o córtex é a parte que apresenta maior quantidade de compostos fenólicos, incluindo e em maior abundância os taninos, sendo este o motivo pelo qual o córtex não é utilizado para produção de farinha, uma vez que, logo após a colheita, quando exposta ao oxigênio, ocorre instantaneamente uma reação oxidativa envolvendo os compostos fenólicos e enzimas endógenas (polifenoloxidades) e que conseqüentemente resulta no escurecimento do produto e corresponde à deterioração fisiológica (Cereda; Vilpox, 2003).

As antocianinas também estão presentes na composição do córtex da mandioca, e são conhecidas por sua atividade antimicrobiana contra patógenos humanos Gram-positivos e Gram negativos, além disso possui alto potencial antioxidante e outros benefícios à saúde, tornando a preservação desses compostos essenciais para maximizar sua aplicação (Sharma *et al.*, 2020). O alto teor de compostos fenólicos totais e taninos no córtex da mandioca, pode ser explicado pelo fato de que os compostos fenólicos e taninos estão presentes principalmente na casca externa das raízes, porém no momento da colheita, a raiz é exposta ao oxigênio, acarretando em uma reação oxidativa envolvendo compostos fenólicos e enzimas endógenas, elevando assim os níveis desse composto bioativo (Cangussu *et al.*, 2021).

A Tabela 1 mostra a caracterização físico-química do córtex da mandioca, de acordo com Rodrigues *et al.* (2024) em seu estudo sobre a extração otimizada da pectina do córtex da mandioca.

Tabela 1: Caracterização físico-química e bioativa do córtex da mandioca.

Parâmetros	Córtex de mandioca
Teor de água (%)	4,91 ± 0,16
Atividade de água	0,25 ± 0,001
pH	4,4 ± 0,05
Teor de pectina (g de pectato de cálcio/100g)	2,58 ± 0,39
Antocianinas (mg/100g)	71,86 ± 0,78
Flavonóides (mg/100g)	49,99 ± 0,43
Compostos fenólicos totais (mg EAG/100g)	2088,78 ± 342,99
Teor de taninos (mg EAT/100g)	3218,59 ± 285,81

Fonte: Rodrigues et al., 2024.

Ainda que haja a presença em maior quantidade de glicosídeos cianogênicos na casca da mandioca do que na polpa, estudos revelam que a linamarase presente em maior quantidade na casca tem o poder de hidrolisar os glicosídeos cianogênicos quando a casca é ralada ou moída, fazendo com que haja a liberação do cianeto de hidrogênio gasoso (HCN) que é então dissipado no ar (Bokanga, 1990; Tweyongyere; Katongole, 2002).

Assim, a forte presença de compostos fenólicos no córtex da mandioca justifica a necessidade de se conduzirem mais estudos avaliando o seu potencial bioativo e de seus produtos derivados, como o extrato, e conseqüentemente a sua aplicação em produtos, no caso do presente estudo, em filmes a base de amido de mandioca.

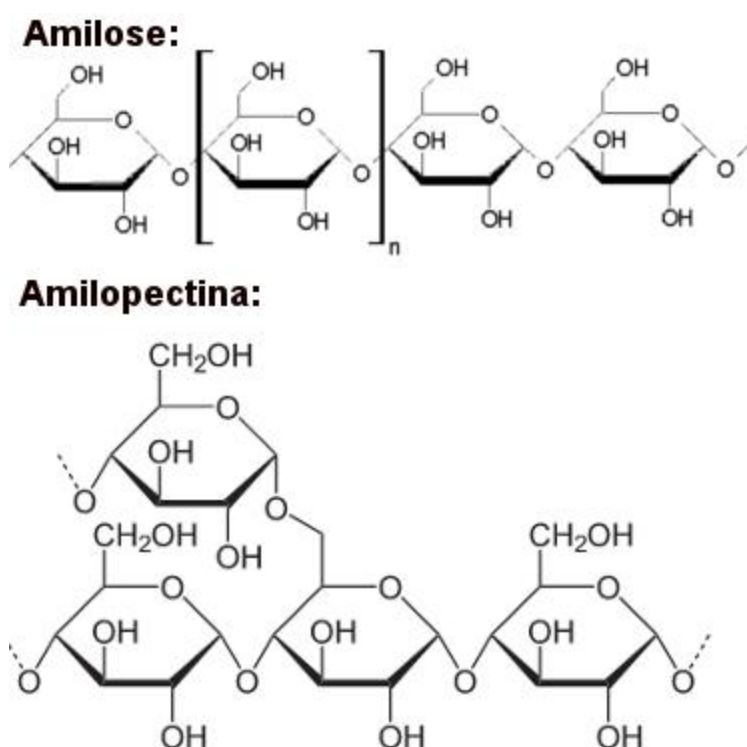
3.5 Amido da mandioca

O amido é um dos polímeros naturais mais encontrados na natureza e é o principal reservatório energético das plantas. A maioria das células vegetais possui a capacidade de sintetizar amido, e o seu armazenamento é especialmente abundante em tubérculos e em sementes (Nelson, 2014). Normalmente, os amidos comercializados são provenientes

de cereais como milho, trigo, arroz e de algumas raízes e tubérculos como a batata e a mandioca (Stoffel, 2015). Geralmente, o amido é encontrado nas plantas sob a forma de grânulos insolúveis que aumentam de volume ao entrar em contato com a água (Vieira, 2019).

Com relação a sua estrutura, é formado por moléculas de amilose (cadeia linear) e a amilopectina (estrutura ramificada) intercaladas. A amilose consiste em cadeias longas, não ramificadas, de resíduos de D-glicose conectados por ligações ($\alpha 1 \rightarrow 4$) e possui massa molecular elevada. A amilopectina também tem massa molecular elevada, mas, ao contrário da amilose, é altamente ramificada. As ligações glicosídicas que unem os resíduos de glicose sucessivos nas cadeias de amilopectina são ($\alpha 1 \rightarrow 4$); nos pontos de ramificação (que ocorrem a cada 24 a 30 resíduos) são ligações ($\alpha 1 \rightarrow 6$) (Nelson, 2014).

Figura 2: Estrutura química da amilose e da amilopectina. Fonte: Matos et al. (2023).



Vale salientar que o caráter polar da amilose, devido à sua estrutura linear e capacidade de formar pontes de hidrogênio, confere alta afinidade com a água (Zhang & Kishimoto, 2024). Por outro lado, a amilopectina, embora também seja polar, apresenta menor afinidade com a água em função de sua estrutura altamente ramificada, que

dificulta a compactação molecular e reduz a formação de interações coesas. Essa distinção entre amilose e amilopectina tem um impacto significativo em filmes à base de amido. Filmes com maior proporção de amilose tendem a apresentar menor solubilidade em água e menor permeabilidade ao vapor d'água, devido à maior cristalinidade e organização estrutural conferidas pela amilose (Vanier *et al.*, 2019). Já filmes ricos em amilopectina são mais solúveis e possuem maior permeabilidade à água, uma vez que suas ramificações dificultam a formação de estruturas densas e resistentes. Portanto, a relação entre a composição de amilose e amilopectina no amido é um fator crucial para determinar as propriedades físicas e funcionais de materiais derivados, especialmente no desenvolvimento de filmes biodegradáveis (Horn; Martins; Plepis, 2023).

Amidos de diferentes fontes vegetais possuem diferentes teores de amilose e amilopectina e inúmeras propriedades funcionais e, portanto, têm aplicações versáteis na indústria alimentícia. Tais aplicações decorrem da transformação dos grânulos de amido nativo semicristalinos para o estado amorfo (gelatinização), para gerar uma pasta após a absorção de água e desenvolver viscosidade (formação de pasta), desenvolvendo um gel após a formação da rede (gelificação) (Ferreira; Almeida, 2022).

O amido da mandioca é obtido a partir das raízes da mandioca, após descascamento, trituração, desintegração, purificação, peneiramento, centrifugação, concentração e secagem (Silva *et al.*, 2013). Os grânulos de amido podem variar com relação ao tamanho (de 1 a 100 μm de diâmetro) e forma (poligonal, esférica, lenticular), e também podem variar muito em relação ao conteúdo, estrutura e organização das moléculas de amilose e amilopectina, a arquitetura de ramificação da amilopectina e o grau de cristalinidade (Lindeboom *et al.*, 2004; Santos *et al.*, 2019). O amido apresenta, em média, uma composição de 17% a 23% de amilose e 77% a 83% de amilopectina, embora esses valores possam variar dependendo do local de cultivo, das condições ambientais e das características genéticas da planta. Por exemplo, amidos extraídos de mandioca cultivada em diferentes localidades na Malásia mostraram teores de amilose entre 13,87% e 23,16% e de amilopectina entre 74,28% e 85,44% (Hasmadi *et al.*, 2021).

A gelatinização do amido de mandioca decorre do aquecimento dos grânulos de amido na presença da água, levando à absorção de água, inchaço e ruptura de ligações de hidrogênio internas. Este processo resulta na solubilização parcial do amido e no aumento da viscosidade. A estrutura única do amido de mandioca, com grânulos predominantemente circulares e alta proporção de amilopectina, favorece esse comportamento. A temperatura de gelatinização depende de fatores como concentração e

condições de pré-aquecimento, influenciando aplicações em alimentos e outros setores industriais (Santos *et al.*, 2019). Nos estudos sobre filmes produzidos com amido de mandioca, a sua temperatura de gelatinização é comumente descrita em torno de 60 a 80°C.

Nesse sentido, o amido de mandioca possui excelentes vantagens em sua utilização como base para filmes, dentre elas, a sua capacidade de formar filmes, transparência, biodegradabilidade e não toxicidade (Hernandez-García; Vargas; Chiralt *et al.*, 2021). As propriedades dos filmes à base de amido de mandioca dependem de vários parâmetros, como a origem do amido, a quantidade de amido, o teor de amilose e amilopectina, a cristalinidade, o tipo de plastificante e as condições de armazenamento, como a umidade relativa (Belibi *et al.*, 2014).

3.6 Aplicação de filmes biodegradáveis

Filmes à base de amido com potencial bioativo têm amplas perspectivas de aplicação como materiais de embalagem de alimentos. Filmes à base de amido são materiais acessíveis, baratos, biodegradáveis e ecológicos para embalagens de alimentos. A adição de compostos, como polifenóis, óleos essenciais, extratos e nanopartículas nos filmes também podem mostrar propriedades antibacterianas, antioxidantes, de barreira ultravioleta, de barreira de vapor de água e de barreira de oxigênio. Essas características são extremamente benéficas para a preservação de alimentos, especialmente alimentos perecíveis, como frutas e vegetais, carnes aquáticas e alimentos diversos (Cui *et al.*, 2021).

Alguns estudos foram feitos utilizando filmes a base de amido para a conservação de frutas, que são alimentos altamente perecíveis. Sganzerla *et al.* (2020) produziram um filme à base de amido com adição de farinha de casca de feijoa, e pectina de ácido cítrico e utilizaram como embalagem para maçãs. A aplicação dessa embalagem permitiu que as maçãs mantivessem um peso constante após cinco dias de armazenamento. Francisco *et al.* (2020) prepararam filmes de amido de tapioca acetilado com hidroxietilcelulose e utilizaram como revestimentos de goiaba, prolongando a vida útil da goiaba em até 13 dias. Um filme à base de amido com bactérias do ácido láctico, carboximetilcelulose de sódio e glicerol foi preparado e utilizado como revestimento para bananas, o estudo demonstrou um bom efeito de preservação nessas frutas, evitando que elas escurecessem e adquirissem coloração preta (Li *et al.*, 2020).

A adição de *Lactobacillus acidophilus* encapsulado em filme de amido de mandioca controlou efetivamente a proliferação de bactérias aeróbicas mesófilas no queijo, aumentando sua estabilidade (Santacruz & Castro, 2018). Ácidos graxos insaturados possuem propensão natural à rancidez oxidativa, que afeta as propriedades organolépticas dos óleos, resultando na diminuição no valor nutricional e na qualidade do produto. Portanto, o uso de um filme à base de amido com atividade antioxidante pode estender a vida útil dos óleos, como mostrou o estudo de Talón *et al.* (2019), que utilizou filmes desenvolvidos com pó de eugenol encapsulado com lecitina e ácido oleico para a prevenção da oxidação do óleo de girassol, resultando na prevenção da rancidez oxidativa mesmo após 53 dias de armazenamento a 30 °C.

A utilização de filmes ativos a base de amido de mandioca além de manter os alimentos frescos, pode ser utilizado para monitorar a presença de microorganismos deteriorantes (Cui *et al.*, 2019). A alta perecibilidade de produtos como frutos do mar, é um risco significativo para a saúde dos consumidores, portanto, o desenvolvimento de filmes de embalagem para preservação de peixes é de grande importância. Tan *et al.* (2024) conseguiram aumentar a vida útil de filés de salmão utilizando filmes comestíveis a base de amido de mandioca/carboximetilcelulose sódica incorporada de *Bacillus*. Xu *et al.* (2024) utilizaram filmes a base de amido de mandioca/álcool polivinílico para monitoramento visual de frescor de camarões.

A carne de frango possui alta perecibilidade e a principal estratégia de preservação de sua qualidade é o uso de embalagem de plástico, no entanto a sua utilização acarreta inúmeros problemas ambientais. Shi *et al.* (2024) utilizaram filmes comestíveis de amido de mandioca adicionados de óleo essencial de *Litsea Cubeba* no armazenamento de carne de frango. Os resultados da pesquisa mostraram que o crescimento microbiano foi retardado em 6,35 log UFC/g após armazenamento por 10 dias, sugerindo que seus filmes comestíveis tinham grande potencial para preservação de carne de frango.

Há ainda outras aplicações dos filmes de amido, como por exemplo na indústria farmacêutica. Os filmes biodegradáveis à base de amido podem ser usados como biomateriais funcionais para curativos de feridas, transportadores de medicamentos e filmes de desintegração oral (Cui *et al.*, 2021). Os filmes orodispersíveis são formas farmacêuticas baseadas em uma matriz que se dissolve na mucosa oral sem a necessidade de água. Eles são frequentemente usados para incorporar medicamentos para administração a pacientes que têm dificuldade em engolir comprimidos ou cápsulas (Morath *et al.*, 2022; Ferlak; Guzenda; Osmałek, 2023). Nesse sentido, Tamanini *et al.*

(2024) fizeram filmes orodispersíveis de amido plastificado com glicerol, carregados com melatonina. O estudo mostrou que os filmes tiveram a liberação da melatonina, mostrando potencial para tal aplicação.

3.7 Estado da arte

Existem diversos estudos na literatura a respeito de filmes ativos a base de amido de diversas fontes, dentre eles o amido de mandioca. Gunathilake e Somendrika (2024) desenvolveram filmes biodegradáveis a base de amido de mandioca adicionados de extrato de *Ocimum tenuiflorum*. No estudo, obtiveram filmes com boas propriedades mecânicas e de barreira, além de observarem a inibição do crescimento microbiano em amostras de maçãs armazenadas nos filmes produzidos.

Costa *et al.* (2023) produziram filmes biodegradáveis de amido de mandioca com carboximetilcelulose adicionados de lecitina de soja e mistura de tocoferol. Com o estudo, observaram que os filmes possuíam atividade antioxidante e potencial bioativo. Já Santos *et al.* (2023), desenvolveram filmes a base de amido de feijão, adicionados de extratos de araçá, butiá, uvaia e guabiroba. Os resultados mostraram que os filmes desenvolvidos possuem atividade antioxidante e forte presença de compostos fenólicos. Ainda, no teste de migração dos compostos fenólicos e antioxidantes, foi possível perceber que os filmes tiveram migração de seus compostos para o meio circundante, indicando que são uma possível substituição das embalagens tradicionais.

Santos *et al.* (2024) avaliaram o efeito do ultrassom e da liofilização para melhorar a extração de compostos fenólicos em cascas de pitaya e sua aplicação em filmes comestíveis à base de amido. No estudo, foi possível observar que o aumento das concentrações de partículas do pó da casca de pitaya, acarretaram um maior teor de compostos fenólicos totais e atividade antioxidante. Além disso, foi possível observar que os compostos fenólicos e a atividade antioxidante migraram prontamente para o meio aquoso. A adição do pó da casca de pitaya afetou as propriedades mecânicas dos filmes, ocasionando a redução da resistência a tração e módulo de Young, e um aumento no alongamento na ruptura dos filmes. No geral, com o estudo foi possível constatar que os filmes produzidos são boas opções para substituir os plásticos convencionais.

Perez-Vergara *et al.* (2020) produziram filmes de amido de mandioca incorporados com cera de abelha e extrato etanólico de própolis, com o objetivo de melhorar as propriedades de barreira e antimicrobianas do filme. López-Córdoba *et al.*

(2017) obtiveram filmes de amido de mandioca contendo nanopartículas de alecrim na formulação. Ainda, Chollakup *et al.* (2020) estudaram as atividades antioxidantes e antibacterianas de filmes de amido de mandioca e mistura de proteína de soro de leite contendo extrato de casca de rambutan e óleo de canela para embalagens ativas. Já Caetano *et al.* (2018) confeccionaram filmes biodegradáveis com propriedades antimicrobianas e antioxidantes desenvolvidos a partir de amido de mandioca adicionados de extrato de resíduo de abóbora minimamente processado (PRE) (0 a 6%) e óleo essencial de orégano (OEO) (0 a 2%).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O amido de mandioca e o córtex da mandioca foram adquiridos no comércio local da cidade de Campina Grande, Paraíba, Brasil (7° 13' 50" S, 35° 52' 52" O). Foram utilizados álcool 70% (Safra, São Paulo, Brasil), maltodextrina (Adicel, Belo Horizonte, Brasil), glicerol (Nox, Mauá, Brasil), antrona (Dinâmica Química contemporânea Ltda, Indaiatuba, Brasil), glicose (Vetec, Duque de Caxias, Brasil), dimetilsulfóxido (ACS Científica Química Fina especializada Ltda, Sumaré, Brasil), iodo (Vetec, Duque de Caxias, Brasil), ácido gálico (ACS Científica Química Fina especializada Ltda, Sumaré, Brasil), Folin-Cicalteau (Êxodo Científica, Sumaré, Brasil), carbonato de sódio (Neon, Suzano, Brasil), Trolox (Sigma Aldrich, San Luis, Estados Unidos), DPPH (Sigma Aldrich, San Luis, Estados Unidos), ABTS (Sigma Aldrich, San Luis, Estados Unidos), TPTZ (Sigma Aldrich, San Luis, Estados Unidos), ácido acético (Dinâmica Química contemporânea Ltda, Indaiatuba, Brasil), álcool etílico (Êxodo Científica, Sumaré, Brasil).

4.2 Caracterização do amido de mandioca

4.2.1 Teor de água

O teor de água foi determinado conforme método descrito pelo Instituto Adolfo Lutz, que basicamente consiste em secagem da amostra a 105 °C em estufa, até massa constante.

4.2.2 Teor de amido, amilose e amilopectina

O teor de amido foi determinado conforme o método estabelecido pela A.O.A.C. (2016), baseado na quantificação do composto formado pela reação entre antrona e glicose, com leitura da absorbância a 620 nm. A quantificação do teor de amilose seguiu o método proposto por Magel (1991). Para isso, 10,0 mg de amido foram adicionados a 2 ml de dimetilsulfóxido e aquecidos a 85 °C por 15 minutos. Em seguida, o volume da solução foi ajustado para 25 ml. Após esse procedimento, 1 ml da solução de amido foi transferido para um balão volumétrico de 50 ml, ao qual foram adicionados 5 ml de solução de iodo, completando o volume para 50 ml. A absorbância foi medida a 620 nm. O teor de amilopectina das amostras foi calculado pela diferença entre os valores de amido e amilose.

4.3 Obtenção do extrato do córtex da raiz da mandioca

O extrato de córtex da raiz da mandioca foi obtido por meio do processo de extração hidroalcoólica, conforme metodologia descrita por Vieira et al., (2023). Assim, o córtex foi inicialmente recepcionado, selecionado e pesado para posterior higienização. Este, foi submetido a lavagem com água corrente, a fim de remover sujidades e materiais estranhos, sendo sanitizado, logo após, em solução de hipoclorito de sódio, a 50 mg L⁻¹ de cloro ativo, por 15 minutos e, posteriormente, enxaguado em água corrente a fim de se retirar o excesso da solução.

Após a higienização, o córtex foi submetido ao processo de secagem em estufa com circulação de ar forçado (Quimis®, Diadema, Brasil) à 50 °C por 24 horas de acordo com Rodrigues et al. 2024, e após esse processo, moído em moinho de facas (Marconi®, Modelo TE340, Brasil), obtendo assim o córtex na forma de pó. Os extratos foram obtidos a partir do pó do córtex utilizando a proporção 1:10 (m/v) de álcool etílico 70%, sendo homogeneizados em agitador mecânico (Quimis®, Modelo Q250, Brasil) a 50 °C por 60 minutos e protegido da luz. Posteriormente foram filtrados e rotaevaporados (IKA®,

Modelo HB 05.06 CN, Brasil) em pressão reduzida a 50 °C durante 2h30min, por fim, os extratos líquidos foram armazenados em frasco âmbar e armazenados sob refrigeração, na temperatura de 5°C.

O extrato líquido foi submetido a etapa de liofilização, para isso maltodextrina foi adicionada ao extrato, em concentração de 35% em relação a quantidade de sólidos totais do extrato. Posteriormente, o extrato foi colocado em formas de gelo de silicone e congelado em freezer na temperatura de -20°C (Consul, São Paulo, Brasil) durante 48h. Após o congelamento, o extrato foi retirado das formas e colocado nas bandejas do liofilizador (ALPHA 1-2 LD plus, Martin Christ ®, Osterode am Harz, Alemanha) onde permaneceu no equipamento durante 48h na temperatura de -50°C. Passado esse período, o sistema de vácuo foi desligado, as amostras foram coletadas, e em seguida maceradas com a ajuda de um pistilo para obtenção do pó. Os pós foram armazenados em temperatura ambiente em sacos metalizados com Zip Lock, confeccionados de polietileno de baixa densidade.

4.4 Caracterização do extrato do córtex da raiz da mandioca liofilizado

4.4.1 Teor de água

O teor de água foi determinado conforme método descrito no item 3.3.1.

4.4.2 Análise colorimétrica

A análise colorimétrica foi realizada em um espectrofotômetro portátil FRU® Precise Color Reader, modelo WR-10QC, obtendo-se os parâmetros L*, a* e b*. O parâmetro L* representa a luminosidade (L* = 0 para preto e L* = 100 para branco), enquanto a* e b* indicam a cromaticidade (+a* para vermelho e -a* para verde; +b* para amarelo e -b* para azul).

4.4.3 Compostos fenólicos totais

A determinação dos compostos fenólicos totais foi realizada de acordo com o método Folin-Ciocalteu, utilizando ácido gálico como padrão, descrito por Waterhouse (2006). A curva padrão foi construída utilizando Folin-Ciocalteu, carbonato de cálcio, água e ácido gálico, sendo as concentrações finais de ácido gálico da curva padrão iguais a 0, 4,5, 9, 13,5, 18 e 22,5µg/ml, possibilitando a obtenção da equação ($y = 0,0445x + 0,0271$; $R^2 = 0,9974$). Para a análise, 1g do extrato em pó foi dissolvido em 50ml de água. Assim, uma alíquota de 90 µL do extrato líquido diluído, 2035 µL de água e 125 µL da solução de Folin-Ciocalteu (1,98%) foram adicionadas em tubo de ensaio. As amostras foram agitadas em vortex e após 5 min foram adicionados 250 µL de Na₂CO₃ (20% m/v), mantendo-se em repouso por 30min na temperatura de 40°C. A absorvância da amostra foi monitorada em 765 nm utilizando espectrofotômetro e cubeta de vidro com caminho óptico de 1 cm. O experimento foi realizado em triplicata e os resultados expressos como média ± desvio padrão em mg de ácido gálico equivalente por g de amostra (mg GAE/100g).

4.4.4 Atividade antioxidante

A atividade antioxidante do extrato liofilizado do córtex de mandioca foi avaliada utilizando três métodos: FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power), ABTS (2,2-azinobis (ácido 3-etilbenzotiazolína-6-sulfônico)) e DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil). Para a análise de atividade antioxidante pelo método FRAP, foi construída uma curva padrão utilizando diferentes concentrações de sulfato ferroso (100, 500, 1000,1500 e 2000µM), gerando uma equação para a curva ($y = 1,6187x - 0,0258$; $R^2=0,9917$) que foi utilizada para calcular os valores de atividade antioxidante. As amostras foram preparadas utilizando metanol como extrator e foram lidas em espectrofotômetro (Agilent Technologies Cary 60 UV-Vis, Estados Unidos) no comprimento de onda de 593nm. Os resultados foram expressos em mmol Fe²⁺/kg.

Na análise de atividade antioxidante por ABTS, as amostras foram preparadas utilizando o metanol como extrator e em seguida centrifugadas. Para esta análise, foi construída uma curva padrão utilizando soluções com diferentes concentrações de Trolox (100, 500, 1000,1500 e 2000µM), gerando uma equação para a curva ($y=34,534x + 2,3452$; $R^2=0,9978$), que foi utilizada para calcular os valores da atividade antioxidante. As leituras das amostras e da curva padrão foram realizadas em espectrofotômetro

(Agilent Technologies Cary 60 UV–Vis, Estados Unidos) no comprimento de onda de 734nm.

Procedimento semelhante foi realizado para a análise de antioxidantes por DPPH. Nesta análise, as amostras e pontos da curva padrão foram lidos no espectrofotômetro (Agilent Technologies Cary 60 UV–Vis, Estados Unidos) no comprimento de onda de 515nm. A curva padrão foi preparada utilizando soluções de DPPH em diferentes concentrações (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 μ M), gerando uma equação para a curva ($y=58,847x + 2,5215$; $R^2 = 0,9972$), que foi utilizada para calcular a atividade antioxidante das amostras.

4.5 Desenvolvimento dos filmes

Os filmes foram preparados por *casting* de acordo com a metodologia proposta por Assis et al. (2017) com modificações. As concentrações de amido e extrato foram estabelecidas por meio de testes preliminares. Assim, o amido de mandioca (2,1g) foi solubilizado em 100 ml de água destilada, aquecido até 70 °C durante 10 minutos. Passado esse período, o glicerol, 30% com base no teor de amido, foi adicionado e homogeneizado durante 5 minutos. Cerca de 100 ml da solução filmogênica foi distribuída em formas de silicone e em seguida submetida a secagem em estufa de circulação de ar (Quimis®, Diadema, Brasil) a 35 °C durante 24h. Os filmes contendo o extrato do córtex da raiz da mandioca foram preparados da mesma maneira, no entanto foram adicionados de extrato de córtex da raiz da mandioca liofilizado nas concentrações de 20, 30, 40 e 50% com base no teor de amido. Ainda, as concentrações foram definidas através de testes preliminares.

Tabela 2: Proporções de amido de mandioca, água, glicerol e extrato de córtex de mandioca nas formulações dos filmes.

Formulação	Amido de mandioca (g)	Água (ml)	Glicerol (%)	Extrato (%)
FC	2,1	100	30	0
F20	2,1	100	30	20
F30	2,1	100	30	30
F40	2,1	100	30	40
F50	2,1	100	30	50

Legenda: FC é o filme controle, sem adição do extrato do córtex da raiz da mandioca; F20 é o filme com 20% do extrato do córtex da raiz da mandioca; F30 é o filme com 30% do extrato do córtex da raiz da mandioca; F40 é o filme com 40% do extrato do córtex da raiz da mandioca; F50 é o filme com 50% do extrato do córtex da raiz da mandioca

4.6 Caracterização dos filmes

4.6.1 Teor de água

O teor de água foi determinado conforme método descrito no item 2.3.1.

4.6.2 Espessura

A espessura foi medida em três pontos diferentes na amostra, utilizando um micrômetro (Model Digimatic Micrometer Series 293 MDC-Lite, Mitutoyo Corporation, Japão).

4.6.3 Solubilidade em água

Os valores de solubilidade em água foram determinados conforme o método descrito por Almeida et al. (2013). Inicialmente, os filmes foram cortados em dimensões de 4 cm² e secos em estufa com circulação de ar a 105 °C por 24 horas, até atingirem peso constante. Posteriormente, as amostras foram imersas em 30 mL de água destilada a 25 °C por 24 horas. Após esse período, as amostras foram coletadas e novamente secas a 105 °C por 24 horas, até alcançarem peso constante. A solubilidade dos filmes foi calculada utilizando a Equação 1:

$$\text{Solubilidade (\%)} = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que: P_i e P_f representam os pesos iniciais e finais das amostras secas, respectivamente.

4.6.4 Permeabilidade a vapor

A permeabilidade ao vapor d'água dos filmes foi avaliada utilizando o método gravimétrico da norma ASTM E96/E96M-16 (ASTM, 2016), com adaptações descritas por Lima et al. (2024). Os filmes foram fixados em cápsulas circulares de vidro com 5 cm de diâmetro, contendo sílica seca em seu interior (35% de umidade relativa). As cápsulas foram então colocadas em dessecadores contendo solução saturada de NaCl, que gerou uma condição de umidade relativa externa de 75% a 25 °C. As amostras foram pesadas diariamente por 7 dias, em intervalos de 24 horas. A permeabilidade ao vapor d'água foi calculada por meio da Equação 2, e o resultado expresso em $\text{gH}_2\text{O}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}$.

$$\text{PVA} = \frac{\left(\frac{C_i}{A}\right) \cdot X}{(P \cdot (UR1 - UR2))} \quad (2)$$

Onde:

C_i é o coeficiente angular da reta obtida pelo ganho de peso da sílica em função do tempo;

X é a espessura do filme (mm);

A é a área do filme (m^2);

P_s é a pressão de saturação do vapor d'água a 25 °C (22,2 mmHg);

$UR1$ é a umidade relativa externa (75%);

$UR2$ é a umidade relativa interna (35%).

4.6.5 Cor

A análise colorimétrica foi realizada em um espectrofotômetro portátil FRU® Precise Color Reader, modelo WR-10QC, obtendo-se os parâmetros L^* , a^* e b^* . O parâmetro L^* representa a luminosidade ($L^* = 0$ para preto e $L^* = 100$ para branco), enquanto a^* e b^* indicam a cromaticidade ($+a^*$ para vermelho e $-a^*$ para verde; $+b^*$ para amarelo e $-b^*$ para azul).

4.6.6 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos filmes foram determinadas utilizando o texturômetro Stable Micro Systems, modelo HD Plus. As amostras foram cortadas em tiras com 40 x 20 mm. A distância inicial das garras será de 15 mm, velocidade de tração de 1 mm.s⁻¹, com célula de carga de 50 N. A partir dos dados fornecidos pelo texturômetro, calculou-se o alongamento na ruptura (Equação 3) e resistência a tração (Equação 4) através das seguintes equações:

$$\text{Alongamento na ruptura (\%)} = \frac{L-L_i}{L} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Resistência a tração (MPa)} = \frac{F}{X \times B} \quad (4)$$

Onde:

L e Li são os comprimentos finais e iniciais da amostra (mm), respectivamente;

F é a força (N);

X é a espessura da amostra (mm);

B a largura (mm).

4.6.7 Compostos fenólicos totais

A quantificação dos compostos fenólicos totais foi feita conforme item 3.4.3.

4.6.8 Atividade antioxidante

A atividade antioxidante dos filmes foi determinada conforme item 3.4.4.

4.6.9 Teste de migração dos compostos fenólicos

A migração de compostos fenólicos totais dos filmes para diferentes matrizes alimentares foi avaliada seguindo o método RDC n° 51, com adaptações propostas por Sohany et al. (2021). Os experimentos foram realizados em triplicata, utilizando três tipos de simuladores alimentares:

(a) Água destilada: representa alimentos aquosos não ácidos (pH > 4,5);

(b) Ácido acético a 3%: representa alimentos aquosos ácidos (pH < 4,5);

(c) Etanol a 95%: representa alimentos gordurosos (pH 6,4).

Filmes com dimensões de 3 cm × 3 cm foram imersos em 20 mL de cada simulador alimentar, tanto à temperatura ambiente (28 ± 2 °C) quanto sob refrigeração (4 ± 2 °C). As análises dos simuladores para compostos fenólicos totais (conforme item 3.4.3) foram realizadas após 72h de imersão. Os pHs iniciais dos simuladores utilizados foram: a) 4, 82; b) 3,1 e c) 6,7.

4.6.10 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR)

Os espectros na região do infravermelho foram obtidos utilizando o sistema Perkin Spectrum 400 Series com transformada de Fourier (FT-IR), no intervalo de 400 a 4.000 cm^{-1} , a partir de um sedimento preparado com brometo de potássio (KBr).

4.6.11 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia dos filmes foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um microscópio modelo MIRA-3 LMH (Tescan, São Paulo, Brasil). Foram avaliadas as superfícies dos filmes e suas respectivas secções transversais. As amostras foram fixadas em suportes metálicos com o auxílio de fita de carbono dupla face. As imagens foram obtidas por meio do software MiraTC, operando com uma tensão de aceleração de 10 kV, detectores SE, corrente de feixe de 1750 mA e ampliação de 500×.

4.6.12 Biodegradabilidade

A biodegradabilidade dos filmes foi avaliada pelo sistema de compostagem, segundo o método padrão G-160-03. As amostras foram colocadas a uma profundidade de 5 cm sob solo previamente preparado (pH entre 6,5 e 7,5 e teor de umidade entre 20 e 30%) e mantidos 30 ± 2 °C. As amostras foram observadas visualmente durante 6 semanas e pesadas a cada 7 dias.

4.7 Análise estatística

Todos os experimentos foram realizados em triplicata (n=3). Os resultados foram analisados por análise variância (ANOVA) e submetidos ao teste de Tuckey a fim de determinar diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as amostras através do software Assistat beta 7.7 (available as freeware from: <http://www.assistat.com>).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do amido de mandioca

Na Tabela 2, encontra-se os resultados da caracterização físico-química do amido de mandioca de marca comercial, utilizado na produção dos filmes. O valor obtido na análise de teor de água do amido de mandioca foi de 11,78%, que está dentro do limite estabelecido pela RDC nº263/2005 da Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos da Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA, que estabelece que a umidade máxima permitida para o amido de mandioca é de 18% p/p (BRASIL, 2005). A importância da umidade da fécula reside na padronização do produto, essencial para a indústria, além de assegurar a estabilidade microbiológica do produto (Nunes; Santos; Cruz, 2009).

A composição do amido, em sua grande maioria possui entre 15 e 30% de amilose e 70-85% de amilopectina, no entanto as quantidades desses polissacarídeos depende da sua origem botânica (Corradini et al., 2005; Pietrzyk et al., 2018). Com esse estudo foi possível observar que a composição de amilose e amilopectina do amido de mandioca foi de 28,23 e 33,13% respectivamente. Percebe-se que a quantidade de amilopectina do amido é inferior aos dados obtidos por Corradini et al. (2005). A diminuição do teor de amilopectina pode ocorrer devido ao processo de extração e purificação do amido, bem como o armazenamento das raízes no pós-colheita (Silva; Ferreira; Carvalho, 2017).

Tabela 3: Teor de água, amido, amilose e amilopectina do amido de mandioca utilizado para desenvolver os filmes desse estudo.

Caracterização do amido de mandioca	
Teor de água (%)	11,78 ± 0,19
Teor de amido (%)	61,36 ± 1,02
Teor de amilose (%)	28,23 ± 0,76
Teor de amilopectina (%)	33,13 ± 1,76

Os resultados são expressos em média ± desvio padrão.

Daza et al. (2023) estudaram a composição do amido de chacharuto a fim de utilizá-lo como matéria prima para a produção de filmes. Nesse trabalho, encontraram o valor de 8,70% para o teor de água e 36,6% para o teor de amilose. Kumar, Ghoshal e Goyal (2019), encontraram para o teor de água o valor de 8,23% e teor de amilose igual a 20,9% quando estudaram o potencial do amido de feijão-traça para produção de filmes biodegradáveis. Ainda, Marichelvam, Jawaid e Asim (2019) ao explorarem os potenciais dos amidos de milho e de arroz na produção de filmes, encontraram valores iguais a 10,82% e 11,24% para o teor de água de amido de milho e amido de arroz, respectivamente, e quanto ao teor de amilose, encontraram o valor de 29,4% para o amido de milho e 33,6% para o amido de arroz. O teor de amilose é um importante parâmetro, pois pode influenciar as propriedades de formação de filme. Os amidos com alto teor de amilose podem produzir filmes com morfologias mais homogêneas e maior resistência mecânica (Vanier et al., 2019).

5.2 Caracterização do extrato liofilizado do córtex de mandioca

A Tabela 3, contém os resultados obtidos para a caracterização físico-química e bioativa do extrato liofilizado do córtex de mandioca. Observa-se que o teor de água do extrato liofilizado do córtex de mandioca foi de 5,32%, sendo considerado um valor baixo. A importância dos baixos teores de água em extratos, consiste na estabilidade da substância ao ataque de microorganismos patogênicos, uma vez que a redução da água disponível para reações bioquímicas aumenta a vida útil do produto (Nunes et al., 2015). Em seu estudo sobre as características físico-químicas de pós microencapsulados de casca de romã, Yang et al. (2022) obteve valores para o teor de água que variaram entre 4,15 e 5,39%, Vonghirundecha et al. (2022) obtiveram valores entre 5,10 e 6,65%, enquanto

Van e Phuong (2024) obtiveram valores que variaram entre 3,22 e 4,76%, quando avaliaram a atividade antioxidante de pós de vagem de cacau.

No que diz respeito aos parâmetros de cor, o resultado para o L* que representa a luminosidade, foi de 70,33, indicando que o extrato apresenta coloração clara, embora não totalmente branca. O valor obtido para o parâmetro a* foi de 7,19, sugerindo leve inclinação para o tom avermelhado. Já o resultado para o parâmetro b* foi de 14,95, indicando que há uma predominância a tonalidade amarela. Sendo assim, em resumo, o extrato do cortex de mandioca possui coloração clara com leve tendência ao vermelho e ao amarelo. Tal característica, é associada a presença de compostos fenólicos na composição (Nawi; Muhamad; Marsin, 2015).

Tabela 4: Parâmetros físicos, teor de compostos fenólicos totais e potencial antioxidante (DPPH, ABTS e FRAP) do extrato do córtex da raiz da mandioca liofilizado.

Parâmetros	Extrato do córtex da raiz da mandioca
Teor de água	5,32 ± 0,25
L*	70,33 ± 0,53
a*	7,19 ± 0,28
b*	14,95 ± 0,18
CFT (mg GAE/100g)	578,48± 0,83
ABTS (mmol Trolox/kg)	13,08 ± 0,02
DPPH (mmol Trolox/kg)	4,49 ± 0,22
FRAP (mmol Fe ²⁺ /kg)	48,47 ± 0,44

Os resultados são expressos em média ± desvio padrão.

Com relação aos compostos fenólicos totais, o resultado obtido para o extrato do córtex de mandioca foi de 578,48 mg EAG/100g. A quantidade de compostos fenólicos pode ser influenciada por alguns fatores, dentre eles o processo de extração, concentração do solvente, a temperatura e tempo de contato da amostra com o solvente (Gama et al., 2022. Vonghirundecha et al. (2022) ao estudarem as propriedades de extratos microencapsulados de folhas de moringa, obtiveram resultados para os compostos fenólicos totais que variaram de 50 a 395 mg EAG/100g, valores inferiores aos obtidos no presente estudo.

A atividade antioxidante foi quantificada por três métodos: FRAP, ABTS e DPPH. Ao observar os resultados, é possível dizer que o método FRAP foi o que o extrato obteve

o maior resultado (48,47 mmol Fe²⁺/kg bs), seguido pelo método ABTS em que foi obtido o resultado de 13,08 mmol Trolox/kg bs e em seguida pelo DPPH que quantificou 4,49 mmol Trolox/kg bs. Em seu estudo sobre farinha de cascas de romã, Wanderley et al. (2023) encontraram valores de 28,41 mmol Fe²⁺/kg bs utilizando o método FRAP para determinar a atividade antioxidante do produto. Van e Phuong (2024) avaliaram a atividade antioxidante dos pós pelo método FRAP, e obtiveram resultados que variaram entre 9,61 e 21,94 mmol Trolox/kg. Oliveira et al. (2022) quantificaram valores de atividade antioxidante de 1,10 mmol Trolox/kg pelo método DPPH e 0,14 mmol Trolox/kg por ABTS para extrato da casca da cebola roxa.

5.3 Caracterização dos filmes

5.3.1 Caracterização física dos filmes

A Tabela 5 mostra os resultados obtido para o teor de água, espessura, solubilidade em água, permeabilidade a vapor de água, cor e propriedades mecânicas dos filmes de amido de mandioca com diferentes concentrações do extrato liofilizado do córtex de mandioca. O teor de água dos filmes variou de 13,77 a 20,35%. Onde a formulação controle (FC) e a formulação F20 não apresentaram diferenças estatísticas, a nível de 5% pelo teste de Tuckey, sendo consideradas as maiores médias. As formulações F30, F40 e F50 obtiveram médias de 15,35, 14,55 e 13,77%, indicando que existe uma relação entre o aumento da quantidade de extrato nos filmes e a diminuição do teor de água. Isso pode ser explicado pelo aumento da concentração de extrato nos filmes, que leva ao aumento do teor de sólidos totais (Santos et al., 2024). Gunathilake e Somendrika (2024) obtiveram valores para o teor de água que variaram entre 15,80 e 20,347% quando estudaram as características de filmes a base de amido de mandioca adicionados de extrato de Tulsi. Já Costa et al. (2023), encontraram valores entre 10,33 e 14,15%, na caracterização de filmes de amido de mandioca com carboximetilcelulose.

Tabela 5: Teor de água, solubilidade, permeabilidade a vapor de água, espessura, módulo de Young, alongamento na ruptura, tensão máxima e parâmetros colorimétricos dos filmes

Parâmetros	FC	F20	F30	F40	F50
Teor de água (%)	20,35±1,35 ^a	17,24±1,8 ^{ab}	15,35±0,56 ^{bc}	14,55±0,42 ^{bc}	13,77±0,09 ^c
Espessura (mm)	0,13±0,01 ^b	0,15±0,02 ^a	0,15±0,01 ^a	0,17±0,00 ^a	0,16±0,01 ^a
Solubilidade (%)	10,16±1,65 ^b	22,21±2,17 ^a	21,74±1,34 ^a	24,78±1,31 ^a	24,88±0,17 ^a
PVA (g.mm/m ² .h.mmHg)	1,07±0,05 ^{bc}	0,88±0,01 ^c	1,06±0,03 ^{bc}	1,37±0,13 ^a	1,14±0,05 ^b
L*	91,68±2,25 ^a	88,46±0,52 ^{ab}	88,88±0,05 ^{ab}	86,70±0,24 ^b	79,37±1,37 ^c
a*	0,71±0,12 ^d	2,49±0,12 ^c	2,86±0,20 ^{bc}	3,49±0,14 ^b	5,01±0,34 ^a
b*	0,09±0,18 ^c	6,94±0,14 ^b	6,77±0,69 ^b	7,91±0,56 ^b	13,22±0,64 ^a
Módulo de Young (Mpa)	11,01±1,29 ^c	13,60±1,024 ^c	12,31±0,96 ^c	18,62±0,12 ^b	25,55±2,08 ^a
Alongamento na ruptura (%)	87,60±1,77 ^a	69,91±7,20 ^b	61,35±5,81 ^b	39,90±3,25 ^c	38,62±6,05 ^c
Tensão máxima (Mpa)	1,48±0,25 ^a	1,04±0,31 ^a	0,99±0,45 ^a	1,50±0,29 ^a	1,78±0,33 ^a

Os resultados são expressos em média ± desvio padrão. Letras diferentes na linha diferem estatisticamente ($p \leq 0,05$) das médias avaliadas pelo teste de Tukey.

Os resultados para espessura variaram entre 0,13 e 0,17mm, onde apenas a média FC diferiu estatisticamente das demais médias a nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tuckey. Sendo assim, percebe-se que o aumento da proporção de extrato na formulação acarreta no aumento da espessura dos filmes. Luchese et al. (2017) obtiveram resultados para espessura de filmes a base de amido de mandioca que variaram de 0,08 a 0,17mm, constatando que há o aumento na espessura do filme conforme há o aumento da quantidade de amido de mandioca na formulação. González et al., (2022) também observaram comportamento semelhante para as espessuras, que variaram de 0,36 a 0,47 mm quando adicionaram pó de repolho roxo e beterraba. O aumento da espessura dos filmes quando adicionados de extratos, se deve ao aumento de sólidos na formulação e ao volume ocupado pelas partículas do pó, ocasionando a formação de matrizes poliméricas mais complexas (Yong et al., 2019; Gutiérrez et al., 2016).

A solubilidade em água dos filmes variou entre 10,16 e 24,88%, onde os resultados para as formulações F20, F30, F40 e F50 não foram estatisticamente diferentes

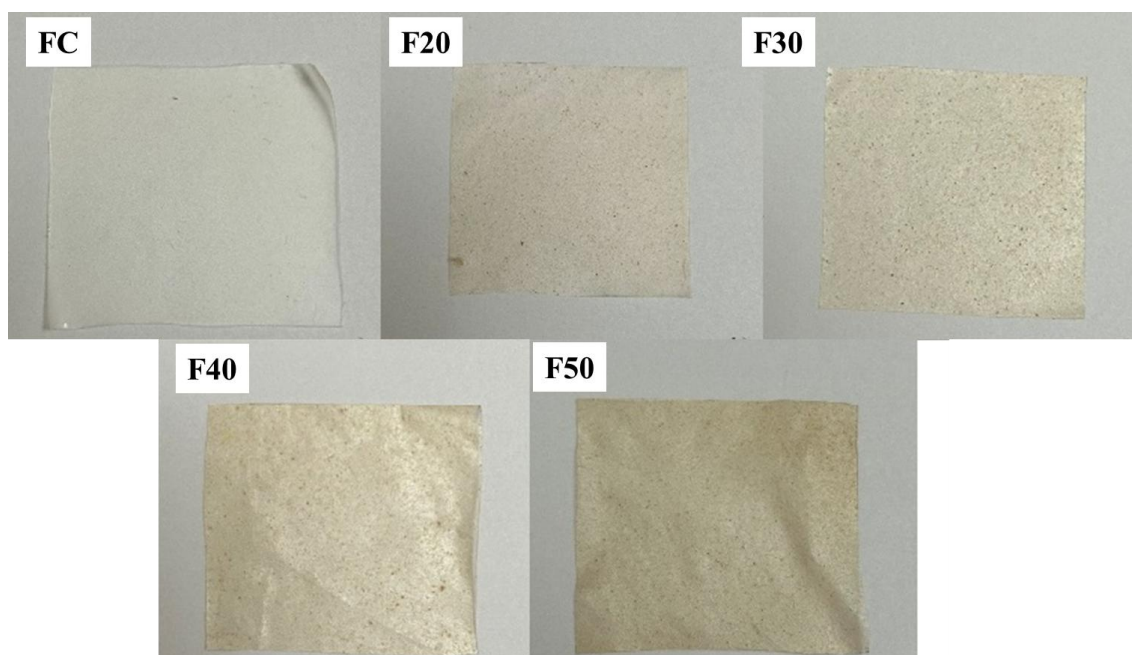
entre si a nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tuckey, sendo a formulação controle a que obteve a menor média diferindo estatisticamente das demais, sugerindo que a adição do extrato liofilizado do córtex de mandioca aumentou a solubilidade dos filmes. A solubilidade é um parâmetro importante quando se trata de filmes biodegradáveis, uma vez que se relaciona diretamente com a sua aplicabilidade (Mártinez et al., 2020). Luchese, Spada e Tessaro (2017), em seu estudo a respeito da relação entre teor de amido e propriedades de filmes a base de amido de mandioca, obtiveram valores para a solubilidade entre 16 e 24%, valores semelhantes ao deste estudo. Gunathilake e Somendrika (2024) relataram valores entre 24,473 e 32,393% para a solubilidade de filmes a base de amido de mandioca adicionados de extrato de Tulsi.

A permeabilidade ao vapor de água é um importante parâmetro, uma vez que reflete a capacidade dos filmes de controlar a transmissão de vapor de água entre um produto alimentício e o ambiente (Gunathilake & Somendrika, 2024). Altos valores de permeabilidade ao vapor de água são características indesejáveis, uma vez que filmes com alta permeabilidade ao vapor de água aceleram o processo de deterioração dos alimentos, encurtando assim a vida útil dos produtos alimentícios (Suderman et al., 2018). Portanto, os valores obtidos na análise de permeabilidade ao vapor de água variaram entre 0,88 e 1,37 g.mm/m².h.mmHg, onde os resultados de PVA das formulações FC e F30 não diferiram estatisticamente entre si a nível de 5% de significância pelo teste de Tucky, já a formulação F40 foi a que obteve o maior resultado para permeabilidade ao vapor de água. Ainda, os resultados não evidenciam uma relação clara entre a quantidade de extrato adicionado às formulações e a capacidade de permear a passagem de vapor de água entre o ambiente e o interior do filme. Costa et al. (2023) obtiveram 0,735 g.mm/m².h.mmHg como resultado na avaliação da permeabilidade ao vapor de água de filmes a base de amido de mandioca e carboximetilcelulose. Já os resultados de Córdoba et al., (2017) variaram entre 5,8 a 12,5g.mm/m².h.mmHg.

Com relação aos parâmetros colorimétricos dos filmes, o parâmetro L* que diz respeito a luminosidade dos filmes, ou o quão perto do branco se encontra a coloração da amostra, variou entre 91,68 (FC) e 79,37 (F50). A formulação controle é a que mais se aproxima da coloração branca, devido a presença apenas do amido de mandioca e glicerol, assim foi possível observar redução no valor de L* conforme a proporção de extrato de córtex de mandioca aumentava. Tal comportamento também pôde ser observado nos parâmetros a* e b*. As médias do parâmetro a* variaram de 0,71(FC) a 5,01(F50), mostrando que com o aumento da quantidade de extrato, as tonalidades dos filmes se

tornaram mais próximas do vermelho. No que diz respeito ao parâmetro b^* , as médias variaram de 0,09 (FC) a 13,22 (F50), mostrando novamente que há a tendência de aumento dos valores para os parâmetros colorimétricos conforme a quantidade de extrato aumentava. Assim, o aumento dos valores do parâmetro b^* , indicam que as cores dos filmes se tornaram mais próximas do amarelo. Esse comportamento ocorre, pois, a tendência é que o filme obtenha coloração semelhante à do extrato conforme há o aumento de sua quantidade nas formulações, como pode ser constatado ao comparar as médias dos parâmetros colorimétricos do extrato ($L^* = 70,33$; $a^* = 7,19$; $b^* = 14,95$) com os da formulação F50, que é a que contém mais extrato na composição. A Figura 3 contém as fotos dos filmes, e nela pode ser constatada a variação de cor entre as amostras.

Figura 3: Fotografias dos filmes. FC é a formulação sem extrato, F20 é a formulação com 20% de extrato, F30 é a formulação com 30% de extrato, F40 é a formulação com 40% de extrato e F50 a formulação com 50% de extrato.



5.3.2 Propriedades mecânicas dos filmes

Na Tabela 5 contém as médias e desvios padrão dos resultados das análises das propriedades mecânicas dos filmes. As propriedades mecânicas dos filmes são

importantes parâmetros para prever suas possíveis aplicações, pois fornecem informações a respeito de sua elasticidade, resistência e deformabilidade (González et al., 2022). O módulo de Young mede a capacidade de um material de retornar ao seu estado original após ser deformado pela aplicação de uma tensão. Com o estudo, constatou-se que existe uma relação entre a quantidade de extrato e o módulo de elasticidade dos filmes. A maior média para o módulo de Young foi obtida com a formulação F50 (25,55 Mpa), seguida pela formulação F40 (18,62 Mpa), no entanto as demais formulações não apresentaram diferenças estatísticas no teste de Tuckey ($p < 0,05$). Esse fenômeno ocorre devido a distribuição das partículas do extrato, que reforçam a matriz polimérica dos filmes (Córdoba et al., 2017). Daouc et al. (2014) estudaram as propriedades mecânicas de filmes de amido de mandioca e de mandioca arbórea, e encontraram valores para o módulo de Young que variaram de 14 a 46,3 MPa (mandioca de mesa) e de 10,9 a 33 MPa (mandioca arbórea). Nesse estudo, os pesquisadores variaram o teor de glicerol nas amostras e constatou-se que existe relação entre a quantidade de glicerol utilizada na formulação e as propriedades mecânicas. Quanto mais glicerol na formulação, menor era o módulo de Young, o alongamento na ruptura e a tensão de ruptura, atribuindo aspecto mais quebradiço aos filmes (Bangyekan; Atht-Ong & Srikulkit, 2006; Daouc et al., 2014).

O alongamento na ruptura é uma propriedade mecânica que mede a capacidade de um material se deformar (alongar) antes de romper sob uma carga de tração. É expresso como a porcentagem do aumento do comprimento original do material no momento em que ele se rompe. Os resultados mostram que a maior média para o alongamento na ruptura foi o da formulação controle (FC) 87,60%, e o menor da formulação F50 (38,62%). Por meio dos valores obtidos, foi possível perceber que a formulação controle, que contém apenas amido, água e glicerol na composição, obteve a maior deformação, indicando que a adição de extrato de córtex de mandioca reduz a capacidade de deformação dos filmes, ou seja, reduz a mobilidade macromolecular. Esse comportamento é frequentemente relatado na bibliografia em filmes que contém extratos e é atribuído ao reforço da matriz polimérica, resultando no aumento do estresse e na diminuição da deformabilidade (Collazo-Bigliardi et al., 2018; González et al., 2022).

Como a nomenclatura sugere, a tensão máxima é o maior valor de tensão que o filme suporta durante o teste, ou seja, indica a resistência do material antes de sofrer a ruptura. De acordo com a Tabela 5 é possível perceber que não houve diferença significativa entre as médias a 5% de probabilidade pelo teste de Tuckey, no entanto a maior média foi a da formulação F50 (1,78 MPa) e a menor 0,99 MPa referente a

formulação F30, embora não tenha havido diferença estatística entre as amostras, a amostra F50 que contém a maior quantidade de extrato foi a que apresentou maior resistência, sugerindo que houve certa influência da proporção de extrato, ainda que não de forma significativa. Santos et al. 2023 obtiveram resultados semelhantes quando avaliaram as propriedades mecânicas de filmes de amido de feijão adicionados de extratos de araçá, butiá e guabiroba, em que a tensões máximas obtidas para os filmes foram de 1,69, 1,42 e 1,81 MPa, respectivamente.

5.3.3 Compostos fenólicos totais e atividade antioxidante dos filmes

A Tabela 6 apresenta, contém os resultados obtidos nas análises de compostos fenólicos totais (TPC) e atividade antioxidante pelos métodos FRAP, ABTS e DPPH dos filmes desenvolvidos. Os compostos fenólicos totais variaram de 61,30 a 187,03 mg EAG/100g, onde a menor média foi encontrada na formulação controle (FC) e a maior média na formulação que contém 50% de extrato em relação a quantidade de amido (F50). As médias foram estatisticamente diferentes entre si pelo teste de Tuckey ($p < 0,05$), sugerindo que a quantidade de extrato colocada na formulação influencia na quantidade de compostos fenólicos da amostra. Santos et al. (2023) encontrou valores de 95,4; 142,9; 422,3 e 123,5 mg EAG/100g para os compostos fenólicos de filmes feitos com amido de feijão adicionados de extratos de araçá, butiá, uvaia e guabiroba respectivamente.

Tabela 6: Compostos fenólicos totais e atividade antioxidante dos filmes.

Parâmetros	FC	F20	F30	F40	F50
CFT (mg EAG/100g)	61,30±0,29 ^e	101,40±0,81 ^d	111,60±0,98 ^c	183,97±0,77 ^b	187,03±1,02 ^a
FRAP (mmol Fe ²⁺ /kg bs)	1,42±0,02 ^e	9,71±0,03 ^d	10,08±0,05 ^c	11,43±0,01 ^b	19,62±0,02 ^a
ABTS•+ (mmol Trolox/kg bs)	4,53±0,01 ^e	10,06±0,07 ^d	11,57±0,02 ^c	12,45±0,05 ^b	12,91±0,03 ^a
DPPH• (mmol Trolox/kg bs)	3,05±0,08 ^e	3,30±0,04 ^d	3,46±0,07 ^c	3,62±0,01 ^b	4,95±0,02 ^a

Os resultados são expressos em média ± desvio padrão. Letras diferentes na linha diferem estatisticamente ($p \leq 0,05$) das médias avaliadas pelo teste de Tukey.

Ao observar a atividade antioxidante, percebe-se que os resultados obtidos pelos métodos FRAP e ABTS foram maiores do que os obtidos com o método DPPH. Em todos os três métodos pôde-se observar que as médias diferiram entre si pelo teste de Tuckey ($p < 0,05$). Sendo assim, observa-se a tendência de aumento da atividade antioxidante

conforme há o aumento da quantidade de extrato dos filmes. Tal comportamento é percebido nos resultados obtidos pelos três métodos de análise. Ainda, a atividade antioxidante teve atividade reduzida nos filmes em comparação aos extratos. Além da diluição do extrato, o filme é uma matriz complexa, e o amido tem alto peso molecular. Assim, quando esses compostos interagem e se complexam, a ação e a biodisponibilidade dos compostos fenólicos podem ser reduzidas, como observado também nos resultados dos compostos fenólicos totais (Staroszczyk et al., 2020; Santos et al., 2023).

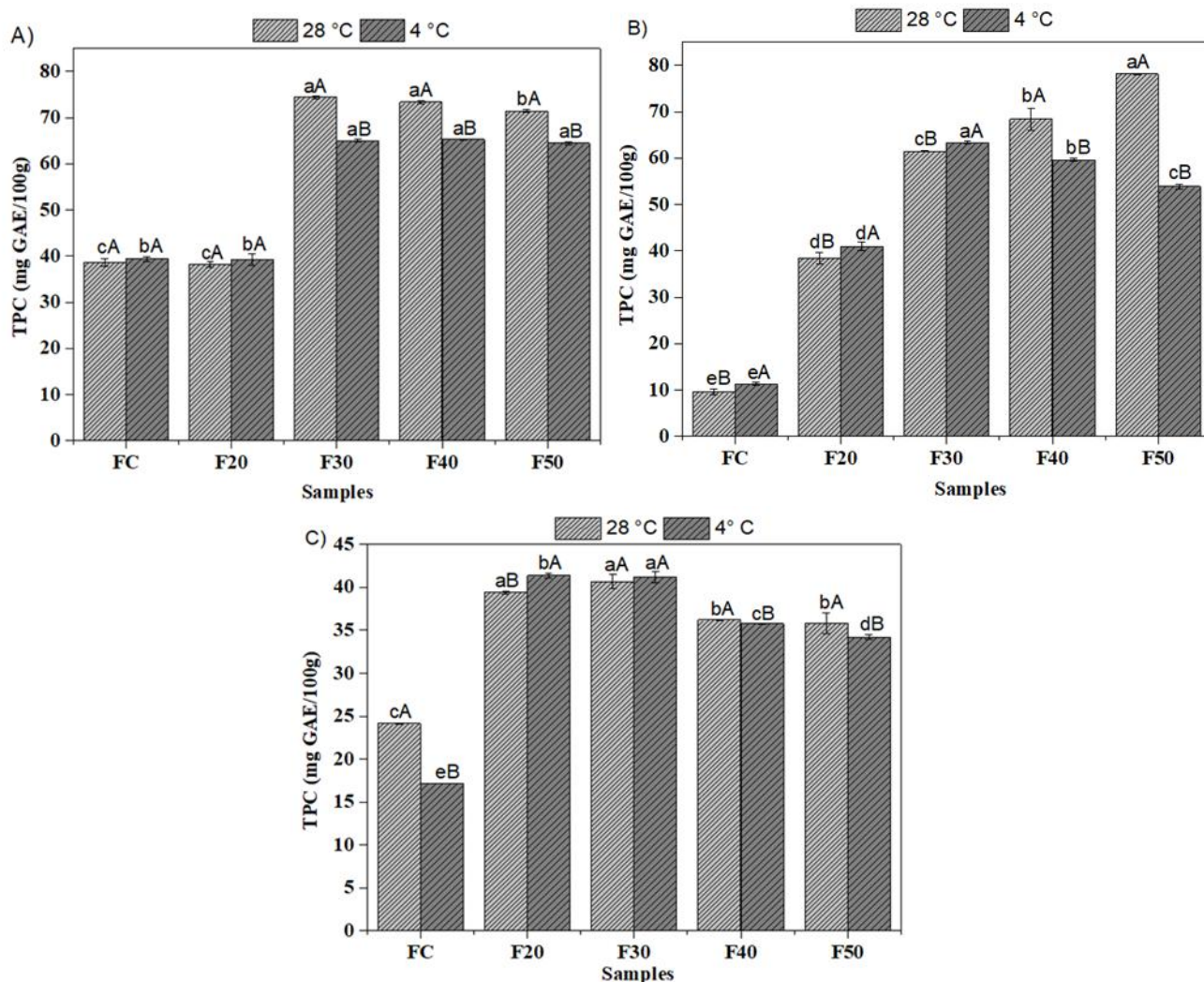
5.3.4 Teste de migração dos filmes

O teste de migração teve como objetivo avaliar quanto dos compostos fenólicos presentes nos filmes migraram para os simuladores de alimentos aquosos, ácidos e gordurosos. Basicamente, esse teste simula quanto desses compostos migrariam para o alimento armazenado no filme em diferentes condições de temperatura e pH. A Figura 4 mostra quanto dos compostos fenólicos migraram para os diferentes meios em 72h nas temperaturas de 28 °C e 4 °C.

Diferentes padrões foram observados nos três simuladores. O meio alcoólico foi o que apresentou as menores médias de liberação de compostos fenólicos, o meio ácido e o meio aquoso foram os que se destacaram quanto à liberação dos compostos fenólicos.

De maneira geral, em todos os filmes foi possível verificar o comportamento de migração dos compostos fenólicos para o simulador, no entanto, não foi possível constatar relação entre a quantidade de extrato nas formulações e aumento ou decréscimo dos níveis de migração.

Figura 4: Teste de migração dos compostos fenólicos dos filmes em meio aquoso, ácido e alcóólico. a) Meio aquoso; b) Meio ácido; c) Meio alcóólico. Legenda: Barras com letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística significativa entre os filmes na mesma temperatura do teste de migração; Barras com letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística significativa entre as temperaturas do teste de migração para mesmo filme.



Na Figura 4A, referente ao meio aquoso, pode-se perceber que na temperatura de 28 °C, os filmes F30 e F40 não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tuckey a 5% de significância, eles obtiveram os maiores resultados de migração dos compostos fenólicos, sendo estes 74,47 e 73,39 mg EAG/100g, seguido da formulação F50 (71,43 mg EAG/100g) e das formulações F20 (38,68 mg EAG/100g) e FC (38,15 mg EAG/100g) que não diferiram estatisticamente entre si. O comportamento de migração na temperatura de 4 °C foi semelhante. Os filmes FC (39,40 mg EAG/100g) e F20 (39,22 mg EAG/100g) tiveram as menores médias e não diferiram estatisticamente entre si, os filmes F30, F40 e F50 obtiveram as maiores médias de migração dos compostos fenólicos totais, 64,98 mg EAG/100g, 65,26 mg EAG/100G e 64,45 mg EAG/100g, respectivamente, e também não diferiram estatisticamente entre si. Com relação a influência das temperaturas, os resultados mostram que os filmes FC e F20 não tiveram seus comportamentos de migração influenciados pela temperatura. Já os filmes F30, F40 e F50 foram influenciados

pela temperatura, de forma que na temperatura de 28°C houve maior migração dos compostos fenólicos do que na temperatura de 4°C.

Com relação ao meio ácido, os resultados de migração dos compostos fenólicos estão apresentados na Figura 4B. Na temperatura de 28°C todas as médias dos resultados da migração dos compostos fenólicos diferiram entre si a nível de 5% de significância pelo teste de Tuckey, sendo o filme FC (9,52 mg EAG/100g) o que apresentou a menor média, indicando que foi o que menos teve migração dos seus compostos fenólicos. O filme F20 (38,50 mg EAG/100g) foi o que teve a segunda menor média, seguido do filme F30 (61,49 mg EAG/100g) e do filme F40 (68,38 mg EAG/100g). O filme F50 foi o que apresentou a maior média 78,14 mg EAG/100g, indicando que foi o filme que mais teve migração de seus compostos fenólicos. O comportamento de migração na temperatura de 4°C foi diferente do observado na temperatura de 28 °C. Ainda que todas as médias também tenham sido estatisticamente diferentes entre si, a formulação F30 foi a que obteve a maior média, 63,37 mg EAG/100g, sendo esta a que teve a maior migração nessa temperatura. Quanto a influência da temperatura na migração dos compostos fenólicos, foi possível observar que os compostos fenólicos tiveram diferentes comportamentos de migração nas diferentes temperaturas analisadas. Nos filmes FC, F20 e F30 os valores de compostos fenólicos totais na temperatura de 28°C foram menores do que na temperatura de 4°C, que foram 11,31, 41,01 e 63,37 mg EAG/100g, respectivamente. Enquanto nas formulações F40 e F50 os valores obtidos foram menores nas temperaturas de 4°C (59,62 e 53,89 mg EAG/100g, respectivamente) do que na de 28°C, indicando que na temperatura mais alta houve maior migração dos compostos fenólicos.

A Figura 4C mostra os comportamentos de migração no meio alcóolico. Tanto na temperatura de 28 °C quanto na de 4 °C, foi possível observar que estes tiveram as menores médias quando comparado aos outros meios circundantes. Na temperatura de 28°C, as médias de compostos fenólicos para os filmes F20 (39,40 mg EAG/100g) e F30 (40,65 mg EAG/100g) não diferiram estatisticamente entre si, e foram as maiores médias, seguidas pelas médias para os filmes F40 936,20 mg EAG/100g) e F50 (35,82 mg EAG/100g), que também não deferiram estatisticamente entre si, sendo o filme FC (24,14 mg EAG/100g), o que teve a menor média. Ademais, na temperatura de 4°C, todas as médias de compostos fenólicos dos filmes diferiram entre si estatisticamente a nível de 5% de significância pelo teste de Tuckey. Sendo o filme F30 (41,37 mg EAG/100g) o que teve a maior média, seguido pelos F20 (41,19 mg EAG/ 100g), F40 (35,80mg EAG/100g), F50 (34,21 mg EAG/100g) e FC. Com exceção do filme F30, o

comportamento de migração de todos os demais sofreu influência da temperatura, de forma que os filmes FC, F40 e F50 na temperatura de 28°C tiveram maior migração dos seus compostos fenólicos, e o filme F20 teve maior migração dos compostos fenólicos na temperatura de 4°C.

Assim, de acordo com os resultados, foi possível perceber que no meio aquoso, na temperatura de 28°C, houve as maiores médias de compostos fenólicos totais para os filmes, indicando assim, que foi o meio onde os filmes apresentaram maior migração. O comportamento de migração pode ser afetado pela composição química, estrutura da matriz e meio circundante (Buonocore et al., 2003), bem como difusão de água, cinética de relaxamento da matriz macromolecular e difusão do composto ativo através da rede polimérica dilatada (Flores et al., 2007; Mastromatteo et al., 2010). Além disso, os filmes produzidos pela técnica de casting podem produzir materiais altamente amorfos, contribuindo para a liberação do composto (Flores et al., 2007), corroborando com a teoria de que a cinética de liberação é influenciada pela estrutura do filme e técnica de elaboração (Conte et al., 2020). A adição de extrato em altas concentrações pode alterar a estrutura da matriz do amido, tornando-a mais rígida ou menos homogênea, aprisionando os compostos bioativos criando assim, barreiras à difusão dos compostos fenólicos (Mali et al., 2006; Resa; Jagus & Gerschenson, 2014).

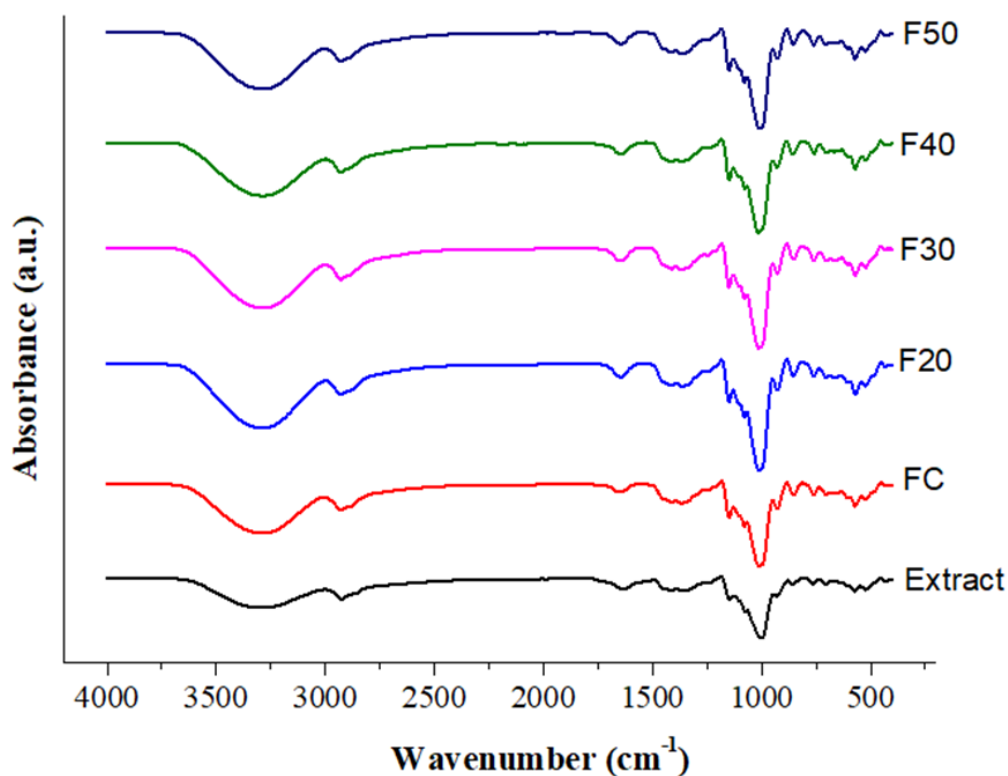
5. 3.5 FT-IR dos filmes

A espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier foi realizada com o objetivo de estudar os grupos funcionais existentes no extrato e nos filmes e analisar as interações nas matrizes poliméricas dos filmes. A Figura 5 mostra os espectros de FT-IR dos filmes desenvolvido e do extrato do córtex da raiz da mandioca, utilizado como agente antioxidante.

As principais bandas observadas no extrato e nos filmes foram as entre 3100 e 3600 cm^{-1} , 2900 cm^{-1} , 1700 e 1600 cm^{-1} , 1150 cm^{-1} , 1050 cm^{-1} e 928 cm^{-1} . As bandas indicam similaridade entre as amostras de filmes, porém com variações na intensidade dos picos, mostrando que não apresentam diferenças significativas em suas estruturas. O enfraquecimento dos picos pode ser observado em todas as formulações, sugerindo que existe interação entre o extrato e a matriz polimérica do filme (Santos et al., 2024). Uma possível explicação para o enfraquecimento das bandas em formulações que contém quantidade considerável de extrato é a de que esses compostos interagem e se complexam,

a ação e a biodisponibilidade dos compostos podem ser reduzidas (Staroszczyk et al., 2020; Santos et al., 2023).

Figura 5: Espectro infravermelho do extrato do córtex de mandioca e dos filmes.

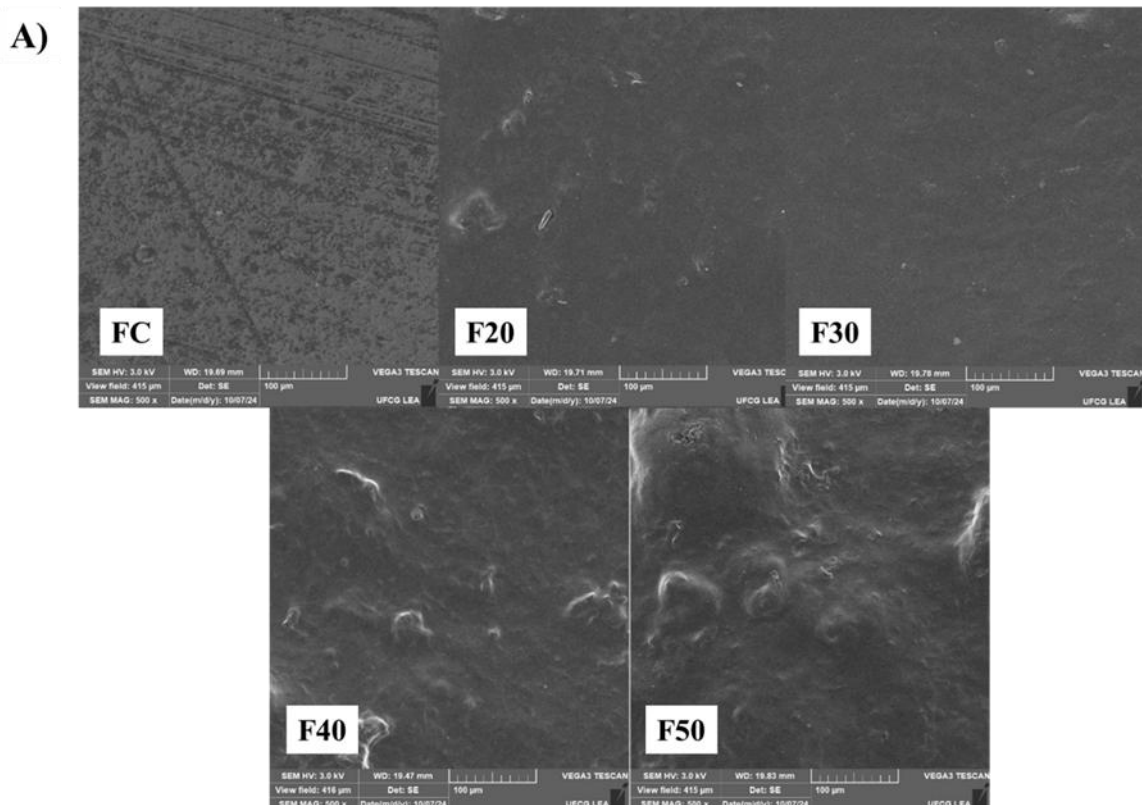


A banda entre 3100 e 3600 cm⁻¹ pode ser atribuída a grupos hidroxila (OH) provenientes do amido e compostos fenólicos do extrato do córtex de mandioca, indicando associação polimérica (Silverstein & Webster, 2007). A banda referente a 2900cm⁻¹ diz respeito ao estiramento do grupo C-H (Costa et al., 2023). As diferenças nas bandas entre 1700 e 1600 podem ser atribuídas às vibrações e alongamento das ligações C=C dos anéis aromáticos dos compostos fenólicos (Pereira; Arruda; Stefani, 2015; González et al., 2022). A banda correspondente a 1150 cm⁻¹ corresponde à deformação das ligações C-O. A banda referente ao comprimento 1050cm⁻¹ diz respeito a estrutura vibratória ou cristalina do amido de mandioca (Klein et al., 2014; Riyajan & Poolyarat, 2023). A banda referente a 928cm⁻¹ representa as ligações glicosídicas do amido, e a sua interação com o glicerol na matriz polimérica (González et al., 2022).

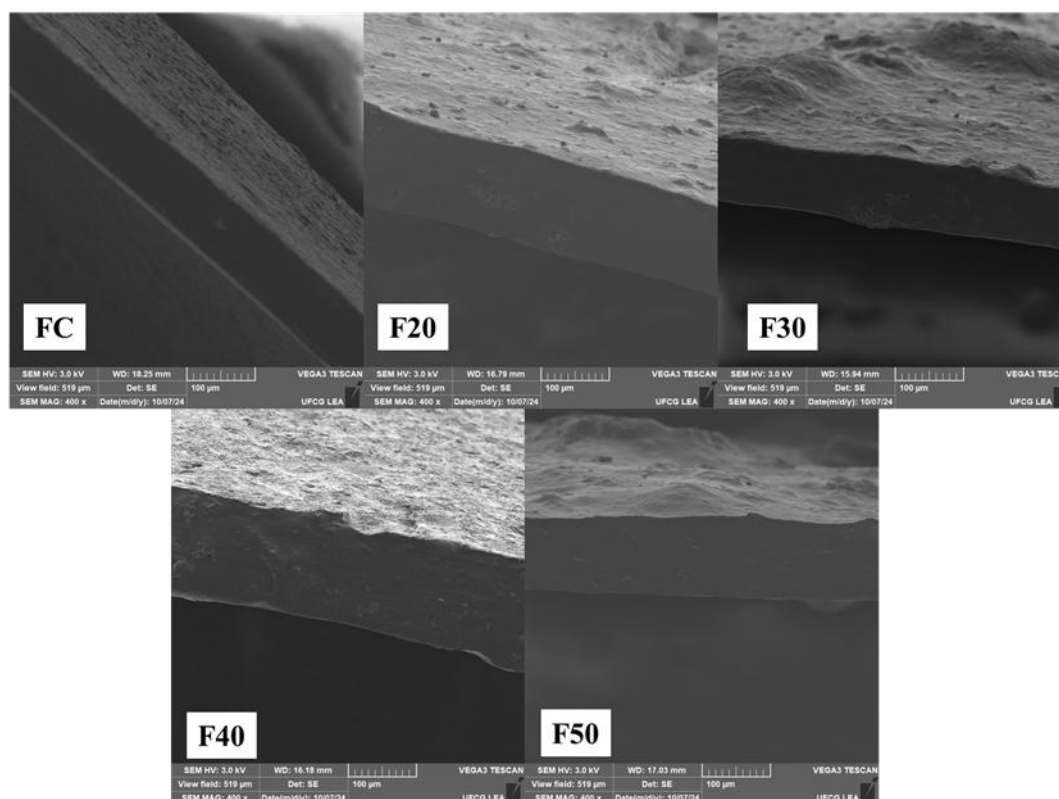
5.3.6 MEV superficial e transversal dos filmes

A Figura 6 contém as micrografias superficiais e transversais dos filmes de amido de mandioca adicionados de extrato de córtex de mandioca liofilizado. Através das imagens é possível perceber que o aumento na proporção de extrato acarretou em mudanças na superfície dos filmes. É possível perceber que as formulações F40 e F50 possuem mais relevos em sua superfície, ao contrário das formulações FC, F30 e F40, possibilitando a associação entre a quantidade de extrato e a formação de relevos na superfície.

Figura 6: Micrografias dos filmes de amido de mandioca adicionados de extrato do córtex de mandioca. A) Micrografias superficiais dos filmes; B) Micrografias transversais dos filmes. FC é a formulação sem extrato, F20 é a formulação com 20% de extrato, F30 é a formulação com 30% de extrato, F40 é a formulação com 40% de extrato e F50 a formulação com 50% de extrato.



B)



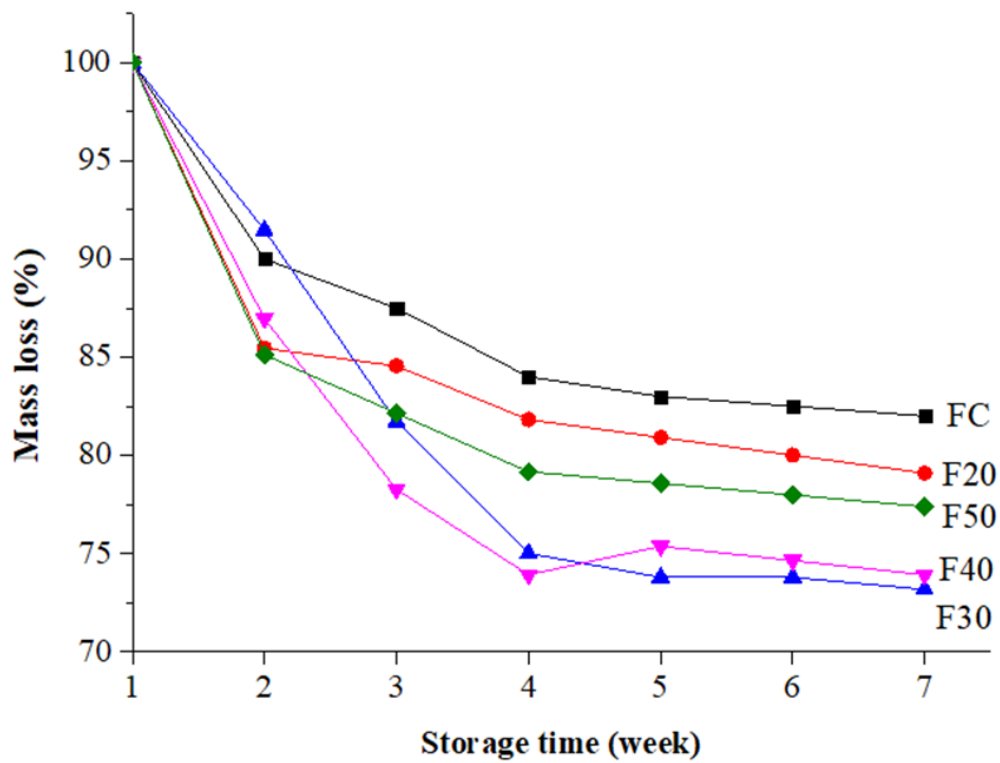
Através da Figura 6 é possível constatar o mesmo comportamento observado nas micrografias superficiais dos filmes. A adição do extrato leva a formação de relevos na estrutura dos filmes, e esse comportamento se intensifica com o aumento da quantidade de extrato na composição. Ainda, pode-se perceber através da micrografia da secção transversal que a superfície é lisa, homogênea e não porosa, indicando que o amido, o glicerol e o extrato foram devidamente fundidos ao filme (Qin et al., 2020; González et al., 2022).

5.3.7 Biodegradabilidade dos filmes

A Figura 7 mostra a perda de massa dos filmes em função do tempo. É possível perceber que todas as formulações obtiveram comportamento semelhante. Ainda, durante a semana 4, a formulação F40 teve um leve ganho de massa, que pode ser explicado pelo contato do filme com o substrato. Apesar de não haver a completa degradação dos filmes, houve diminuição de massa nos dias analisados. Fatores como umidade, pH, temperatura, presença de oxigênio, propriedades mecânicas e térmicas influenciam na biodegradabilidade dos filmes (Nair et al., 2017). Sendo assim, devido a esses fatores não

há como pré-definir um tempo para a degradação total destes (Nair et al., 2017; Ferreira; Molina; Pelissari, 2020)

Figura 7: Perda de massa dos filmes de amido de mandioca adicionados de extrato de córtex de mandioca em função do tempo.



6. CONCLUSÕES

O extrato de córtex de mandioca liofilizado demonstrou alto teor de compostos fenólicos e significativa atividade antioxidante, o que se refletiu nas propriedades dos filmes incorporados com o extrato. Os filmes que possuem as maiores quantidades de compostos fenólicos totais e atividades antioxidantes são os F40 e F50. Observou-se que a adição do extrato reduziu o teor de água dos filmes ao mesmo tempo em que aumentou a solubilidade dos filmes. A permeabilidade ao vapor de água foi baixa, sugerindo que o filme faz uma barreira eficaz à vapores. Ainda, a adição do extrato influenciou as propriedades mecânicas dos filmes, aumentando o módulo de Young e reduzindo o alongamento na ruptura, enquanto a tensão máxima permaneceu inalterada. A coloração dos filmes tornou-se mais intensa com a adição do extrato, aproximando-se da cor do extrato puro.

Os testes de migração confirmaram a liberação de compostos fenólicos dos filmes, com diferentes padrões de liberação dependendo do meio e da temperatura. As análises estruturais indicaram que, apesar das variações na intensidade dos picos, não houve alterações significativas na matriz polimérica. Os filmes apresentaram degradação parcial ao longo de seis semanas, sugerindo potencial biodegradável.

Diante dos resultados, os filmes formulados demonstram potencial para aplicação como materiais ativos e biodegradáveis. Estudos futuros podem explorar propriedades adicionais, como estabilidade térmica e estrutural, além de avaliar a viabilidade de sua aplicação na conservação de alimentos. Ainda, os filmes que apresentaram os resultados mais satisfatórios para sua aplicação como embalagem alimentícia foram o F40 e o F50.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.N. de V.S. ANVISA, RDC N o 51, de 26 de novembro de 2010. Dispõe sobre migração em materiais, embalagens e equipamentos plásticos destinados a entrar em contato com alimentos, in: Diário Of. Da União. Brasília, 2010, pp. 1–15.

A.O.A.C. (2016). *Official methods of analysis of AOAC International (20th ed.)*. Rockville, Maryland, USA: AOAC international.

ADJOURMAN YAO, Désiré et al. Effect of glycerol, peanut oil and soybean lecithin contents on the properties of biodegradable film of improved cassava starches from Côte d'Ivoire. **International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology**, v. 3, n. 4, 2018.

AKINJAYEJU, O.; EKE, L. A.; AKINPELU, A. A. Optimization Of Proximate Compositions, Mineral Profiles, Physico-Chemical And Anti-Nutritional Properties Of Wheat, Pigeon-Pea And Cassava-Cortex Flour Blends For Snack Production. **OSP Journal of Food Science and Nutrition Research**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2020.

ALI, Sameh Samir et al. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. **Science of the Total Environment**, v. 771, p. 144719, 2021.

ALMEIDA, Denise M. et al. Propriedades físicas, químicas e de barreira em filme formados por blenda de celulose bacteriana e fécula de batata. **Polímeros**, v. 23, p. 538-546, 2013.

ALVES, Lucas Repecka et al. Synthesis and characterization of polyurethane and samarium (III) oxide and holmium (III) oxide composites. **Polímeros**, v. 33, n. 4, p. e20230039, 2023.

ASADI-YOUSEFABAD, Seyed Hossein et al. Development of fortified milk with gelled-oil nanoparticles incorporated with cinnamaldehyde and tannic acid. **LWT**, v. 154, p. 112652, 2022.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E96/E96M-16 Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, 2016.

AYYUBI, Shalahudin Nur et al. The effect of composition on mechanical properties of biodegradable plastic based on chitosan/cassava starch/PVA/crude glycerol: Optimization of the composition using Box Behnken Design. **Materials Today: Proceedings**, v. 63, p. S78-S83, 2022.

BALBIO, C., CRUZ, V., & CERQUEIRA, V. Uma visão sobre o atual (e futuro) cenário produtivo de bioplásticos, a partir das ações em Design. 2019.

BALLESTEROS-MÁRTINEZ, Lucio; PÉREZ-CERVERA, Carmen; ANDRADE-PIZARRO, Ricardo. Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film. **NFS journal**, v. 20, p. 1-9, 2020.

BANGYEKAN, Cholwasa; AHT-ONG, Duangdao; SRIKULKIT, Kawee. Preparation and properties evaluation of chitosan-coated cassava starch films. **Carbohydrate polymers**, v. 63, n. 1, p. 61-71, 2006.

BELIBI, P. C. et al. A comparative study of some properties of cassava and tree cassava starch films. **Physics Procedia**, v. 55, p. 220-226, 2014.

BERGO, Paulo Victor Albuquerque et al. Physical properties of edible films based on cassava starch as affected by the plasticizer concentration. **Packaging Technology and Science: An International Journal**, v. 21, n. 2, p. 85-89, 2008.

BHARDWAJ, A.; ALAM, T.; TALWAR, N. Recent advances in active packaging of agri-food products: a review. *Journal of Postharvest Technology*, v. 7, p. 33-62, 2019.

BOKANGA, M. Cyanide detoxification and nutritional changes during cassava (*Manihot esculenta* Crantz) fermentation. *Proceedings of the 8th Symposium of the International Society for Tropical Root Crops*, 30, N.1, p.30-30, 1990.

BORRELLE, Stephanie B. et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. **Science**, v. 369, n. 6510, p. 1515-1518, 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. ANVISA. Resolução RDC n. 263, de 22 de setembro de 2005. Regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 23 set. 2005. Seção 1, p.368-369.

BUONOCORE, GIOVANNA GIULIANA et al. A general approach to describe the antimicrobial agent release from highly swellable films intended for food packaging applications. **Journal of controlled release**, v. 90, n. 1, p. 97-107, 2003.

CANGUSSU, Laís B. et al. Chemical characterization and bioaccessibility assessment of bioactive compounds from umbu (*Spondias tuberosa* A.) fruit peel and pulp flours. **Foods**, v. 10, n. 11, p. 2597, 2021.

CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. F. Tecnologias, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas latino americanas. São Paulo: Fundação Cargill, 2003. v. 3, 711 p

CERVERA, Mirna Fernández et al. Physical stability and moisture sorption of aqueous chitosan–amylose starch films plasticized with polyols. **European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics**, v. 58, n. 1, p. 69-76, 2004.

CHAWLA, Ruchi et al. Physicochemical and biological evaluation of ‘click’ synthesized vinyl epoxide-chitosan film for active food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 282, p. 136816, 2024.

CHEN, H.; LI, L.; MA, Y.; MCDONALD, T. P.; WANG, Y. Development of active packaging film containing bioactive components encapsulated in β -cyclodextrin and its application. **Food Hydrocolloids**, v.90, n.1, p.360-366, 2019.

CHISENGA, Shadrack Mubanga et al. Progress in research and applications of cassava flour and starch: a review. **Journal of food science and technology**, v. 56, p. 2799-2813, 2019.

CHOLLAKUP, Rungsima et al. Antioxidant and antibacterial activities of cassava starch and whey protein blend films containing rambutan peel extract and cinnamon oil for active packaging. **Lwt**, v. 130, p. 109573, 2020.

CIUCĂ, Andreea-Mădălina et al. Marine birds’ plastic ingestion: a first study at the Northwestern Black Sea coast. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, p. 109032, 2024.

COLLAZO-BIGLIARDI, Sofía; ORTEGA-TORO, Rodrigo; CHIRALT BOIX, Amparo. Reinforcement of thermoplastic starch films with cellulose fibres obtained from rice and coffee husks. **Journal of Renewable Materials**, v. 6, n. 6, p. 599-610, 2018.

CONAB. **Análise mensal Abril de 2023**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/busca?searchword=mandioca&searchphrase=all>. Acesso em: 1 nov. 2024.

CONTE, Amalia et al. Study on the influence of bio-based packaging system on sodium benzoate release kinetics. **Foods**, v. 9, n. 8, p. 1010, 2020.

CORRADINI, Elisângela et al. Estudo comparativo de amidos termoplásticos derivados do milho com diferentes teores de amilose. **Polímeros**, v. 15, p. 268-273, 2005.

CREMASCO, Paula Figueiredo M. et al. Effect of dual modification on structural, functional and dielectric properties of cassava starch. **Food Physics**, v. 2, p. 100038, 2025.

DA COSTA, Danusa Silva et al. Technological parameters of cassava starch/carboxymethyl cellulose blend-based films added of soy lecithin and tocopherol mix. **Polymer Testing**, v. 129, p. 108245, 2023.

DAZA, Luis Daniel et al. Chachafruto starch: Physicochemical characterization, film-forming properties, and 3D printability. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 247, p. 125795, 2023.

DE MATOS, Vanderson Eney et al. Investigação industrial sobre o desempenho comparativo entre amidos de milho e mandioca como depressores de ferro na flotação catiônica reversa. 2023.

DE OLIVEIRA, Vinicius Maia et al. Composição fenólica e potencial antioxidante da casca da cebola roxa. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 6, p. 167-181, 2022.

DILKUSHI, H. A. S. et al. Development and characterization of biocomposite films using banana pseudostem, cassava starch and poly (vinyl alcohol): A sustainable packaging alternative. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 7, p. 100472, 2024.

DOS SANTOS CAETANO, Karine et al. Characterization of active biodegradable films based on cassava starch and natural compounds. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 16, p. 138-147, 2018.

DOS SANTOS, Lára Franco et al. Brazilian native fruit pomace as a source of bioactive compounds on starch-based films: Antimicrobial activities and food simulator release. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 242, p. 124900, 2023.

DOS SANTOS, Thais Paes Rodrigues et al. Production of partially gelatinized cassava starch: Effects of preheating temperature and starch concentration on physicochemical characteristics during the spray-drying process. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 9, p. 1486-1494, 2019.

EKUNDAYO, J. A. An Appraisal of Advance in Biotechnology in Central Africa. In: Fungal Biotechnologyeds, Smith, J.E., D.R. Berry and B. Kristiansen (Eds.). Academic Press, London, UK., pp: 243-271, 1980.

ESUMA, Williams et al. Diallel analysis of provitamin A carotenoid and dry matter content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Breeding science**, v. 66, n. 4, p. 627-635, 2016.

EUBIO_Admin. (n.d.). Bioplastics. European Bioplastics e.V. Retrieved June 4, 2024, from <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/>. Acesso em 28 Outubro 2024.

FALUA, Kehinde James et al. Valorization of starch to biobased materials: A review. **Polymers**, v. 14, n. 11, p. 2215, 2022.

FERLAK, Jan; GUZENDA, Weronika; OSMAŁEK, Tomasz. Orodispersible films— Current state of the art, limitations, advances and future perspectives. **Pharmaceutics**, v. 15, n. 2, p. 361, 2023.

FERREIRA, Danielle CM; MOLINA, Gustavo; PELISSARI, Franciele M. Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. **Composites Part B: Engineering**, v. 183, p. 107682, 2020.

FERREIRA, Poliana Sander; ALMEIDA, Eveline Lopes. AMIDO – UMA ABORDAGEM ACERCA DA COMPOSIÇÃO, ESTRUTURA, PROPRIEDADES, MODIFICAÇÃO E APLICAÇÃO. In: MEDEIROS, Jackson Andson de; NIRO, Carolina Madazio. Produção Animal e Vegetal: “Produção Animal e Vegetal: Inovações e Atualidades. Jardim do Seridó: Agron Food Academy, 2022. Cap. 79. p. 892-908.

FLORES, Silvia et al. Mass transport properties of tapioca-based active edible films. **Journal of Food Engineering**, v. 81, n. 3, p. 580-586, 2007.

FRANCISCO, Camila Botin et al. Shelf-life of guavas coated with biodegradable starch and cellulose-based films. **International journal of biological macromolecules**, v. 152, p. 272-279, 2020.

FRIEDRICHSEN, Jéssica Souza Alves et al. O uso de amido como proposta para embalagens biodegradáveis—Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e282111436449-e282111436449, 2022.

GAMA, Cristina Luiz et al. Caracterização do extrato hidroalcoólico de folhas da pitangueira (*Eugenia uniflora* L.) de cultivo hidropônico quanto à capacidade antioxidante e potencial antimicrobiano. **Braz. J. Dev**, v. 8, p. 4316-4331, 2022.

GÓMEZ-GUILLÉN, M. C. et al. Fish gelatin: a renewable material for developing active biodegradable films. **Trends in Food Science & Technology**, v. 20, n. 1, p. 3-16, 2009.

GUNATHILAKE, IADSR; SOMENDRIKA, M. A. D. Development of a biodegradable packaging with antimicrobial properties from cassava starch by incorporating *Ocimum tenuiflorum* extract. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100658, 2024.

GUTIÉRREZ, Tomy J. et al. Influence of beet flour on the relationship surface-properties of edible and intelligent films made from native and modified plantain flour. **Food Hydrocolloids**, v. 54, p. 234-244, 2016.

HASMADI, M. et al. Extraction and characterisation of cassava starch cultivated in different locations in Sabah, Malaysia. **Food Res**, v. 5, n. 3, p. 44-52, 2021.

HERNÁNDEZ-GARCÍA, Eva; VARGAS, Maria; CHIRALT, Amparo. Thermoprocessed starch-polyester bilayer films as affected by the addition of gellan or xanthan gum. **Food Hydrocolloids**, v. 113, p. 106509, 2021.

HORN, Marília M.; MARTINS, Virginia CA; PLEPIS, Ana MG. Effect of Amylopectin Content on Mechanical, Barrier and Thermal Properties of Plasticized Starch/Chitosan Films. **Polysaccharides**, v. 4, n. 3, p. 208-218, 2023.

HORNUNG, Polyanna Silveira et al. Brazilian Amazon white yam (*Dioscorea* sp.) starch: Impact on functional properties due to chemical and physical modifications processes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 134, p. 2075-2088, 2018.

HU, Yifeng et al. The current progress of tandem chemical and biological plastic upcycling. **Biotechnology Advances**, p. 108462, 2024.

INFANTE, Juliana et al. Antioxidant and anti-inflammatory activities of unexplored Brazilian native fruits. **PLoS One**, v. 11, n. 4, p. e0152974, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152974>

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. 4ª Ed. São Paulo: IAL, 2008. p. 98.

JAFARI, Seid Mahdi; RASHIDINEJAD, Ali; SIMAL-GANDARA, Jesus (Ed.). **Handbook of Food Bioactive Ingredients: Properties and Applications**. Springer Nature, 2023.

JAYARATHNA, Shishanthi; ANDERSSON, Mariette; ANDERSSON, Roger. Recent advances in starch-based blends and composites for bioplastics applications. **Polymers**, v. 14, n. 21, p. 4557, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14214557>

KAISANGSRI, Nattapon; KERDCHOECHUEN, Orapin; LAOHAKUNJIT, Natta. Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan. **Industrial Crops and Products**, v. 37, n. 1, p. 542-546, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.07.034>

KHALID, Saud et al. Development and characterization of biodegradable antimicrobial packaging films based on polycaprolactone, starch and pomegranate rind hybrids. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 18, p. 71-79, 2018.

KJAER, Frederik Dalgaard; JOLY, François-Xavier. Biodegradable waste does not always degrade faster than plastic. **Waste Management**, v. 191, p. 117-122, 2025.

KLEIN, Bruna et al. Ozone oxidation of cassava starch in aqueous solution at different pH. **Food chemistry**, v. 155, p. 167-173, 2014.

KNOBLAUCH, Doris; MEDERAKE, Linda. Government policies combatting plastic pollution. **Current opinion in toxicology**, v. 28, p. 87-96, 2021.

KUMAR, Raj; GHOSHAL, Gargi; GOYAL, Meenakshi. Moth bean starch (*Vigna aconitifolia*): isolation, characterization, and development of edible/biodegradable films. **Journal of food science and technology**, v. 56, p. 4891-4900, 2019.

KUMAR, Rakesh et al. Micro (nano) plastics pollution and human health: How plastics can induce carcinogenesis to humans?. **Chemosphere**, v. 298, p. 134267, 2022.

LEAL, Ingrid Lessa et al. Development and application starch films: PBAT with additives for evaluating the shelf life of Tommy Atkins mango in the fresh-cut state. **Journal of applied polymer science**, v. 136, n. 43, p. 48150, 2019.

LI, Siying et al. Cassava starch/carboxymethylcellulose edible films embedded with lactic acid bacteria to extend the shelf life of banana. **Carbohydrate Polymers**, v. 248, p. 116805, 2020.

LI, Wenlu et al. Impacts of microplastics addition on sediment environmental properties, enzymatic activities and bacterial diversity. **Chemosphere**, v. 307, p. 135836, 2022.

LIMA, Andréa Trigueiro et al. Effect of Chitosan Concentration, Glycerol and Cashew Peel Extract on the Physical, Mechanical and Morphological Properties of Starch-Based Films. **Packaging Technology and Science**, v. 37, n. 10, p. 1003-1015, 2024.

LIU, Huihua et al. Preparation and characterization of glycerol plasticized (high-amylose) starch–chitosan films. **Journal of Food Engineering**, v. 116, n. 2, p. 588-597, 2013.

LÓPEZ-CÓRDOBA, Alex et al. Cassava starch films containing rosemary nanoparticles produced by solvent displacement method. **Food Hydrocolloids**, v. 71, p. 26-34, 2017.

LUCHESE, Cláudia Leites; SPADA, Jordana Corralo; TESSARO, Isabel Cristina. Starch content affects physicochemical properties of corn and cassava starch-based films. **Industrial Crops and Products**, v. 109, p. 619-626, 2017.

MACHADO, B.A.S. Desenvolvimento e caracterização de filmes flexíveis de amido de mandioca com nanocelulose de coco. 2011. 161f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Alimentos) – Faculdade de Farmácia, Universidade Federal da Bahia, BA.

MAGEL, Elisabeth. Qualitative and quantitative determination of starch by a colorimetric method. **Starch-Stärke**, v. 43, n. 10, p. 384-387, 1991.

MALI, S., et al.. "Starch-based films: Physical and mechanical properties as affected by plasticizer concentration." *Journal of Food Engineering*, 78(3), 941-946, 2006.

MARFELLA, Raffaele et al. Microplastics and nanoplastics in atheromas and cardiovascular events. *New England Journal of Medicine*, v. 390, n. 10, p. 900-910, 2024.

MARICHELVAM, M. K.; JAWAID, Mohammad; ASIM, Mohammad. Corn and rice starch-based bio-plastics as alternative packaging materials. *Fibers*, v. 7, n. 4, p. 32, 2019.

MASTROMATTEO, Marcella et al. Advances in controlled release devices for food packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, v. 21, n. 12, p. 591-598, 2010..

MBACHU, Oluchi et al. The rise of artificial soil carbon inputs: Reviewing microplastic pollution effects in the soil environment. *Science of the Total Environment*, v. 780, p. 146569, 2021.

MOHD NAWI, Norazlina; MUHAMAD, Ida Idayu; MOHD MARSIN, Aishah. The physicochemical properties of microwave-assisted encapsulated anthocyanins from *Ipomoea batatas* as affected by different wall materials. *Food science & nutrition*, v. 3, n. 2, p. 91-99, 2015.

MORALES, Francisco J.; JIMÉNEZ-PÉREZ, Salvio. Free radical scavenging capacity of Maillard reaction products as related to colour and fluorescence. *Food chemistry*, v. 72, n. 1, p. 119-125, 2001.

MORATH, B. et al. Orodispersible films—recent developments and new applications in drug delivery and therapy. *Biochemical Pharmacology*, v. 200, p. 115036, 2022.

MOSHOOD, Taofeeq D. et al. Sustainability of biodegradable plastics: New problem or solution to solve the global plastic pollution?. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, v. 5, p. 100273, 2022.

MURTHY, Jasti Sri Vishnu et al. Harnessing insects mediated plastic biodegradation: Current insight and future directions. *Journal of Environmental Management*, v. 372, p. 123038, 2024.<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123038>.

NAIR, N. R.; SEKHAR, V. C.; NAMPOOTHIRI, K. M.; PANDEY, A. Biodegradação Najjingo, E., Byakika, S., & Mukisa, I. M. (2024). Physical properties, nutritional profile, and consumer acceptability of gluten-free breakfast flakes from cassava flour. *Applied Food Research*, 4(2), 100541.

NELSON, David L.; COX, Michael M. **Princípios de bioquímica de Lehninger**. Artmed Editora, 2022.

NUNES, Graciele Lorenzoni et al. Microencapsulation of freeze concentrated *Ilex paraguariensis* extract by spray drying. **Journal of Food Engineering**, v. 151, p. 60-68, 2015.

NUNES, Luciano Bastos; SANTOS, W. de J.; CRUZ, Renato Souza. Rendimento de Extração e Caracterização química e funcional de féculas de mandioca da região do semi-árido baiano. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 20, n. 1, p. 129-134, 2009.

OCHOA-YEPES, Oswaldo et al. Influence of process (extrusion/thermo-compression, casting) and lentil protein content on physicochemical properties of starch films. **Carbohydrate polymers**, v. 208, p. 221-231, 2019.

OMAH, E. C.; OKAFOR, G.I. Production and Quality Evaluation of Cookies from Blends of Millet-Pigeon Pea Composite Flour and Cassava Cortex. *Journal of Food Resource Science*, v.1, n.1, p.1-10, 2015

OTÁLORA GONZÁLEZ, Carlos M. et al. Cassava starch films with anthocyanins and betalains from agroindustrial by-products: Their use for intelligent label development. **Foods**, v. 11, n. 21, p. 3361, 2022.

PEDRI, Eliane Cristina Moreno de et al. Características morfológicas e culinárias de etnovariedades de mandioca de mesa em diferentes épocas de colheita. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, p. e2018073, 2018.

PERERA, Kalpani Y.; JAISWAL, Amit K.; JAISWAL, Swarna. Biopolymer-based sustainable food packaging materials: challenges, solutions, and applications. **Foods**, v. 12, n. 12, p. 2422, 2023.

PIETRZYK, Sławomir et al. Influence of amylose content and oxidation level of potato starch on acetylation, granule structure and radicals' formation. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 106, p. 57-67, 2018.

PLAEYAO, Kittiya et al. Biodegradable antibacterial food packaging based on carboxymethyl cellulose from sugarcane bagasse/cassava starch/chitosan/gingerol extract stabilized silver nanoparticles (Gin-AgNPs) and vanillin as cross-linking agent. **Food Chemistry**, p. 142102, 2024.<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142102>.

RASHIDINEJAD, Ali et al. Assessment of Various Food Proteins as Structural Materials for Delivery of Hydrophobic Polyphenols Using a Novel Co-Precipitation Method. **Molecules**, v. 28, n. 8, p. 3573, 2023.

RIYAJAN, Sa-Ad; POOLYARAT, Nopporn. Cassava starch with ozone amendment and its blend: Fabrication and properties for fruit packaging application. **Industrial Crops and Products**, v. 201, p. 116886, 2023.

RODRIGUES, Thais Jaciane Araujo et al. Optimized extraction of pectin from cassava root cortex: evaluating aqueous and acidic methods. **Journal of Food Measurement and Characterization**, p. 1-15, 2024.

SAHRAEIAN, Shahriyar; ABDOLLAHI, Behrokh; RASHIDINEJAD, Ali. Biopolymer-polyphenol conjugates: Novel multifunctional materials for active packaging. **International journal of biological macromolecules**, p. 135714, 2024.

SANTACRUZ, Stalin; CASTRO, Marlon. Viability of free and encapsulated *Lactobacillus acidophilus* incorporated to cassava starch edible films and its application to Manaba fresh white cheese. **LWT**, v. 93, p. 570-572, 2018.

SANTANA, Maria Cecília Castelo Branco de *et al.* Incorporação de urucum como aditivo antioxidante em embalagens biodegradáveis a base de quitosana. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 544-550, mar. 2013.

SANTOS, Newton Carlos et al. Effect of Ultrasound and Freeze-Drying to Enhance the Extraction of Phenolic Compounds in Dragon Fruit Peels and Apply Them in Edible Starch-Based Films. **Packaging Technology and Science**, v. 37, n. 9, p. 901-916, 2024.

SARPONG, Nana Yaa Serwaah et al. A Machine Learning-Driven Modeling and Optimization Approach for Enhancing Cassava Mash Production Quality in Cassava Graters. 2024.

SAHRAEIAN, Shahriyar; ABDOLLAHI, Behrokh; RASHIDINEJAD, Ali. Biopolymer-polyphenol conjugates: Novel multifunctional materials for active packaging. **International journal of biological macromolecules**, p. 135714, 2024.

SGANZERLA, William Gustavo et al. Bioactive food packaging based on starch, citric pectin and functionalized with *Acacia senegal* waste by-product: Characterization and application in the postharvest conservation of apple. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 147, p. 295-303, 2020.

SHARMA, Natasha et al. Evaluation of anthocyanin content, antioxidant potential and antimicrobial activity of black, purple and blue colored wheat flour and wheat-grass juice against common human pathogens. **Molecules**, v. 25, n. 24, p. 5785, 2020.

SHI, Ce et al. Fortification of cassava starch edible films with *Litsea cubeba* essential oil for chicken meat preservation. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 276, p. 133920, 2024.

SILVA, D. L.; FERREIRA, J. A.; CARVALHO, C. W. P. "Influência do processamento na composição e propriedades do amido de mandioca. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 37, n. 4, pp. 482-487, 2017.

SILVERSTEIN, Robert Milton; WEBSTER, Francis X.; KIEMLE, David J. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos (7a. Grupo Gen-LTC)**, 2010.

SOHANY, Mouluda et al. Characterization of anthocyanin associated purple sweet potato starch and peel-based pH indicator films. **Foods**, v. 10, n. 9, p. 2005, 2021.

STAROSZCZYK, Hanna et al. Fish gelatin films containing aqueous extracts from phenolic-rich fruit pomace. **Lwt**, v. 117, p. 108613, 2020.

SUDERMAN, N.; ISA, M. I. N.; SARBON, N. M. Characterization on the mechanical and physical properties of chicken skin gelatin films in comparison to mammalian gelatin films. In: **IOP conference series: Materials science and engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 012033.

TAFA, Teklu Gadisa; ENGIDA, Adam Mekonnen. Preparation of green film with improved physicochemical properties and enhanced antimicrobial activity using ingredients from cassava peel, bamboo leaf and rosemary leaf. **Heliyon**, v. 8, n. 8, 2022.

TAMANINI, Fabio et al. Starch Orodispersible Film Loaded with Melatonin for Human Supplementation. **Journal of Renewable Materials**, v. 12, n. 7, 2024.

TAN, Xiqian et al. The physicochemical properties of Cassava Starch/Carboxymethyl cellulose sodium edible film incorporated of Bacillus and its application in salmon fillet packaging. **Food Chemistry: X**, p. 101537, 2024.

TAO, Yuan et al. Structural changes of starch subjected to microwave heating: A review from the perspective of dielectric properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 99, p. 593-607, 2020.

TRAN, Phuong Trang Thi et al. Characterization of microencapsulated powders rich in saponins from cocoa pod husk (*Theobroma cacao* L.) and medicinal plant An xoa (*Helicteres hirsuta* Lour.). **Heliyon**, 2024.

TWEYONGYERE, R.; KATONGOLE, I. Cyanogenic potential of cassava peels and their detoxification for utilization as livestock feed. *Veterinary and Human Toxicology*, v.44, n.1, p.366-369, 2002.

TUMWINE, Gerald; ASHIMWE, Amos. Effect of barrel temperature and blending ratio on the sensory and physical properties of cassava-extruded snacks. **Cogent Food & Agriculture**, v. 5, n. 1, p. 1633795, 2019.

VANIER, Nathan Levien et al. Characteristics of starch from different bean genotypes and its effect on biodegradable films. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 3, p. 1207-1214, 2019.

VIEIRA, Agdylannah Felix. EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AMIDOS DE DIFERENTES FONTES VEGETAIS E USO EM PRODUTO ALIMENTÍCIO. 2019. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

VONGHIRUNDECHA, Phanita et al. Microencapsulated functional ingredients from a *Moringa oleifera* leaf polyphenol-rich extract: Characterization, antioxidant properties, in vitro simulated digestion, and storage stability. **LWT**, v. 154, p. 112820, 2022.

WANG, Xingchi et al. Preparation and characterization of antioxidant and pH-sensitive films based on chitosan and black soybean seed coat extract. **Food hydrocolloids**, v. 89, p. 56-66, 2019.

WATERHOUSE, A. Folin-ciocalteau micro method for total phenol in wine. **American Journal of Enology and Viticulture**, p. 3-5, 2006.

XANTHOS, Dirk; WALKER, Tony R. International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. **Marine pollution bulletin**, v. 118, n. 1-2, p. 17-26, 2017.

XU, Yingran et al. A novel dual-channel cassava starch/polyvinyl alcohol-based film for visual monitoring of shrimp freshness. **Carbohydrate Polymers**, v. 335, p. 122107, 2024.

YAN, Xuewen et al. Development and Optimization of New Scintillatinon Gel Material for Radiotherapy Dose Measurement. **Atomic Energy Science and Technology**, v. 55, n. zengkan2, p. 414, 2021.

YANG, Boran et al. Developing microencapsulated powders containing polyphenols and pectin extracted from Georgia-grown pomegranate peels. **Lwt**, v. 154, p. 112644, 2022.

YI, Meiling et al. The effects of three different microplastics on enzyme activities and microbial communities in soil. **Water Environment Research**, v. 93, n. 1, p. 24-32, 2021.

YONG, Huimin et al. Development of antioxidant and intelligent pH-sensing packaging films by incorporating purple-fleshed sweet potato extract into chitosan matrix. **Food hydrocolloids**, v. 90, p. 216-224, 2019.

ZHANG, Lin et al. Microbiome-wide association studies reveal correlations between the structure and metabolism of the rhizosphere microbiome and disease resistance in cassava. **Plant biotechnology journal**, v. 19, n. 4, p. 689-701, 2021.

ZHANG, Jiayu et al. A salient feature establishment tactic for cassava disease recognition. **Artificial Intelligence in Agriculture**, 2024.

ZHAO, Wei et al. Impacts of plastic pollution on soil–plant properties and greenhouse gas emissions in wetlands: A meta-analysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 480, p. 136167, 2024.

ZHU, Fan. Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. **Carbohydrate polymers**, v. 122, p. 456-480, 2015.

ŻOŁEK-TRYZNOWSKA, Zuzanna; KAŁUŻA, Alicja. The influence of starch origin on the properties of starch films: packaging performance. **Materials**, v. 14, n. 5, p. 1146, 2021.