



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS

GLEYDE ANNY CRUZ BARROS

USO DA LIGNINA DE COPRODUTO DO PEDÚNCULO DO CAJU COMO ATIVO
DE FILMES À BASE DE AMIDO DE MILHO COM PROPRIEDADE DE BLOQUEIO
DA RADIAÇÃO UV

FORTALEZA

2026

GLEYDE ANNY CRUZ BARROS

USO DA LIGNINA DE COPRODUTO DO PEDÚNCULO DO CAJU COMO ATIVO
DE FILMES À BASE DE AMIDO DE MILHO COM PROPRIEDADE DE BLOQUEIO
DA RADIAÇÃO UV

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Produtos de Origem Vegetal.

Orientador: Profa. Dra. Luciana de Siqueira Oliveira

FORTALEZA

2026

GLEYDE ANNY CRUZ BARROS

USO DA LIGNINA DE COPRODUTO DO PEDÚNCULO DO CAJU COMO ATIVO
DE FILMES À BASE DE AMIDO DE MILHO COM PROPRIEDADE DE BLOQUEIO
DA RADIAÇÃO UV

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Produtos de Origem Vegetal.

Orientador: Profa. Dra. Luciana de Siqueira Oliveira

Aprovado em 28/01/2026

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Luciana de Siqueira Oliveira (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (Departamento de Engenharia de Alimentos -
DEAL/UFC)

Dr. Sérgio Dantas de Oliveira Júnior
Embrapa Amazônia Ocidental

Profa. Dra. Mayra Garcia Maia Costa
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - Unilab

A frase mais humilde que posso dizer é que “sem Deus eu não sou nada”.

Mas a mais poderosa é “com Ele tudo posso”.

Obrigada Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força e coragem para chegar até aqui e alcançar minha meta. Embora tenha sido um caminho difícil, sei que sem a ajuda dele, nada seria possível. Aos meus pais, por terem me dado todas as oportunidades de estudos, se cheguei até aqui, foi por causa do incentivo deles. Ao meu namorado, Rômulo Neves, sou grata por seu companheirismo, amizade, pelo colo e por entender quando estava super ocupada com a escrita dessa dissertação.

Agradeço imensamente à Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Departamento de Engenharia de Alimentos pelo apoio e pela oportunidade de concretizar essa etapa importante da minha trajetória profissional. À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pela concessão da bolsa, fundamental para a concretização desta pesquisa.

À Embrapa Agroindústria Tropical pela infraestrutura e apoio técnico, em especial à Dra. Socorro Bastos e ao Adriano Lincoln por sua rica contribuição nas análises. À professora Dra. Maria Valdez, do Departamento de Engenharia Química – UFC, pela doação da lignina do coproduto do pedúnculo do caju, matéria-prima esta que é o ativo mais importante desta pesquisa.

Aos amigos que fiz nessa jornada, no convívio diário com todos do Laboratório de Controle de Qualidade e Secagem de Alimentos da UFC (LACONSA), em especial à coordenadora profa. Andrea, ao técnico Dilson que foi muito prestativo (e muito amigo) durante as minhas análises, à minha querida amiga Elisabeth, Lara, Lorena, Nyanne, Susan, Lauanna, Amélia, Igor, Lucas, Joabson e especialmente à minha orientadora Professora Dra. Luciana de Siqueira por toda paciência e ensinamentos. Gratidão!

Por fim, mas não menos importante gratidão a todas as pessoas que de alguma forma me transmitiram coragem e confiança ao longo destes 2 anos de curso.

RESUMO

A radiação ultravioleta (UV) pode acelerar processos oxidativos em alimentos, comprometendo características sensoriais e nutricionais. Como estratégia para minimizar esses efeitos, têm sido desenvolvidos materiais de embalagem com capacidade de bloqueio da luz UV, bem como embalagens ativas que atuam no sequestro de radicais livres. Nesse contexto, biopolímeros biodegradáveis e de baixo custo, como a lignina, têm recebido atenção crescente. Este estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar biofilmes à base de amido de milho com incorporação de lignina extraída de resíduos do processamento do pedúnculo de caju, visando à sua aplicação potencial em embalagens ativas para alimentos. Filmes contendo 1, 3 e 5% (m/m) de lignina foram preparados pelo método de *casting* e avaliados quanto à reologia, propriedades mecânicas, cor, hidrofobicidade, propriedades de bloqueio UV, atividade antioxidante, biodegradabilidade e reciclabilidade. As soluções filmogênicas apresentaram comportamento reológico não newtoniano do tipo pseudoplástico ($n < 1$), com diminuição da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento, sendo os dados adequadamente descritos pelo modelo da Lei da Potência. A presença de lignina promoveu alterações nas propriedades estruturais dos filmes, com redução da resistência à tração dos filmes (13,89 para 6,32 MPa) e aumento da elongação na ruptura (29,04 para até 57%), indicando maior flexibilidade e deformabilidade da matriz polimérica com o aumento da concentração de lignina. Observou-se escurecimento progressivo da matriz, com redução da luminosidade (L^*) e aumento das tonalidades avermelhadas e amareladas. Além disso, a adição de lignina aumentou significativamente a hidrofobicidade dos filmes, reduzindo a absorção de água de 86,32% (controle) para 68,64% (3% de lignina) e elevando o ângulo de contato de 68,62° para 77°. As isotermas de sorção apresentaram comportamento do tipo III e foram adequadamente ajustadas pelos modelos de GAB e Peleg nas temperaturas de 25 e 35 °C. Os filmes contendo 3% e 5% de lignina bloquearam completamente a radiação UV, enquanto a atividade antioxidante aumentou proporcionalmente ao teor de lignina. A biodegradação variou de 33% a 46% após 35 dias, e os filmes com 1% e 3% de lignina apresentaram reciclabilidade eficaz, mantendo suas propriedades antioxidantes e de bloqueio UV após o reprocessamento. Esses resultados demonstram que a lignina proveniente do pedúnculo de caju constitui um componente sustentável promissor

para o desenvolvimento de materiais de embalagem ativa multifuncionais, com potencial para proteger os alimentos contra a degradação foto-oxidativa e contribuir para prolongar a vida de prateleira.

Palavras-chave: embalagens ativas para alimentos; propriedade de bloqueio UV; filmes à base de amido; lignina; atividade antioxidante.

ABSTRACT

Ultraviolet (UV) radiation can accelerate oxidative processes in foods, compromising their sensory and nutritional characteristics. As a strategy to minimize these effects, packaging materials with UV-blocking capacity, as well as active packaging capable of scavenging free radicals, have been increasingly developed. In this context, biodegradable and low-cost biopolymers, such as lignin, have attracted growing attention. This study aimed to develop and characterize corn starch-based biofilms incorporated with lignin extracted from residues of cashew peduncle processing, aiming at their potential application in active food packaging. Films containing 1, 3, and 5% (w/w) lignin were prepared using the casting method and evaluated for rheology, mechanical properties, color, hydrophobicity, UV-blocking properties, antioxidant activity, biodegradability, and recyclability. The film-forming solutions exhibited non-Newtonian pseudoplastic rheological behavior ($n < 1$), with viscosity decreasing as shear rate increased, and the data were adequately described by the Power Law model. The presence of lignin promoted changes in the structural properties of the films, with a reduction in tensile strength (from 13.89 to 6.32 MPa) and an increase in elongation at break (from 29.04 to up to 57%), indicating greater flexibility and deformability of the polymer matrix as lignin concentration increased. Progressive darkening of the films was also observed, with a reduction in lightness (L^*) and an increase in reddish and yellowish tones. Furthermore, lignin addition significantly increased the hydrophobicity of the films, reducing water absorption from 86.32% (control) to 68.64% (3% lignin) and increasing the contact angle from 68.62° to 77° . Sorption isotherms showed type III behavior and were satisfactorily fitted by the GAB and Peleg models at 25 and 35 °C. Films containing 3% and 5% lignin completely blocked UV radiation, while antioxidant activity increased proportionally with lignin content. Biodegradation ranged from 33% to 46% after 35 days, and films containing 1% and 3% lignin showed effective recyclability, maintaining their antioxidant and UV-blocking properties after reprocessing. These results demonstrate that lignin derived from cashew peduncle residues is a promising sustainable component for the development of multifunctional active packaging materials, with strong potential to protect foods against photo-oxidative degradation and contribute to extending shelf life.

Keywords: Active food packaging; UV-blocking properties; starch-based films; lignin; antioxidant activity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diferentes categorias de polímeros - sintéticos e naturais.....	13
Figura 2	Representação das estruturas químicas das frações de (a) amilose e (b) amilopectina.....	16
Figura 3	Estrutura dos álcoois, (a) álcool cumarílico, (b) álcool coniferílico e (c) álcool sinapílico precursores de lignina.....	18
Figura 4	Principais funções de embalagens ativas para alimentos.....	20
Figura 5	Diferentes categorias de radiação ultravioleta (UV-A, UV-B, UV-C) e sua posição no espectro eletromagnético.....	22
Figura 6	Fluxograma para o desenvolvimento dos filmes de amido de milho com incorporação de diferentes percentuais de lignina do pedúnculo de caju.....	25
Figura 7	Comportamento reológico em relação a viscosidade aparente pela taxa de cisalhamento (a) e tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento (b) de soluções filmogênicas de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju.....	33
Figura 8	Imagens representativas dos filmes elaborados com amido de milho e diferentes concentrações (% m/m) de lignina do pedúnculo de caju: 0%, 1%, 3% e 5%	36
Figura 9	Isotermas de sorção dos filmes de amido de milho e incorporados com diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju a 25°C (A) e 35°C (B).....	47
Figura 10	Espectros de absorção UV-vis de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju.....	49
Figura 11	Espectros de FTIR de filmes compostos por amido de milho e lignina do pedúnculo de caju.....	53
Figura 12	Curvas de DSC de filmes compostos por amido de milho e lignina do pedúnculo de caju.....	54
Figura 13	Microscopias obtidas por MEV de filmes compostos por amido de milho e lignina do pedúnculo de caju.....	56
Figura 14	Análise visual da biodegradação de filmes em solo.....	58

Figura 15 Perda de peso percentual dos filmes por um período de 35 dias. 58

Figura 16 Reciclabilidade de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju..... 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Filmes bloqueadores de UV à base de biopolímeros em aplicações de embalagens ativas.....	24
Tabela 2	Combinações adotadas para as formulações das soluções filmogênicas.....	26
Tabela 3	Índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e índice de estabilidade (R^2) de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju.....	34
Tabela 4	Cor de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju.....	38
Tabela 5	Parâmetros das espessuras e propriedades mecânicas de filmes compostos de diferentes concentrações (% p/p) de lignina do pedúnculo de caju: FL0%, FL1%, FL3% e FL5%.....	38
Tabela 6	Propriedades hidrofílicas de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações (% p/p) de lignina do pedúnculo de caju.....	41
Tabela 7	Propriedades barreira de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações (% m/m) de lignina do pedúnculo de caju: FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).....	43
Tabela 8	Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados às isotermas de adsorção de água, a 25°C e 35 °C, dos filmes de amido e incorporados com lignina do pedúnculo de caju, seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvios percentuais médios (E%) e qui-quadrado (χ^2).....	46
Tabela 9	Capacidade antioxidante de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Amido
ABTS	Ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)
ATT	Atividade antioxidante total
BOD	Biological Oxygen Demand
BET	Brunauer–Emmett–Teller
CMC	Carboximetilcelulose
CNC	Celulose nanocristalina
CL	Lignina carboxilada
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
EROS	Espécies reativas de oxigênio
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
GAB	Guggenheim–Anderson–de Boer
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NPs	Nanopartículas
NaOH	Hidróxido de sódio
PVA	Permeabilidade ao vapor de água / Polivinil álcool
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PLA	Polilactídeo
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
PHA	Polihidroxialcanoatos
PBAT	Polibutileno adipato-co-tereftalato
SST	Sólidos solúveis totais
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3 REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 Caju e valorização de seus subprodutos	18
3.2 Embalagens biodegradáveis para alimentos	19
3.3 Biopolímeros	20
3.3.1 Amido	21
3.3.2 Lignina	23
3.4 Radiação ultravioleta (UV) na deterioração oxidativa de alimentos	25
3.5 Embalagens ativas	26
3.6 Filmes bloqueadores da radiação ultravioleta (UV)	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 Materiais	31
4.2 Elaboração dos filmes de amido com incorporação de lignina	31
4.3 Caracterização dos filmes	33
4.3.1 Estudo reológico das soluções filmogênicas	33
4.3.2 Propriedades mecânicas de filmes	33
4.4 Análise de solubilidade em água	34
4.5 Umidade e absorção de umidade percentual	34
4.6 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)	35
4.7 Ângulo de contato	35
4.8 Isotermas de sorção dos filmes	35
4.9 Cor	36
4.10 Bloqueio de luz UV	36

4.11 Determinação da atividade antioxidante total (ATT).....	37
4.12 Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	37
4.13 Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	38
4.14 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	38
4.15 Biodegradabilidade.....	38
4.16 Reciclabilidade.....	39
4.17 Análise estatística.....	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 Caracterização dos filmes.....	39
5.1.1 Reologia das soluções filmogênicas.....	39
5.1.2 Caracterização dos filmes – aspecto visual e cor	43
5.1.3 Espessura, resistência à tração e alongamento na ruptura	45
5.2 Propriedades hidrofílicas e de barreira dos filmes.....	48
5.2.1 Solubilidade, umidade e absorção de umidade.....	48
5.2.2 Permeabilidade ao vapor de água (PVA) e ângulo de contato	49
5.3 Isotermas de sorção dos filmes de amido com incorporação de lignina do pedúnculo do caju	52
5.4 Propriedades funcionais dos filmes - Espectroscopia UV-vis e atividade antioxidante.....	56
5.6 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) dos filmes	59
5.7 Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	61
5.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	63
5.9 Biodegradabilidade.....	65
5.10 Reciclabilidade.....	67
6 CONCLUSÃO	70
REFERÊNCIAS.....	72

INTRODUÇÃO

As embalagens de alimentos desempenham um papel fundamental, garantindo a sua segurança ao longo de toda a cadeia produtiva facilitando o manuseio, prolongando a vida de prateleira, preservando as características sensoriais, e protegendo contra fatores de deterioração externos, como umidade e radiação UV.

Os alimentos, desde a colheita até o seu consumo, estão sujeitos à exposição de luz, seja ela natural ou artificial, que pode desencadear reações de fotólise ou fotooxidação, levando a sua deterioração. Como consequência da exposição da luz, principalmente a ultravioleta, ocorre a formação de radicais livres e espécies reativas de oxigênio (EROS) que promovem a degradação de compostos sensíveis, como vitaminas, pigmentos (carotenoides, clorofila, mioglobina, entre outros), além de macromoléculas como lipídeos e proteínas (Sieminska-Kuczer;12 Szymanska-Chargot; Zdunek, 2022) alterando a qualidade do alimento. A exposição à luz UV não apenas promove a deterioração dos alimentos como também pode facilitar sua contaminação por microrganismos patogênicos, em especial *E.coli* e *L. monocytogenes*, principais bactérias responsáveis por intoxicação alimentar (Yousefi *et al.*, 2019).

Desta forma, minimizam alterações físico-químicas no sabor, na cor, na textura, peso e na biodisponibilidade, além de garantir a segurança contra contaminantes químicos e microbiológicos, contribuindo significativamente para a qualidade dos alimentos (Fathima *et al.*, 2018). Plásticos, vidros e metais são os principais materiais utilizados em embalagens visando bloquear a radiação UV e, desta forma, prevenir a deterioração oxidativa dos alimentos. Embora essas embalagens apresentem boas propriedades de barreira à luz, são de difícil degradação, levando a um impacto negativo ao meio ambiente, além de oferecer potenciais riscos à saúde pela emissão de gases, como CO₂ e metano (Mikame *et al.*, 2021; Atta *et al.*, 2022; Bohlmann, 2004; Shen *et al.*, 2020), o que têm gerado importantes preocupações.

Desta forma, é crescente as pesquisas sobre o desenvolvimento de embalagens ativas de forma sustentável, nas quais os compostos bioativos, como polifenóis, carotenoides, e os biopolímeros (polissacarídeos, proteínas e lipídios) são

extraídos de fontes alternativas não convencionais, de baixo custo e biodegradáveis (Cazon *et al.*, 2017; Jeevahan e Chandrasekaran, 2019).

O amido é um polímero natural renovável que vem apresentando crescente aplicação como material para o desenvolvimento de filmes e embalagens de alimentos, pois pode ser obtido de diversas fontes vegetais, tem baixo custo, boa biodegradabilidade, além de ser comestível (Cazón *et al.*, 2017). Esse biopolímero apresenta excelentes propriedades para a formação de filmes geralmente inodoros, insípidos, incolores e não tóxicos (Khan *et al.*, 2017). No entanto, mesmo com tantas características positivas, os filmes de amido tendem a ser altamente hidrofílicos e apresentam propriedades mecânicas limitadas, o que restringe suas aplicações em embalagens para alimentos (Cazón *et al.*, 2017). Neste contexto, a combinação do amido com a lignina pode ser promissora para a produção de filmes biodegradáveis, uma vez que estudos têm evidenciado que este biopolímero pode promover hidrofobicidade (Sá *et al.*, 2020), melhor rigidez (Hambardzumyan *et al.*, 2015), e melhorias das propriedades mecânicas e térmicas (Freitas *et al.*, 2021), além de contribuir no efeito bloqueador da radiação UV e antioxidante (Abid *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2020).

O interesse na utilização de coprodutos ou resíduos agroalimentares na obtenção de compostos ativos para adição nas embalagens ativas têm recebido atenção, uma vez que contribui na redução do desperdício de alimentos e na sua valorização econômica (Chhandama *et al.*, 2022; Gianico *et al.*, 2021). A adição de compostos bioativos em filmes biodegradáveis, como polifenóis (antocianinas, curcuminas, entre outros), carotenoides e betalaínas, tem evidenciado a promoção de propriedades antioxidantes, antimicrobianas e bloqueadoras de radiação UV (Liu *et al.*, 2018, 2017a; Tran *et al.*, 2017).

Diante desse cenário, o objetivo deste estudo foi desenvolver e caracterizar filmes de amido de milho incorporados com diferentes concentrações de lignina obtida a partir de resíduos do processamento do pedúnculo do caju, visando sua aplicação potencial como embalagens ativas. Avaliou-se o efeito da lignina sobre as propriedades hidrofóbicas, antioxidantes, ópticas e ambientais dos filmes, com foco na melhoria do desempenho funcional dos filmes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o uso da lignina proveniente do coproduto do pedúnculo do caju como agente ativo em filmes à base de amido de milho, visando à obtenção de materiais com propriedade de bloqueio da radiação ultravioleta (UV).

2.2 Objetivos específicos

- Elaborar filmes à base de amido de milho contendo diferentes concentrações de lignina obtida do coproduto do pedúnculo do caju, caracterizando-os quanto às suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas, ópticas, estruturais e de barreira;
- Avaliar o desempenho funcional dos filmes quanto à atividade antioxidante, biodegradabilidade e reciclabilidade.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Caju e valorização de seus subprodutos

O cajueiro (*Anacardium occidentale L.*) é uma árvore frutífera nativa do Brasil, que desempenha um importante papel econômico através da produção de duas partes comestíveis de seu fruto: a castanha e o pedúnculo do caju, com produção mundial que atingiu cerca de 4,6 milhões de toneladas na temporada de 2022/2023, com foco principal na obtenção da castanha de caju (Tridge, 2023). Após a obtenção da castanha, o pedúnculo corresponde a cerca de 90% da massa total do fruto, que pode ser utilizado para diversos fins, como produção de sucos, sorvetes e geleias (Deenanath; Rumbold; Ikuye, 2013). Embora apresente um grande volume, o pedúnculo do caju ainda é bastante subutilizado e pouco aproveitado nas áreas de cultivo (Tamiello-Rosa et al., 2019), com média de 10 a 15 toneladas sendo desperdiçada para cada tonelada de castanha produzida (Das e Arora, 2017).

O reaproveitamento dos resíduos gerados pela indústria alimentícia, a exemplo do pedúnculo do caju, pode reduzir de forma bastante significativa os impactos ambientais decorrentes de seu descarte inadequado, ao mesmo tempo que estimula a prática sustentável e a economia circular no setor alimentício (Osei et al., 2025a; Sani et al., 2023).

Nesse contexto, em muitos países, inclusive o Brasil, o caju é utilizado predominantemente para a elaboração de sucos (Santos et al., 2007), além da produção de bebidas fermentadas (Kamble et al., 2024) e enriquecimento de ração animal (Akyereko et al., 2022). Diante do potencial funcional dos compostos presentes no pedúnculo de caju, vários estudos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos visando a aplicação dos compostos encontrados no pedúnculo de caju na indústria de alimentos, como corantes, nutracêuticos e embalagens ativas (do Nascimento Silva et al., 2023).

No que diz respeito às suas características nutricionais, o fruto destaca-se pelo seu alto valor nutricional, com destaque para a vitamina C, que é, em média, seis vezes mais alta que o suco da laranja. Além disso, é rico em compostos bioativos como flavonóides, carotenóides e polifenóis, bem como vitaminas, minerais e fibras alimentares. Este conjunto de compostos bioativos confere diversos efeitos benéficos à saúde humana, com ações anti-inflamatórias, antibacterianas, antidiabéticas e

antioxidantes (Adelere *et al.*, 2020; Cherian e Lekshmi, 2021; Das e Arora, 2017; Lowor e Agyente-Badu, 2009; Nagaraja, 2010). Além disso, estudos mais recentes indicam que um de seus subprodutos, o pedúnculo de caju, pode ser empregado na obtenção de biocombustíveis, incluindo etanol (Correia *et al.*, 2022) e bio-hidrogênio (Silva *et al.*, 2018) bem como na produção de outros compostos de interesse, como o xilitol (Albuquerque *et al.*, 2023; Marques Júnior e Rocha, 2021).

3.2 Embalagens biodegradáveis para alimentos

Anualmente, uma quantidade significativa de plástico é descartada no meio ambiente, aumentando os impactos ambientais devido ao seu longo tempo de degradação (Thakur *et al.*, 2018). Contudo, devido ao seu fácil acesso, baixo custo e características mecânicas bastante favoráveis, os polímeros sintéticos (Fig. 1a), tais como polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e poliamida (PA), permanecem como os materiais predominantes na fabricação de embalagens para alimentos (Hanani, 2018; Kozýowicz *et al.*, 2019).

Figura 1. Diferentes categorias de polímeros - sintéticos e naturais



Fonte: autora (2026).

Em resposta às crescentes preocupações ambientais associadas ao uso de materiais sintéticos derivados de fontes petroquímicas, tem-se intensificado a

busca por alternativas sustentáveis para aplicações em embalagens (Choi *et al.*, 2018). Nesse contexto, a pesquisa e o desenvolvimento de materiais de embalagem obtidos a partir de fontes naturais têm se mostrado fundamentais para a redução do uso de plásticos convencionais, os quais apresentam baixa biodegradabilidade e podem persistir no ambiente por milhares de anos (Winotapun *et al.*, 2022). A Figura 1 ilustra algumas dessas matérias-primas naturais empregadas na produção de materiais de embalagem sustentáveis.

O termo embalagem biodegradável refere-se ao conceito de embalagens para produtos, sejam eles alimentícios ou não, que não causem impactos negativos ao equilíbrio ambiental quando expostos a elementos naturais como água, ar e solo (Cruz, 2022). Este tipo de embalagem pode se decompor por completo em dióxido de carbono, água e biomassa devido à influência de microrganismos, como bactérias, fungos e algas (Weligama e Karim, 2022).

Elas não apenas se decompõem de forma natural, como podem ser formuladas de maneira ativa, incorporando substâncias que promovem interações benéficas entre o alimento, embalagem e meio ambiente. O propósito deste tipo de embalagem é preservar a qualidade, segurança e características sensoriais dos produtos embalados (Landim *et al.*, 2016).

Prevê-se que a produção desses materiais aumente cerca de 30% no mercado mundial (Bioplastics, 2018). O custo de embalagens biodegradáveis é maior quando comparado ao de embalagens tradicionais, contudo, os consumidores de forma geral, estão mais conscientes quanto à sustentabilidade, optando muitas vezes por preços mais altos em favor da conservação do meio ambiente (Rioux *et al.*, 2002). Mas apesar das muitas vantagens oferecidas por materiais advindos de fontes renováveis, ainda existem desafios significativos em seu processo de produção, assim como dificuldades em torná-los competitivos em comparação com os sintéticos (Rong; Mubarak; Tanjung, 2017).

3.3 Biopolímeros

Sabe-se que polímeros à base de petróleo são as principais fontes utilizadas para a produção de embalagens, destacando-se o polipropileno (PP), polietileno (PE), poliamida (PA) e poli (tereftalato de etileno) (PET). A escolha por estes materiais baseia-se principalmente em suas boas propriedades mecânicas e de

transparência (Yuan *et al.*, 2023). No entanto, estes materiais não são biodegradáveis e geram desafios significativos quanto à reciclagem eficaz (Ahmad; Qurashi; Sheehan, 2023; Zhang *et al.*, 2022), resultando em sérios impactos ambientais (Tian *et al.*, 2023).

Os biopolímeros, também conhecidos como polímeros naturais, são materiais derivados de fontes biológicas, seja através da extração direta de plantas, cereais, tubérculos e leguminosas, ou por meio de processos que aproveitam resíduos gerados por indústrias alimentícias e de papel (Tiekstra *et al.*, 2021). São classificados com base em sua origem e produção, sendo mais comuns aqueles derivados de fontes naturais e renováveis, como amido, quitosana e celulose, além de polímeros sintéticos como o ácido polilático (PLA) e polihidroxialcanoatos (PHA) (Lombardi *et al.*, 2022).

Devido aos desafios relacionados à preservação de alimentos, segurança alimentar e proteção ambiental associados ao uso de plásticos petroquímicos, o uso de materiais de embalagem biodegradáveis têm ganhado considerável destaque. Para estender a vida útil dos alimentos, diversos materiais poliméricos naturais, como amido, celulose, quitosana, pectina, ou a combinação entre eles têm sido amplamente empregados em embalagens ativas para alimentos (Koosha e Hamedi, 2019; Rajabinejad *et al.*, 2020).

Apesar de apresentarem muitas vantagens quando comparados aos plásticos tradicionais, a produção em larga escala de materiais de embalagens totalmente biodegradáveis apresenta lacunas, como as fracas propriedades mecânicas, térmicas, de barreira e hidrofobicidade que alguns polímeros demonstram. No entanto, essas limitações vêm sendo estudadas pela incorporação de aditivos, nanopartículas metálicas ou pigmentos (Jafarzadeh e Jafari, 2020).

3.3.1 Amido

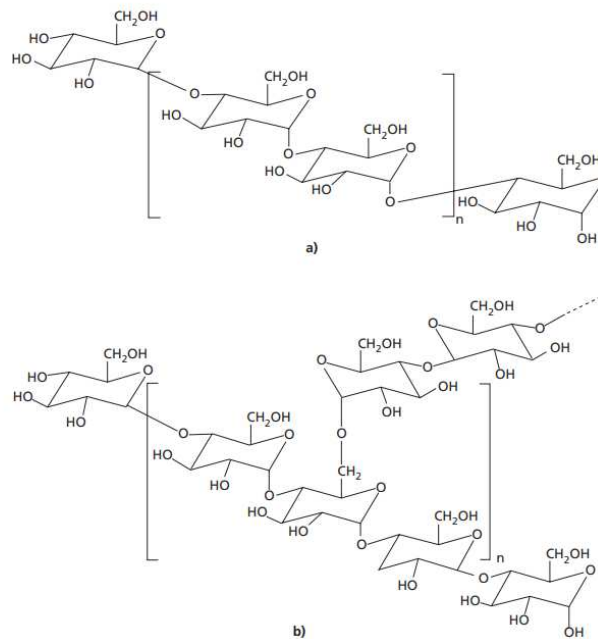
O amido é um dos polissacarídeos mais abundantes na natureza, com custo acessível e elevada capacidade de formar estruturas coesas e contínuas, e destaca-se como uma das matérias-primas mais empregadas na produção de filmes (Yang *et al.*, 2024; Zeng *et al.*, 2024). No entanto, em comparação com os polímeros plásticos, os filmes de amido têm desvantagens significativas, como sua natureza

hidrofílica e baixo desempenho mecânico, o que limita sua aplicação industrial (Huang *et al.*, 2020).

Para melhorar as propriedades de barreira, mecânicas, de barreira à radiação UV e antioxidantes de filmes elaborados com amido de milho e atender às demandas tecnológicas, pesquisas têm se concentrado no desenvolvimento de amido modificado com propriedades avançadas (Zhong *et al.*, 2023). Isso tem sido alcançado por meio de diversos métodos de modificação amplamente categorizados como modificações químicas, enzimáticas, físicas e genéticas (Kushwaha; Kaur, 2023).

O amido é composto por duas unidades principais: amilose e amilopectina (figura 2). A amilose é um polímero composto por cadeias lineares, unida por ligações glicosídicas α -1,4 com poucos pontos de ramificação. Já a amilopectina apresenta uma estrutura ramificada com alto peso molecular, onde as unidades de glicose são unidas por ligações α -1,4 nas seções lineares e por ligações α -1,6 nos pontos de ramificação. No contexto de embalagens biodegradáveis, o amido surge como uma das melhores opções devido à sua capacidade de ser modificado por processos enzimáticos e químicos (Sarkheil e Rahbari, 2019).

Figura 2. Representação das estruturas químicas das frações de (a) amilose e (b) amilopectina



Fonte: Corradini *et al.* (2005).

O amido naturalmente possui propriedades mecânicas limitadas, como baixa resistência à tração, módulo de elasticidade, tensão de cisalhamento e deformação na ruptura, além de alta permeabilidade ao vapor de água devido à sua natureza hidrofílica. Sua capacidade de formar filmes de embalagem à base de amido também é reduzida (Onyeaka *et al.*, 2022). Filmes de amido plastificado podem apresentar propriedades mecânicas inadequadas, como baixa taxa de alongamento e comportamento frágil, fenômeno frequentemente associado à recristalização da amilose ao longo do tempo, conhecida como retrogradação, que promove a formação de regiões mais organizadas na matriz polimérica. Para melhorar a flexibilidade e a extensibilidade desses filmes, é necessário incorporar plastificantes ou combinar o amido com outros polímeros (Cazón *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2022).

Para atender às demandas tecnológicas, muitos pesquisadores têm se concentrado no desenvolvimento de amido modificado com propriedades avançadas, como propriedades mecânicas, térmicas, antioxidantes e bloqueadora de luz UV, utilizando uma variedade de métodos de modificação, incluindo abordagens químicas, enzimáticas, físicas e genéticas (Kushwaha e Kaur, 2023; Zhong *et al.*, 2023).

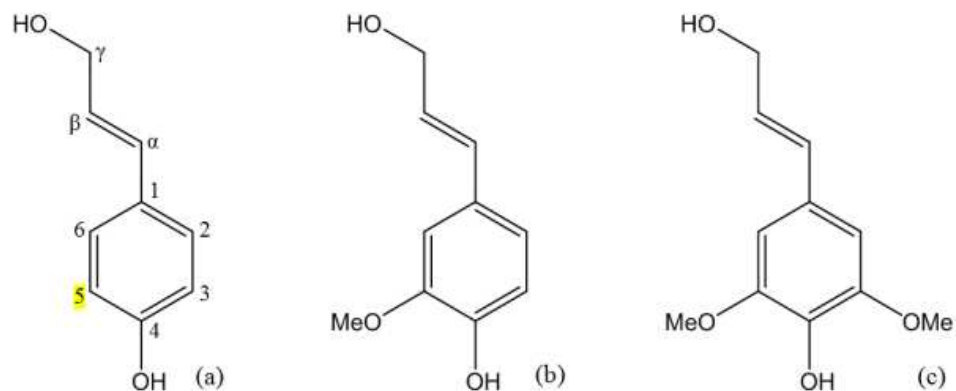
3.3.2 Lignina

Considerada o segundo polímero mais comum da Terra, a lignina fica atrás apenas da celulose, representando aproximadamente 30% do carbono orgânico não derivado de combustíveis fósseis (Laurichesse; Avérous, 2014). Trata-se de um polímero aromático de origem vegetal que é comumente obtido na indústria de celulose (Lourencon *et al.*, 2020). Suas características únicas, como resistência à oxidação e decomposição, alta rigidez e capacidade de absorver luz ultravioleta, indicam um potencial significativo para uma ampla variedade de aplicações além da simples queima para recuperação de calor ou energia (Olonisakin *et al.*, 2023).

Por se tratar de um subproduto da indústria papeleira, a lignina está presente na estrutura das plantas e é amplamente disponível na indústria madeireira a um custo acessível (Sethupathy *et al.*, 2022; Bertella e Luterbacher, 2020). Sua estrutura química é complexa e varia de acordo com a fonte vegetal (Sakakibara, 1991). Este polímero é descrito como um material amorfo e é rico em compostos fenólicos, resultante da polimerização desidrogenativa de suas estruturas

fenilpropanóides: álcool coniferílico, álcool sinapílico e álcool p-cumarílico (figura 3). Essas unidades são responsáveis por uma ampla variedade de grupos funcionais e vários tipos de ligações químicas, contribuindo para a formação de um polímero complexo e tridimensional (Figueiredo *et al.*, 2018).

Figura 3. Estrutura dos álcoois, (a) álcool cumarílico, (b) álcool coniferílico e (c) álcool sinapílico precursores da lignina



Fonte: Jiménez, 2009.

Devido a essa complexidade estrutural, a lignina possui uma massa molecular considerável, originada dessas unidades (Jiménez, 2009). As ligninas são compostas por estruturas químicas que conferem hidrofobicidade, capacidade de absorção de UV e propriedades antioxidantes quando incorporadas como carga em compósitos. Estas características podem ser vantajosas para preservar a estabilidade de alimentos que são propensos à oxidação lipídica, como cereais matinais, nozes e castanhas (Sá *et al.*, 2020).

A lignina possui grupos funcionais absorvedores de radiação UV, como unidades fenólicas, cetonas e cromóforos. Devido à presença destes grupos funcionais, a lignina possui uma excelente capacidade de bloqueio UV, bem como propriedades antioxidantes e de redução de radicais (Culebras *et al.*, 2019; Yang; Kenny; Puglia, 2015). Uma pesquisa conduzida por Rukmanikrishnan *et al.* (2020) revelou que a incorporação de 10% em peso de lignina em goma gelana/hidroxietilcelulose foi capaz de proteger 100% contra UVB (280-320nm) e 90% contra UVA (320-400nm).

Um filme compósito produzido com nanopartículas de lignina e álcool polivinílico (PVA), com teores de lignina que variaram de 0,5 a 10% em peso revelaram uma alta absorção de luz UV, com mais de 97,5% de bloqueio (He *et al.*, 2019). Esses achados sugerem o potencial dos filmes contendo lignina como materiais atrativos para embalagens, oferecendo excelente capacidade de proteção UV, sendo especialmente relevante para produtos sensíveis à luz.

3.4 Radiação ultravioleta (UV) na deterioração oxidativa de alimentos

As embalagens são essenciais para proteger um produto, seja ele alimentar ou não, contra influências externas. Isso implica que o material da embalagem deve possuir ótimas características de barreira para diversos elementos como umidade, luz UV e gases, impedindo-os assim de ultrapassar a parede da embalagem (Cheng *et al.*, 2022; Weligama Thuppahige e Karim, 2022). Dentre esses fatores, controlar a luz UV é o fator mais importante na proteção dos alimentos contra uma deterioração mais acelerada, pois o sol emite um amplo espectro de comprimentos de onda (Nikvarz; Khayati; Sharafi, 2020).

A radiação UV causa diversas injúrias aos alimentos, induzindo reações de fotooxidação e fotodegradação, e como resultado, geram radicais livres e espécies reativas de oxigênio (EROs) (Channa *et al.*, 2022; Rincon *et al.*, 2019). Entre eles, o oxigênio singlete é o principal fator da aceleração da oxidação lipídica, destruição de antioxidantes e danos a vitaminas e proteínas, mesmo quando armazenadas em baixas temperaturas (Goudarzi; Shahabi-Ghahfarrokhi; Babaei-Ghazvini, 2017). A exemplo, alguns sabores desagradáveis que podem surgir em leites estão relacionados à fotooxidação de riboflavina nativa e tetrapirrol, resultando em uma série de compostos de oxidação lipídica (Schiano *et al.*, 2019). Da mesma forma, pigmentos como antocianinas presentes em sucos de frutas e vegetais são sensíveis à degradação provocada pela exposição à luz, resultando em descoloração (Lu e Zhao, 2017). Isso resulta em uma série de problemas, como a despigmentação dos alimentos, redução significativa do sabor, redução de seu valor nutricional e até formação de produtos tóxicos (Yang *et al.*, 2020). Todos estes fatores geram desperdício de alimentos e grandes impactos econômicos (Chen *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2020).

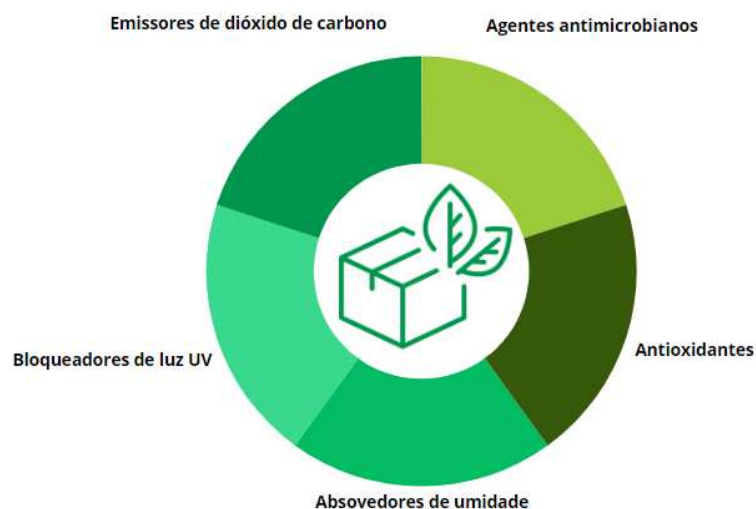
O processo de fotooxidação de componentes alimentares compreende uma série de complexas reações, que geram alguns produtos de reação, como oxigênio singlete, peróxidos, quinonas, álcoois, ácidos carboxílicos, cetonas e aldeídos (Ahmed *et al.*, 2016). Esse fenômeno é muito observado em alimentos com alto teor lipídico como carnes, nozes, peixes, nozes, amêndoas e laticínios (Tripathi *et al.*, 2023).

3.5 Embalagens ativas

As embalagens ativas para alimentos têm se tornado uma inovação na tecnologia de embalagens alimentícias (Firouz; Mohi-Alden; Omid, 2021). Esse conceito de embalagem envolve a inclusão de aditivos, como agentes antimicrobianos, antioxidantes, emissores de dióxido de carbono, absorvedores de oxigênio e eliminadores de etileno nos materiais de embalagem (figura 4), possuindo como objetivo preservar a qualidade dos alimentos embalados e prolongar sua vida útil (Vilela *et al.*, 2018).

Diferentemente das embalagens inertes, as embalagens ativas estabelecem uma relação dinâmica com o produto alimentar. Ao regular tanto o ambiente externo quanto interno, essas embalagens preservam de forma eficaz as características sensoriais e prolongam a vida útil do produto (Miao *et al.*, 2022).

Figura 4. Principais funções de embalagens ativas para alimentos



Fonte: autora (2026).

Os alimentos possuem alta susceptibilidade à degradação microbiológica e bioquímica, quando expostos a fatores ambientais como luz, umidade e oxigênio, que aceleram seu processo de deterioração. Com base nessa problemática, muitas técnicas de conservação alimentar estão em desenvolvimento, com foco na tecnologia de filmes de barreira, que vêm mostrando-se bastante apropriada para aumentar a qualidade e vida útil desses produtos (Bhardwaj; Alam; Talwar, 2019).

Nos sistemas de embalagens ativas, extratos naturais, em especial aqueles abundantes em compostos fenólicos, têm sido amplamente utilizados para a formulação de filmes enriquecidos com propriedades antioxidantes e/ou antimicrobianas. Estes extratos naturais podem ser derivados de diversas fontes, incluindo subprodutos de frutas e vegetais, sementes e resíduos de cascas (Basri *et al.*, 2021), que Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), foi estimado que somente no ano de 2020 foram desperdiçados cerca de 931 milhões de toneladas de alimentos em todo o mundo.

Em um estudo conduzido por Dantas *et al.* (2015), foram elaborados filmes com propriedades antioxidantes utilizando amido de mandioca como polímero base, plastificados com glicerol e enriquecidos com polpa de frutas tropicais para fornecer compostos ativos. A adição de 20% (m/m) de polpa demonstrou uma significativa inibição da oxidação do azeite de dendê embalado, em comparação com as demais formulações e o grupo controle. Esses resultados sugerem o potencial desses filmes como embalagens ativas e antioxidantes. Machado *et al.* (2012) desenvolveram filmes contendo extrato de erva-mate como agente antioxidante, incorporados em uma matriz de amido de mandioca plastificada com glicerol. Os resultados obtidos indicaram que o uso do extrato de erva-mate é uma abordagem viável, permitindo sua aplicação como embalagem para prevenir a oxidação de produtos lipídicos, melhorando assim a sua propriedade de barreira. Desta forma, as embalagens ativas surgem como forma de contribuição para reduzir as estatísticas de desperdícios de alimentos (Brasil, 2018).

Esse modelo de embalagem oferece uma série de vantagens aos consumidores, sendo percebidas como opções responsáveis e sustentáveis em comparação com os métodos tradicionais de acondicionamento de alimentos.

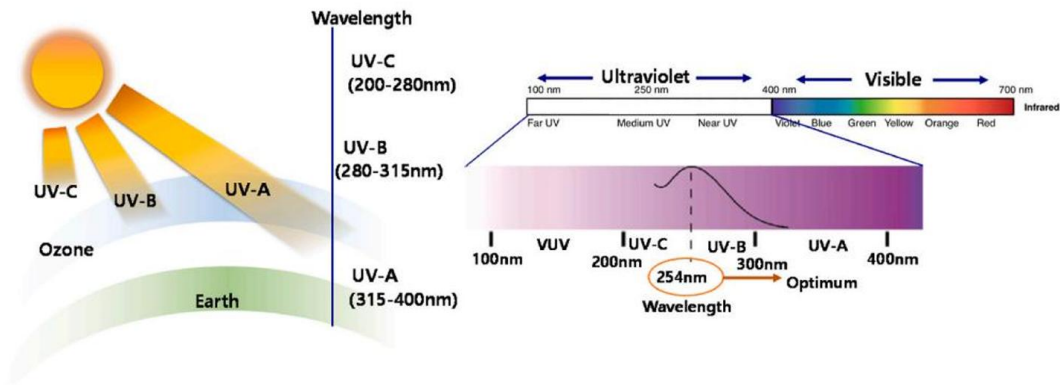
Enquanto materiais como plásticos, vidros e embalagens metálicas podem persistir no meio ambiente por milhares de anos até se degradar completamente, as embalagens ativas são elaboradas para serem biodegradáveis, resultando em um tempo significativamente menor de permanência no ambiente após o descarte (Jorge, 2013). Nesse contexto, o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis com propriedades funcionais, como a capacidade de bloquear a radiação ultravioleta, torna-se uma estratégia relevante para a preservação da qualidade dos alimentos.

3.6 Filmes bloqueadores da radiação ultravioleta (UV)

A capacidade de proteção contra a radiação ultravioleta tornou-se um parâmetro chave na seleção de materiais para embalagens de alimentos, pois é de extrema importância prevenir danos fotoquímicos aos alimentos devido à exposição aos raios UV. Durante o manuseio e transporte, os alimentos estão sujeitos a possíveis degradações e/ou alterações em suas propriedades físico-químicas e/ou biológicas. Para aumentar as propriedades de bloqueio UV dos polímeros, tem-se explorado a incorporação de materiais biocompatíveis com capacidade de absorção máxima de luz na faixa UV (200-400 nm) (Ezati *et al.*, 2023).

A radiação UV constitui-se como uma forma de radiação eletromagnética que abrange a faixa de 100 a 400 nanômetros (nm), apresentando comprimentos de onda mais curtos do que os da luz visível. Dentro do espectro UV, tais radiações podem ser classificadas de acordo com seus comprimentos de onda específicos (figura 5), sendo UVC (200–280 nm), UVB (280–315 nm) e UVA (315–400 nm) como exemplos distintos (Wang *et al.*, 2022).

Figura 5. Diferentes categorias de radiações ultravioleta (UV-A, UV-B e UV-C) e sua posição no espectro eletromagnético



Fonte: Ezati et al., 2023.

A consequência desse processo é a geração de radicais livres e EROs (Channa et al., 2022), com destaque para o oxigênio singlete como agente principal na rápida oxidação lipídica, degradação de antioxidantes e danos a vitaminas e proteínas, mesmo em condições de baixa temperatura (Goudarzi; Shahabi-Ghahfarrokhi, Babaei-Ghazvini, 2017). Silva *et al.* (2023) menciona que para atenuar os efeitos adversos causados pela interação da luz com os alimentos, é possível optar por materiais de embalagem que sejam mais apropriados. Nos últimos anos, tanto a comunidade acadêmica quanto a indústria têm trabalhado no desenvolvimento de filmes multifuncionais e biodegradáveis para embalagens de alimentos. Diversas soluções têm sido exploradas para o avanço dessa tecnologia, incluindo filmes de proteção UV e a utilização sustentável de compostos naturais, seguindo abordagens chamadas químicas verdes, ou seja, mais sustentáveis (Hari *et al.*, 2022).

A exposição à luz UV tem sido associada à degradação acelerada de uma variedade de componentes nos alimentos, incluindo proteínas, lipídios, vitaminas, compostos bioativos, corantes e sabores, resultando na redução do valor nutricional, qualidade, prazo de validade e segurança alimentar (Gore e Prajapat, 2022; Tripathi *et al.*, 2023). Portanto, é crucial o desenvolvimento e uso de materiais de embalagem com proteção UV, como filmes e revestimentos, para atenuar os efeitos danosos da radiação sobre os alimentos (Shang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2021).

Um dos principais aspectos considerados no design e fabricação desse tipo de embalagem é a escolha de materiais acessíveis, abundantes, sustentáveis e seguros que possam efetivamente bloquear a luz UV. Muitas vezes, esses materiais consistem em aditivos bloqueadores incorporados em filmes ou revestimentos, como nanopartículas (NPs) ou fitoquímicos, e atuam absorvendo, dispersando ou refletindo

os raios UV (Anushikha e Gaikwad, 2023; Ezati *et al.*, 2023). Além disso, os próprios filmes ou materiais de revestimento podem possuir tais propriedades, como lignina, celulose, quitosana e gelatina (Anushikha e Gaikwad, 2023; Khan; Ezati; Rhim, 2023).

A Tabela 1 apresentada abaixo exhibe achados na literatura atual acerca do potencial de aplicação de biopolímeros na indústria de embalagens.

Tabela 1 - Filmes bloqueadores de UV à base de biopolímeros em aplicações de embalagens ativas

Polímero Base	Agente UV Incorporado	Aplicação	Resultado	Autores
Amido de Mandioca	Bagaço de mirtilo	Embalagem	A incorporação do agente ativo nos filmes levou ao desenvolvimento de características de proteção contra os raios UV, que podem ser associadas aos compostos aromáticos encontrados no bagaço de mirtilo.	Luchese <i>et al.</i> , 2018
Amido/ álcool polivinílico	Extrato de casca de pitaya vermelha	Camarão	Melhora da barreira ao vapor de água e a capacidade de barreira à luz UV visível, potencial mecânico, antioxidante e antimicrobiano dos filmes.	Qin <i>et al.</i> , 2020
Quitosana	Extrato de casca de caqui	Banana	A inclusão do extrato de caqui resultou em melhorias consideráveis na estabilidade térmica, nas características de bloqueio UV-Vis, nas propriedades mecânicas, mantendo a qualidade da banana e prolongando a sua vida útil.	Hu <i>et al.</i> , 2022

Alginato e nanopartículas de óxido de zinco	Aloe vera	Tomate	O revestimento demonstrou notáveis características de proteção UV, resistência à água, estabilidade térmica, propriedades mecânicas e antimicrobianas, quando comparado ao filme formulado apenas com alginato.	Abdel e Salama, 2022
Amido de trigo	Lignina organosolv de resíduos de batata	Embalagem	A incorporação da lignina favoreceu a formação de filmes opacos, com elevada capacidade de absorção da radiação UV, tornando-os adequados para a proteção de produtos sensíveis à luz ultravioleta.	Zolfaghari <i>et al.</i> , 2024

Fonte: autora (2026).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

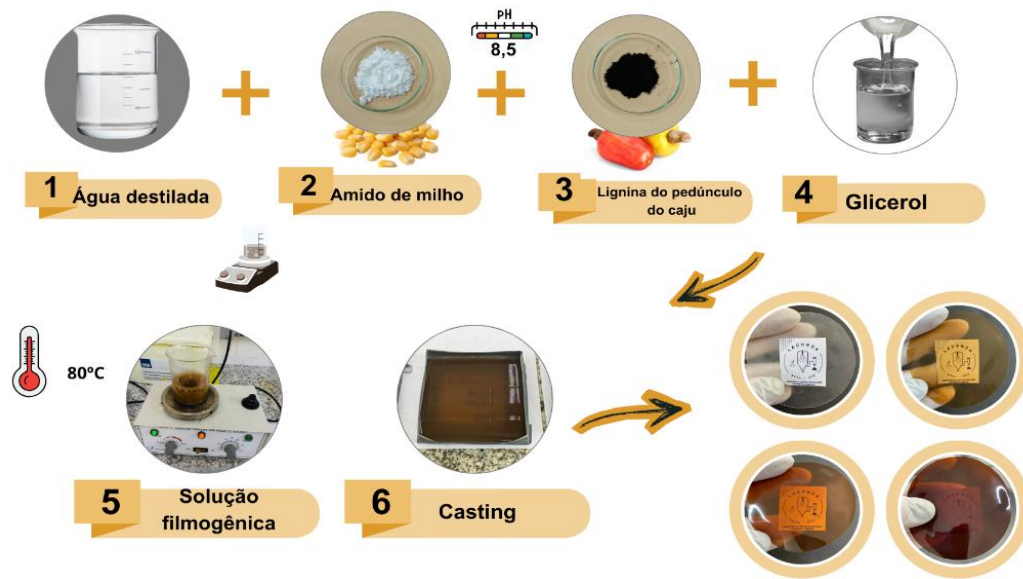
4.1 Materiais

O amido de milho modificado comercial foi obtido na Adicel Ind. e Com. LTDA (Belo Horizonte, MG, Brasil), enquanto a lignina, proveniente do coproduto do pedúnculo de caju, foi gentilmente doada pelo Laboratório de Bioengenharia - Sistemas Microbianos, Departamento de Engenharia Química – UFC, previamente obtida conforme metodologia descrita por Serpa *et al.* (2020), baseada em extração ácido-álcali seguida de precipitação ácida. Plastificante glicerol, etanol e hidróxido de sódio P. A. e outros reagentes foram adquiridos da Sigma-Aldrich.

4.2 Elaboração dos filmes de amido com incorporação de lignina

As soluções filmogênicas foram preparadas de acordo com a metodologia de Moraes *et al.* (2013), com adaptações, conforme fluxograma apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma para o desenvolvimento dos filmes de amido de milho com incorporação de diferentes percentuais de lignina do pedúnculo de caju.



Fonte: autora (2026)

Soluções de amido de milho a 5% em peso foram preparadas dissolvendo 5 g de amido em 100 mL de água destilada e agitada à temperatura ambiente ($25 \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$) por 30 min. Paralelamente, concentrações de lignina (1%, 3% e 5% m/m com base na massa de amido, conforme tabela 2) foram adicionadas às soluções e a mistura permaneceu sob agitação por mais 10 min, a fim de favorecer sua incorporação à matriz de amido. O pH da solução foi ajustado para 8,5 com solução de NaOH (1 mol.L^{-1}), possibilitando a completa solubilização da lignina. A solução foi posteriormente aquecida a $80 \text{ }^\circ\text{C}$, seguida da incorporação de 1,25 g de glicerol (25%) como agente plastificante, permanecendo sob agitação por 10 min. Por fim, as suspensões filmogênicas foram vertidas em placas de acrílico ($20 \times 20 \text{ cm}$) pelo método casting e submetidas à secagem em estufa de circulação e renovação de ar (modelo TE-394/I, Tecnal, SP, Brazil), a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h para remoção do solvente. Os filmes obtidos foram acondicionados em dessecadores à temperatura ambiente ($25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e UR 50%) até a realização das análises de caracterização.

Tabela 2 - Combinações adotadas para as formulações das soluções filmogênicas.

Amostra	Amido (g)	Lignina (g)	Glicerol (g)
FL0%	5 g	0 g	1,25 g
FL1%	5 g	0,05 g	1,25 g
FL3%	5 g	0,15 g	1,25 g

FL5%

5 g

0,25 g

1,25 g

 FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

Fonte: autora (2026).

4.3 Caracterização dos filmes

4.3.1 Estudo reológico das soluções filmogênicas

O comportamento reológico das soluções filmogênicas foi determinado por reologia de fluxo em reômetro (modelo AR-550, TA instruments, New Castle, EUA), com geometria do tipo cone-placa de diâmetro de 40 mm, com volume de amostra de 200 μL , na faixa de taxa de cisalhamento de 0.1 a 200 s^{-1} a uma temperatura de 25 $^{\circ}\text{C}$. O modelo matemático da Lei da Potência (Ostwald-de-Waelle) foi o mais indicado para ajustar os dados, conforme a Equação 1:

$$\tau = k \times (\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

Em que: τ - Tensão de cisalhamento (Pa), k - coeficiente de consistência (Pa·sn), $\dot{\gamma}$ - taxa de cisalhamento (s^{-1}) e n - índice de comportamento.

4.3.2 Propriedades mecânicas de filmes

4.3.2.1 Espessura

A espessura dos filmes foi medida utilizando um micrômetro digital (Mitutoyo®; Mitutoyo Corporation, Kawasaki, Kanagawa, Japan) com precisão de 0.001 mm. As medições foram realizadas em cinco pontos diferentes dos filmes e a espessura final foi a média aritmética das medidas realizadas.

4.3.2.2 Resistência à tração e alongamento na ruptura

A resistência à tração (MPa) e o alongamento na ruptura dos filmes foram obtidos de acordo com o método ASTM D882-09 (2009) em máquina de ensaio

universal (EMIC DL-3000; Instron/EMIC, PR, Brazil), totalizando 10 corpos de provas medindo 120 × 12 mm. As amostras foram colocadas em um dessecador contendo nitrato de magnésio hexahidratado para manter a umidade relativa e a temperatura entre 50 ± 5% e 24 ± 2 °C, respectivamente, por cerca de 48 h. Os corpos de prova foram fixados aos ganchos da máquina, separados por 100 mm, com célula de carga de 100 N e velocidade de tração de 50 mm/min. Força (N) e alongamento (mm) foram registrados durante a tração.

4.4 Análise de solubilidade em água

A solubilidade dos filmes foi determinada segundo Zamudio *et al.* (2010). Os filmes (1 × 2 cm) foram secos em estufa de circulação e renovação de ar (modelo TE-394/I, Tecnal, SP, Brazil) a 105 °C por 24 h e seus pesos foram registrados. Após secagem, as amostras foram imersas em 80 mL de água destilada, à temperatura ambiente, sob agitação contínua em banho maria (modelo Q226M2, Quimis, SP, Brazil) por 24 h. Decorridas as 24h, os filmes foram retirados da água com auxílio de pinça, submetidos novamente à secagem em estufa à 105 °C até massa constante. O cálculo da análise de solubilidade foi obtido através da Equação 2.

$$\% \text{ solubilidade} = \frac{(\text{peso inicial} - \text{peso final})}{\text{peso inicial}} \times 100 \quad (2)$$

4.5 Umidade e absorção de umidade percentual

Para análise do percentual de umidade, filmes de 2 x 3 cm foram pesados e em seguida, levados à estufa de circulação e renovação de ar (modelo TE-394/I, Tecnal, SP, Brazil) a 105 °C por 24 h e pesados novamente após este período. Para absorção de umidade, os filmes (2 x 3 cm) foram mantidos no dessecador com solução saturada de sulfato de potássio por 24 h, onde ao final, foram removidos e pesados novamente. O percentual de umidade e absorção de umidade dos filmes foram analisados conforme método (AOAC, 2005), utilizando a Equação 3 e 4.

$$\% \text{ umidade perdida} = \frac{(\text{peso final} - \text{peso inicial})}{\text{peso inicial}} \times 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ umidade absorvida} = \frac{(\text{peso inicial} - \text{peso final})}{\text{peso inicial}} \times 100 \quad (4)$$

4.6 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A permeabilidade ao vapor de água foi realizada de acordo com o método descrito na ASTM E96-00 (2000). As amostras foram fixadas entre as células de permeação contendo 2mL de água destilada em seu interior e as amostras de filme foram colocadas em um dessecador vertical (ARSEC, DC-040; Arsec Desumidificadores, SP, Brazil), com sílica gel e com controle de temperatura (25 ± 5 °C e $70 \pm 5\%$ UR). Foram realizadas oito pesagens por dentro de 24 h. Todas as determinações foram realizadas em cinco repetições. Os valores de PVA ($\text{g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{kPa}\cdot\text{m}^{-2}$) foram calculados de acordo com a Equação 5.

$$\text{WVP} = \frac{G \times T}{S \times \text{RH} \times t \times A}$$

Onde: G - massa obtida; T - espessura do filme; S - pressão de vapor a 25 °C; RH - umidade relativa; t - tempo; e A - área exposta de cada amostra.

4.7 Ângulo de contato

Os filmes, cortados em dimensões de 2×1 cm foram fixados em placa de Petri e com auxílio de uma pipeta automática, água ultrapura foi depositada (gota de 7 μL). As imagens do momento em que a gota é depositada na superfície foram capturadas por uma câmera digital acoplada ao aparelho Digidrop (GBX, modelo DGD-MCAT, Dublin, Irlanda) e o ângulo de contato estático da água foi obtido. Cinco repetições para cada filme foram realizadas.

4.8 Isotermas de sorção dos filmes

As isotermas de adsorção de água foram determinadas de acordo com o método estatístico-direto descrito por Crapiste & Rotstein (1982). Células de plástico contendo água destilada em seu interior foram preparadas previamente, tendo os pratinhos de alumínio codificados (em triplicata), tarados e pesados. Amostras de filmes (3 cm de diâmetro) foram distribuídas nos pratinhos e novamente pesadas, para obtenção da massa inicial. A atividade de água (A_w) foi medida em intervalos de tempo sequenciais e acondicionada em células de vidro à temperatura de 25 °C e em B.O.D (modelo MA 415, Marconi, SP, Brazil), à 35 °C. O ciclo pesagem, leitura e retorno para as células foi repetido quatro vezes seguidas ao longo da fase inicial do experimento, e depois em leituras consecutivas (a cada 1 ou 2 h), conforme os valores das amostras estabilizavam. Ao atingir 0.900-0.930 de atividade de água, ou quando houvesse estabilização ou redução desta atividade, concretizou-se o equilíbrio. As amostras com os pratinhos foram então secas em estufa com circulação e renovação de ar (modelo MA 035, Marconi, SP, Brazil) à 105 °C por 3 a 5 h, para registrar as massas finais e determinar o teor de umidade correspondente. Os parâmetros dos modelos matemáticos foram melhor ajustados para GAB e Peleg.

4.9 Cor

A análise de cor foi realizada por refletância em colorímetro ColoQuest XE da HunterLab, previamente calibrado em superfície branca. As medidas de cor foram expressas em termos de luminosidade L^* , 0 (preto) a 100 (branco), cromaticidade a^* , verde (-) a vermelho (+), e b^* , azul (-) para amarelo (+). A diferença total de cor (ΔE) será calculada de acordo com a equação 6.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (6)$$

Onde L_0^* , a_0^* e b_0^* , os parâmetros de cor de uma placa branca padrão, são $L_0^* = 88$, $a_0^* = 0,28$, $b_0^* = 3,06$, respectivamente.

4.10 Bloqueio de luz UV

A transmitância dos filmes foi testada de acordo com o método de Liu *et al.* (2017) utilizando um espectrofotômetro UV-visível (modelo SQ-2800 UV/VIS, UNICO, United Products & Instruments Inc., New Jersey, EUA). Os filmes foram cortados em forma retangular (1 x 4,5 cm) e, em seguida, fixados a uma superfície de cubeta usando uma cubeta vazia como referência. A transmitância da luz dos filmes foi medida de 200 a 800 nm.

4.11 Determinação da atividade antioxidante total (ATT)

Foi realizado ensaio de radicais livres pelo método ABTS (ácido 2,2'-azino-bis (3- etilbenzotiazolino-6-sulfônico), na qual uma solução mista contendo 7 mmol. L⁻¹ de ABTS e persulfato de potássio 2,45 mmol. L⁻¹ foi preparada e incubada no escuro por 16 h. As amostras dos filmes (0,2 g) foram trituradas e solubilizadas em 25 mL de água destilada, sob agitação mecânica por 15 minutos, seguida de banho ultrassônico (Unique, ultracleaner 1400A modelo, Brasil) por 10 min. A solução ABTS foi diluída para atingir uma absorvância de 0,70 ± 0,02 a 734 nm, que foi medida utilizando um espectrofotômetro UV-Vis. Foram adicionados 30 µL do extrato a 3 mL da solução de ABTS., seguida de homogeneização em agitador de tubos. Após incubação por 6 minutos no escuro, foi realizada a leitura da absorvância da solução resultante. A Equação 7 será usada para calcular a atividade de eliminação de radicais ABTS da amostra (Yan *et al.*, 2022).

$$ABTS(\%) = \frac{A1-A0}{A0} \times 100 \quad (7)$$

Onde A1 e A0 são absorvâncias da amostra e controle em 734 nm, respectivamente.

4.12 Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi conduzida conforme a metodologia descrita por Kanmani e Rhim (2014), com adaptações. O objetivo da análise foi identificar e caracterizar possíveis

alterações na estrutura química dos filmes. Os espectros foram obtidos em espectrômetro Cary 630 FTIR (Agilent, EUA), utilizando o acessório de reflexão total atenuada (ATR). As medições foram realizadas no Laboratório de Análises e Desenvolvimento de Processos - Engenharia Química – UFC, na faixa espectral de 4000 a 650 cm^{-1} , à temperatura de 25 °C, com 32 varreduras.

4.13 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As análises de calorimetria exploratória diferencial (DSC) foram realizadas em um analisador térmico (modelo Mettler-Toledo DSC 823e, Hitachi, Ibaraki, Japan) sob atmosfera de gás nitrogênio, com fluxo de 50 mL/min). Aproximadamente 5 mg de amostra foram acondicionadas em cadinhos de alumínio com tampa perfurada e submetidas a aquecimento de 25 °C a 300 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

4.14 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A morfologia do filme foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (Zeiss DSM 940A; Carl Zeiss, Oberkochen, Germany). Os filmes foram revestidos de ouro usando um dispositivo de revestimento por pulverização (Electron Microscopy Sciences, Hatfield, PA, EUA) e, em seguida, examinados em MEV usando uma tensão de aceleração de 20 kV com uma ampliação de 2000 x.

4.15 Biodegradabilidade

A avaliação da biodegradabilidade dos filmes foi realizada ao longo de 35 dias, utilizando o método de enterramento em solo, conforme descrito por Reshmy *et al.* (2021), com pequenas modificações. O solo utilizado no experimento foi adquirido em uma floricultura local em Fortaleza/CE, sendo acondicionado em recipientes apropriados. Amostras dos filmes (P_i), com dimensões de 2 cm \times 1 cm, foram enterradas a uma profundidade de 7 cm para exposição à atividade microbiana natural. As alterações físicas foram monitoradas a cada 7 dias por meio de fotos, e ao final dos 35 dias, foram lavadas, secas em estufa a 70 °C por 24 horas e pesadas (P_f). A perda de

massa (P) foi determinada com base na Equação 8, onde P_i representa a massa inicial e P_f a massa após o período de degradação no solo.

$$\%P = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (8)$$

4.16 Reciclabilidade

Os experimentos de reciclabilidade foram realizados de acordo com a metodologia descrita por Zhang *et al.* (2024), com pequenas adaptações. Inicialmente, os filmes foram cortados em pedaços menores e triturados até a formação de pequenos grânulos parecidos com pó fino. Em seguida, a amostra (1 g) foi misturada a 50 mL de água destilada e submetida à agitação contínua a 80 °C, até completa dissolução. A solução foi vertida em placas de acrílico (10 x 10 cm) e levadas para secagem em estufa a 40 °C, por 24h, até completa evaporação do solvente.

4.17 Análise estatística

Todos os ensaios foram analisados em triplicata, sendo os dados quantitativos expressos em média e \pm desvio padrão. ANOVA será realizada e as médias comparadas com Teste de Tukey ($p < 0,05$). Gráficos de colunas e de regressão podem ser utilizados para melhor apresentação dos dados. As análises serão validadas através dos softwares estatísticos Statistic 10.0 e OriginPro 8.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

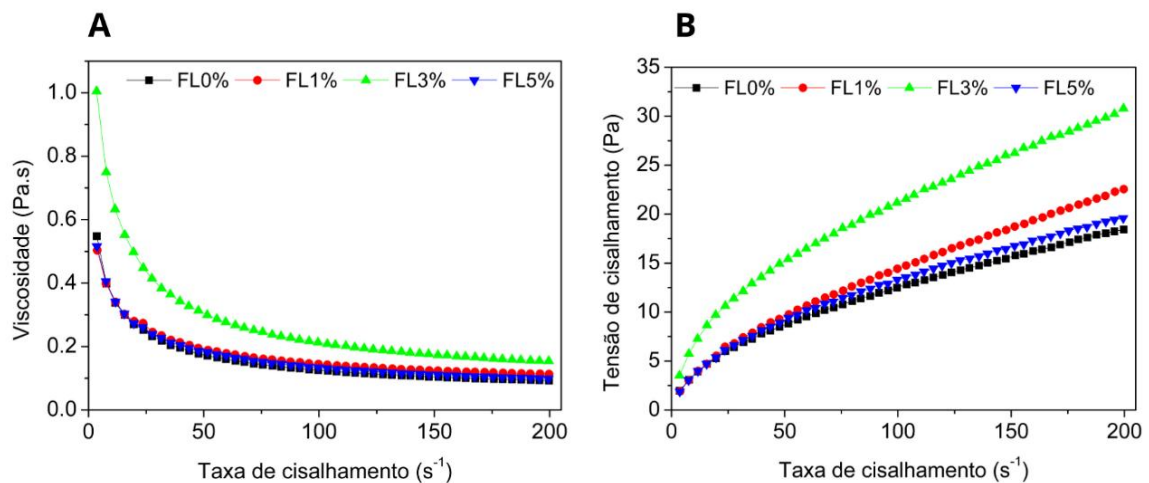
5.1 Caracterização dos filmes

5.1.1 Reologia das soluções filmogênicas

A reologia envolve o estudo do comportamento de materiais sólidos, semissólidos e líquidos ao serem submetidos à deformação ou fluxo, e pode incluir tanto sistemas newtonianos quanto não-newtonianos (Huang, 2019). O conhecimento acerca dos parâmetros reológicos é de fundamental importância no processo de elaboração de filmes (Tedesco *et al.*, 2021), pois pode impactar diretamente em

propriedades de espalhamento da solução, na formação homogênea de filmes, bem como a estabilidade da solução formada (Gordobil *et al.*, 2023). A figura 7 mostra o comportamento reológico das soluções filmogênicas dos filmes através do gráfico de viscosidade aparente pela taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento.

Figura 7. Reograma de filmes de amido e diferentes concentrações (% m/m) de lignina do pedúnculo de caju: FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina). (A) reograma de variação da viscosidade aparente x taxa de cisalhamento; (B) reograma de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento.



Fonte: autora (2026).

Foi possível observar através dos reogramas que as quatro formulações apresentaram curvas descendentes, com redução da viscosidade conforme a taxa de cisalhamento aumentava. Este comportamento é típico de fluidos não-newtonianos do tipo pseudoplástico, caracterizados pelo afinamento por cisalhamento, onde a viscosidade diminui à medida que a taxa de cisalhamento aumenta (Bair, 2019).

Os parâmetros reológicos apresentados na tabela 3 mostram que as quatro soluções filmogênicas apresentaram o mesmo índice de comportamento ($n < 1$), com valores de R^2 próximos a 1, confirmando serem fluidos do tipo pseudoplástico, melhor adequando-se ao modelo reológico da lei da potência, ou de Ostwald-de-Waele.

Tabela 3. Índice de consistência (k), índice de comportamento (n) e índice de estabilidade (R^2) de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju.

Amostra	K (Pa·s ⁿ)	n	R ²
FL0%	1,0358	0,5426	0,9996
FL1%	0,8886	0,6077	0,9994
FL3%	2,0575	0,5101	0,9994
FL5%	0,9887	0,5653	0,9996

FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

Fonte: autora (2026).

De forma geral, a análise do índice de consistência indica diferenças no comportamento de escoamento entre as formulações avaliadas. A solução FL3% apresentou o maior valor de viscosidade aparente, evidenciando maior resistência ao fluxo em relação às demais formulações. Esse comportamento sugere uma matriz internamente mais estruturada, possivelmente associada a interações mais intensas entre os componentes da solução filmogênica.

A formulação FL0% apresentou comportamento intermediário, com resistência ao escoamento inferior à observada para FL3%, porém superior às formulações com maiores teores de lignina. Já as soluções FL5% e FL1% exibiram valores de viscosidade próximos entre si, indicando comportamento reológico semelhante, embora a formulação FL5% tenha apresentado ligeira maior resistência ao escoamento.

Esses resultados reforçam que valores mais elevados do índice de consistência (K) estão diretamente relacionados a uma maior resistência da solução filmogênica ao fluxo, refletindo diferenças na organização estrutural e nas interações da matriz polimérica.

A Figura 6B apresenta comportamento coerente com as diferenças observadas entre as formulações nas curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento. Observa-se uma relação crescente e não linear entre essas variáveis, característica de fluidos não newtonianos, diferindo do comportamento típico de fluidos newtonianos, nos quais a tensão de cisalhamento aumenta de forma proporcional à taxa de deformação.

Dentre as formulações avaliadas, a solução FL3% apresentou maior

resistência ao escoamento ao longo da faixa de taxas de cisalhamento analisadas. As demais formulações exibiram comportamento intermediário, com valores de tensão de cisalhamento próximos entre si e apenas pequenas variações ao longo das curvas. A maior resistência ao fluxo observada para a formulação FL3%, quando comparada às formulações com maior teor de lignina, pode estar associada a uma melhor dispersão desse componente na matriz de amido. Em contrapartida, na formulação FL5%, a incorporação de maiores quantidades de lignina pode ter favorecido processos de aglomeração, resultando na formação de partículas de maior tamanho, o que pode comprometer a coesão da matriz e reduzir a resistência ao escoamento. Assim, os resultados sugerem que a formulação FL3% apresentou um equilíbrio mais favorável entre a quantidade de lignina incorporada e sua distribuição na matriz polimérica.

A análise reológica de misturas amido-lignina é fundamental para avaliar e caracterizar as interações que ocorrem entre os materiais, mas de acordo com a revisão feita por Diaz-Baca e Fatehi (2024), os estudos reológicos dessas misturas é ainda bastante limitada, visto que de todos os trabalhos avaliados, apenas um se deteve em aplicar uma análise de reologia. O estudo em questão é o de Wu *et al.* (2020), que desenvolveram um adesivo de papel separável à base de amido de milho e lignina sulfonato de sódio. O resultado da análise reológica corrobora com os do presente estudo, onde a viscosidade do adesivo diminuiu com o aumento da taxa de cisalhamento, revelando um afinamento por cisalhamento, caracterizando o mesmo comportamento pseudoplástico já descrito nesta pesquisa.

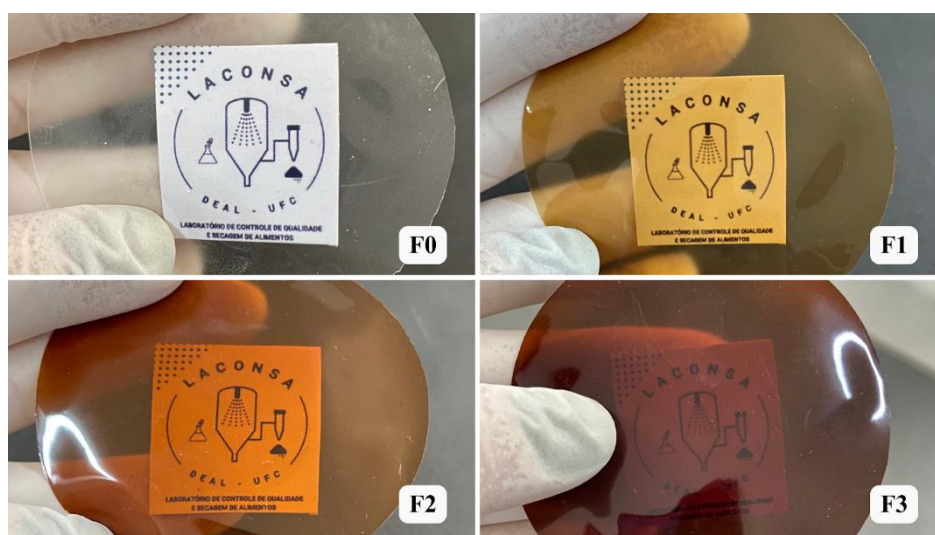
Soluções poliméricas com comportamento pseudoplástico apresentam elevada viscosidade quando submetidas a baixas taxas de cisalhamento. Esse fenômeno ocorre porque, em condição de repouso, as cadeias poliméricas presentes na solução formadora de filme ou na blenda encontram-se desorganizadas e entrelaçadas, formando uma estrutura interna irregular que dificulta o escoamento do material. Esse comportamento reológico é particularmente relevante na produção de filmes pelo método de *casting*, pois contribui para evitar o espalhamento excessivo da solução sobre a superfície de suporte durante a formação do filme (Toneli *et al.*, 2005).

Mesmo diante da ausência de estudos diretos de filmes amido-lignina, os resultados mostram uma ampla oportunidade de estudos para desenvolvimentos de materiais à base de amido-lignina através de caracterização reológica.

5.1.2 Caracterização dos filmes – aspecto visual e cor

A imagem apresentada na figura 8 mostra evidentes diferenças de cor entre os filmes formulados com amido e com incorporação de diferentes percentuais de lignina. De forma geral, os filmes apresentaram transparência e homogeneidade, sem indícios de agregação de partículas de lignina, mantendo aparência uniforme entre os tratamentos.

Figura 8. Imagens representativas dos filmes elaborados com amido de milho e diferentes concentrações (% p/p) de lignina do pedúnculo de caju: FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).



Fonte: autora (2026).

Conforme a tabela 4, todas as formulações apresentaram diferenças significativas entre os parâmetros. Observa-se que nos filmes com incorporação de lignina, os valores de L^* diminuíram (91,86 em FL0% para 59,01 em FL5%) à medida que a concentração de lignina aumentou, indicando que os filmes passaram de uma cor extremamente clara e transparente para filmes com escurecimento progressivo (valores próximos a 100 de L^* representam o branco, e valores mais próximos de zero, representam preto). Estes resultados corroboram com os de Silva *et al.* (2023), que elaboraram filmes com whey protein isolado e lignina, e encontraram valores de L^* próximos ao presente estudo (94,67 em filmes com 0% lignina e chegando a 51,56 em filmes com 8% de lignina). Desse modo, os menores valores de L^* no presente estudo são atribuídos aos filmes com maiores percentuais de lignina.

No que se trata da coordenada a^* , os resultados variaram de 1,95 a 10,24 (FL0% e FL5%, respectivamente), onde os filmes apresentaram uma intensificação de tons avermelhados com a adição de diferentes percentuais de lignina; e na coordenada b^* , que representa a tonalidade do azul ao amarelo, ocorreu intensificação de tons amarelados, conforme os percentuais de lignina aumentaram.

Segundo Yang *et al.* (2020) e Zhang e Naebe (2021), estes resultados são atribuídos às características inerentes dos grupamentos guacila presente em ligninas. Além de apenas adicionar cor aos filmes, devido às próprias características da lignina, muitos grupos funcionais presentes na molécula, como os cromóforos e estruturas aromáticas, são associadas a propriedades de bloqueio UV, o que é uma abordagem promissora para reduzir o risco de oxidação alimentar provocada pela exposição à radiação UV (Zadeh; O'keefe; Kim, 2018).

Para muitos consumidores, a coloração mais escura de materiais de embalagem pode ser inicialmente percebida como uma desvantagem, em razão da preferência por embalagens transparentes que permitem a visualização direta do produto. No entanto, para determinadas categorias de alimentos, especialmente aqueles com elevado teor lipídico, como carnes, peixes, oleaginosas e produtos lácteos, a redução da transparência torna-se um atributo funcional relevante.

Embalagens com menor transmitância à luz, particularmente na região do UV e da luz visível de alta energia, contribuem para a proteção do alimento contra processos de fotooxidação, retardando a degradação de lipídios, a perda de qualidade sensorial e a formação de compostos indesejáveis. Assim, embora menos transparentes, esses materiais podem agregar valor tecnológico e funcional ao produto, sendo mais adequados para aplicações em que a estabilidade oxidativa é um requisito prioritário.

Tabela 4. Cor de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações (% p/p) de lignina do pedúnculo de caju.

Amostra	L^*	a^*	b^*	ΔE
FL0%	$91,86 \pm 0,01^a$	$1,95 \pm 0,01^d$	$-2,95 \pm 0,01^d$	$7,34^d$
FL1%	$73,27 \pm 0,04^b$	$7,48 \pm 0,02^b$	$13,47 \pm 0,05^a$	$19,42^c$
FL3%	$63,22 \pm 0,02^c$	$10,24 \pm 0,00^a$	$5,17 \pm 0,03^b$	$26,79^b$

FL5%	59,01 ± 0,04 ^d	5,39 ± 0,01 ^c	-1,70 ± 0,02 ^c	29,75 ^a
------	---------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------

FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

Letras distintas na mesma linha apresentam diferenças significativas ao nível de 5% de significância ($p \leq 0,05$).

Fonte: autora (2026).

5.1.3 Espessura, resistência à tração e alongamento na ruptura

Segundo Chen *et al.* (2020), a avaliação das propriedades mecânicas de filmes é fundamental para garantir a viabilidade durante o processamento e o manuseio. Apesar de terem sido replicadas as mesmas condições de preparação, com quantidades fixas de amido e de glicerol, a incorporação de lignina em diferentes percentuais à matriz de amido promoveu alterações significativas na espessura e nas propriedades físicas e mecânicas dos filmes, conforme dados apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros das espessuras e propriedades mecânicas de filmes compostos de diferentes concentrações (% m/m) de lignina do pedúnculo de caju: FL0%, FL1%, FL3% e FL5%

Amostra	Espessura (mm)	Tensão na ruptura σ (MPa)	Elongação na Ruptura (%)
FL0%	0,10 ± 0,00 ^c	13,89 ± 1,40 ^a	29,04 ± 6,69 ^b
FL1%	0,12 ± 0,00 ^b	9,81 ± 0,74 ^b	41,25 ± 9,88 ^{ab}
FL3%	0,13 ± 0,00 ^{ab}	6,32 ± 0,73 ^c	57,00 ± 10,32 ^a
FL5%	0,13 ± 0,00 ^a	7,71 ± 1,52 ^{bc}	50,74 ± 14,40 ^a

FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

As médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Fonte: autora (2026).

O filme controle (FL0%) apresentou a menor espessura média (0,10 ± 0,00 mm) e os maiores valores de tensão na ruptura (13,89 ± 1,40 MPa), diferindo significativamente dos filmes contendo lignina ($p < 0,05$). Esse comportamento indica uma matriz mais rígida e resistente, associada a uma elongação moderada (29,04 ±

6,69%), típica de filmes de amido não modificados, nos quais a mobilidade das cadeias poliméricas é limitada em razão das intensas interações intermoleculares.

A adição de 1% de lignina (FL1%) resultou em aumento significativo da espessura do filme ($0,12 \pm 0,00$ mm), acompanhado pela redução da resistência à tração ($9,81 \pm 0,74$ MPa; $p < 0,05$) e pelo incremento da elongação na ruptura ($41,25 \pm 9,88\%$) em comparação ao filme controle. Esses resultados sugerem que, em baixas concentrações, a lignina atua como um agente de flexibilização parcial da matriz amilácea, reduzindo a rigidez do material e favorecendo maior capacidade de deformação.

Para a formulação FL3%, a espessura manteve-se elevada ($0,13 \pm 0,00$ mm), associada a menores valores de resistência à tração ($6,32 \pm 0,73$ MPa) e aos maiores percentuais de elongação ($57,00 \pm 10,32\%$). Esse comportamento indica uma diminuição mais pronunciada da coesão da matriz polimérica, associada a uma organização menos eficiente das cadeias na estrutura do filme. A menor eficiência de empacotamento resulta em maior espaçamento intermolecular, o que favorece o aumento da mobilidade das cadeias poliméricas e, conseqüentemente, compromete a integridade estrutural do material. O aumento da ductilidade observado pode estar associado à atuação da lignina como agente plastificante, conforme descrito em estudos que incorporaram concentrações moderadas desse componente em outros polímeros, como hidroxipropilmetilcelulose (Martín-Sampedro *et al.*, 2023) e gelatina de peixe (Núñez-Flores *et al.*, 2013).

No filme contendo 5% de lignina (FL5%), a espessura permaneceu elevada ($0,13 \pm 0,00$ mm), enquanto a tensão na ruptura apresentou discreta recuperação ($7,71 \pm 1,52$ MPa) em relação ao FL3%, sem diferença estatística significativa entre esses tratamentos ($p > 0,05$). A elongação manteve-se alta, mas com tendência à redução quando comparado à FL3% ($50,74 \pm 14,40\%$), indicando que aumentos adicionais no teor de lignina não resultam em ganhos proporcionais de elasticidade.

De maneira geral, observou-se uma relação inversa entre a tensão na ruptura e a elongação, pois são análises que apresentam comportamento inversamente proporcional comportamento característico de filmes poliméricos biodegradáveis. Os resultados obtidos estão em consonância com estudos anteriores, que relatam redução da resistência mecânica e aumento da deformabilidade após a

incorporação de lignina em matrizes amiláceas (Campagner *et al.*, 2014; Spinoza *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2023).

Os resultados de tensão na ruptura do presente estudo corroboram com os de Campagner *et al.* (2014), que desenvolveram filmes de amido e lignossulfonatos, matéria prima oriunda da lignina, e obtiveram resultados semelhantes, de redução da tensão na ruptura com o aumento da concentração de lignina adicionada ao filme. Esses dados são consistentes com as descobertas de Kim *et al.* (2023), que constataram que a adição de lignina carboxilada hidrofílica (CL) aos filmes compósitos de nanofibrilas de celulose (TOCNF) apresentou desempenho inferior das propriedades mecânicas. À medida que o teor de CL aumentou, a tensão na ruptura dos filmes diminuiu, passando de $122,3 \pm 17,3$ MPa no filme controle, para $92,3 \pm 19,5$ MPa, $85,9 \pm 2,1$ MPa e $34,0 \pm 8,8$ MPa., nos filmes contendo 5%, 10% e 20% de lignina, respectivamente.

Em contraste, Reis *et al.* (2025) ao elaborar filmes de PLA com incorporação de lignina em concentrações de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, encontrou que todos os filmes com lignina exibiram uma maior tensão na ruptura quando comparados ao filme de PLA puro, sendo o de 6% aquele que apresentou o valor mais alto. Embora os autores mostrem resultados diferentes ao encontrado no presente estudo, ambos os trabalhos indicam que concentrações elevadas de lignina não promovem melhorias proporcionais nas propriedades mecânicas dos filmes, evidenciando a existência de um limite ótimo de incorporação.

Esse mesmo comportamento foi observado e relatado por Sun *et al.* (2024), ao desenvolver filmes compostos por quitosana, bentonita e lignossulfonatos. Foi percebido no estudo que a adição de nanopartículas de lignossulfonatos melhorou efetivamente o desempenho mecânico dos filmes, em comparação aos filmes de quitosana puro e quitosana com bentonita. Mas ao acrescentar valores superiores a 10% em peso de lignossulfonatos, a tensão na ruptura diminuiu significativamente. Segundo os autores, concentrações mais elevadas desse componente nos filmes tende a criar vazios e separação de fases, prejudicando o desempenho mecânico. Entretanto, ao estudar a alongação na ruptura, os autores demonstraram que valores de até 10% em peso de lignossulfonatos exibe excelente flexibilidade, mas acima disso os valores de alongamento na ruptura tendem a diminuir, resultado que concorda com os encontrados na presente pesquisa.

5.2 Propriedades hidrofílicas e de barreira dos filmes

5.2.1 Solubilidade, umidade e absorção de umidade

A solubilidade é uma característica fundamental para o desenvolvimento de embalagens de alimentos e frutas, pois a absorção de água pode vir a interferir na proteção dos alimentos e de suas propriedades de barreira. Desta forma, as embalagens devem ser estáveis e com menor solubilidade, a fim de serem aplicados em frutas e alimentos com baixo teor de água (Fonseca, 2015).

A incorporação de lignina à matriz de amido promoveu modificações nas propriedades hidrofílicas dos filmes, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Propriedades hidrofílicas de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações (% p/p) de lignina do pedúnculo de caju.

Amostra	Solubilidade (%)	Umidade (%)	Absorção de umidade (%)
FL0%	18,33 ± 1,96 ^a	13,04 ± 0,00 ^a	86,32 ± 0,78 ^a
FL1%	15,56 ± 1,96 ^a	10,03 ± 0,00 ^a	77,99 ± 1,50 ^b
FL3%	15,46 ± 0,80 ^a	9,22 ± 0,02 ^a	80,92 ± 1,57 ^b
FL5%	15,58 ± 0,53 ^a	9,55 ± 0,01 ^a	68,64 ± 1,82 ^c

FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Quando todas as médias apresentam a mesma letra, não houve diferença estatisticamente significativa entre as formulações.

Fonte: autora (2026).

Observou-se tendência de redução nos valores de solubilidade e teor de umidade à medida que o teor de lignina aumentou nas formulações FL1%, FL3% e FL5%. Contudo, essas variações não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, comportamento que indica diminuição da afinidade dos filmes com a água, compatível com o caráter hidrofóbico da lignina, amplamente descrito na literatura.

No presente estudo, o filme de controle (FL0%) apresentou o maior teor de umidade (13,04%), com tendência de redução gradual à medida que a lignina foi

incorporada às formulações, chegando a 9,55% em FL5%. A absorção de umidade apresentou efeito mais pronunciado, com redução de 86,32% no filme controle (FL0%) para 68,64% no filme contendo 5% de lignina (FL5%), indicando que a incorporação de maiores proporções do polímero limita a capacidade de inchaço da matriz polimérica e, conseqüentemente, reduz a higroscopicidade dos filmes. Esse comportamento pode ser atribuído à natureza hidrofóbica e à estrutura complexa da lignina, além da interação existente entre os OH- que formam pontes de hidrogênio, que dificultam a penetração e a difusão de moléculas de água na matriz de amido, restringindo a interação amido-água (Sarwono *et al.*, 2018).

Shankar, Reddy e Rhim (2015) obtiveram resultados distintos aos observados no presente estudo, ao avaliarem filmes de ágar e lignina. O filme de ágar puro apresentou solubilidade de 25,6%, enquanto filmes com 1, 3, 5 e 10% de lignina apresentaram valores superiores, de 26,9%, 28,3%, 31% e 34%, respectivamente. Estes resultados indicaram que o teor de lignina adicionada pode influenciar na solubilidade de filmes elaborados.

Tendência similar de diminuição de umidade foi encontrada por Shankar, Reddy e Rhim (2015), com filme de ágar puro apresentando 20,3% de umidade e filme de ágar + 10% de lignina apresentando 14,8%. Segundo os autores, a redução dos valores de umidade pode ser causada pelas fortes forças intermoleculares dos grupamentos hidroxilas da lignina e o ágar.

Yu *et al.* (2025), relataram resultados semelhantes de absorção de umidade ao elaborarem filmes de quitosana e lignina da palha do milho. O filme de quitosana puro apresentou valores de aproximadamente 140%, os quais diminuíram para 108,8% quando 5% em peso de lignina foi adicionada ao filme. Com a incorporação de maiores concentrações da lignina, a ligação entre ela e quitosana se tornou mais forte, reduzindo a absorção de água no filme. De acordo com Shi *et al.* (2008), o inchaço de filmes pode estar relacionado ao grau de reticulação, o qual tende a diminuir quando o teor do agente reticulador aumenta, como é o caso da lignina, formando assim uma rede mais densa e menos suscetível à absorção de umidade.

5.2.2 Permeabilidade ao vapor de água (PVA) e ângulo de contato

A permeabilidade ao vapor de água em filmes formulados com amido é de fundamental importância, principalmente se sua aplicação for para embalagens, pois

demonstra a capacidade que os filmes possuem para regular a transferência de vapor de água entre o ambiente e o alimento (Aqilil *et al.*, 2017; Bhat *et al.*, 2013).

Embora os resultados de umidade e solubilidade tenham sido bastante positivos, a permeabilidade ao vapor de água dos filmes apresentou comportamento distinto, com o filme controle apresentando a menor PVA dentre todas as formulações, aumentando progressivamente de 1,08 g·mm/m²·d·kPa (FL0%) para 1,65 g·mm/m²·d·kPa (FL5%), conforme tabela 7.

Uma possível explicação para o aumento da permeabilidade ao vapor de água nos filmes contendo lignina está relacionada ao aumento de sua concentração na matriz amilácea, o que pode favorecer a formação de aglomerados e reduzir a eficiência das interações entre os grupamentos hidroxila dos polímeros. Esse fenômeno pode resultar em maior disponibilidade de hidroxilas livres na estrutura do filme, facilitando a difusão do vapor de água através da matriz e, conseqüentemente, elevando os valores de PVA (Zolfaghari *et al.*, 2024). Além disso, fatores ambientais podem exercer influência direta sobre esse comportamento, uma vez que o aumento da temperatura e da umidade relativa intensifica a mobilidade das moléculas de água, contribuindo para maiores valores de permeabilidade ao vapor de água (Chinma *et al.*, 2015).

Tabela 7. Propriedades barreira de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações (% p/p) de lignina do pedúnculo de caju: FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

Amostra	PVA (g·mm/kPa·h·m ²)	Ângulo de contato
FL0%	1,08 ± 0,14 ^c	68,62 ± 1,84 ^c
FL1%	1,25 ± 0,24 ^{bc}	70,92 ± 1,73 ^{bc}
FL3%	1,50 ± 0,07 ^{ab}	73,87 ± 1,92 ^{ab}
FL5%	1,65 ± 0,09 ^a	77,00 ± 1,85 ^a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: autora (2026).

O aumento na PVA encontrado no presente estudo contrasta com os resultados obtidos por Shankar, Rhim e Won, (2018), que tiveram redução dos valores de PVA após a inserção de nanopartículas de prata e lignina em filmes de PLA. A

justificativa dos autores é que a compatibilização dos polímeros forma uma rede mais compacta, o que dificulta a saída do vapor de água dos filmes. Kim *et al.* (2023) relataram tendência semelhante, com diminuição da PVA em filmes compósitos de nanofibrilas de celulose (TOCNF) incorporados com lignina carboxilada hidrofílica (CL). O filme controle apresentou $93,7 \text{ g}\cdot\text{mm}/\text{kPa}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^2$, enquanto as formulações com 5%, 10% e 20% de lignina exibiram 74,9, 57,2 e 47,8 $\text{g}\cdot\text{mm}/\text{kPa}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^2$, respectivamente. Segundo os autores, o conteúdo de lignina hidrofílica tornou a estrutura dos filmes de nanofibrilas de celulose mais densa, ocasionando diminuição dos valores de PVA, que segundo os autores, se deve às características hidrofóbicas da lignina, que criam um ambiente mais dificultoso para a movimentação do vapor de água (Lisý *et al.*, 2022; Müller *et al.*, 2017).

Baixa permeabilidade ao vapor de água é um atributo desejável para o desenvolvimento de embalagens e revestimentos, pois minimiza perda ou absorção de água dos alimentos, prolongando a sua vida útil (Zhang *et al.*, 2021). Diante destes resultados, esperava-se que os filmes de amido com incorporação de lignina apresentassem menores taxas de PVA, porém não foi a tendência observada neste estudo.

A molhabilidade da superfície de filmes de amido puro e de filmes de amido com diferentes concentrações de lignina foi determinada pela medição do ângulo de contato com a água. Materiais que apresentem $\theta < 90^\circ$ são considerados hidrofílicos (Parit *et al.*, 2018). Os ângulos de contato dos filmes são apresentados na tabela 7. O filme controle (FL0%) exibiu um ângulo de $68,62^\circ$, que aumentou para $70,92^\circ$ (FL1%), $73,87^\circ$ (FL3%) e 77° (FL5%). Este fato é associado à presença de cadeias apolares e anéis aromáticos da lignina, que reduzem a afinidade da superfície pela água (Yang *et al.*, 2020).

Estes resultados são consistentes com os de Freitas *et al.* (2021), que desenvolveram filmes de amido termoplástico incorporados com lignina kraft. Os autores observaram que o filme de amido puro apresentou ângulo de contato de $58,37^\circ$, enquanto a adição de 2%, 4% e 8% de lignina promoveu aumento progressivo desse parâmetro para $65,52^\circ$, $70,92^\circ$ e $90,25^\circ$, respectivamente.

Ni *et al.* (2022) desenvolveram filmes de amido com nanopartículas de lignina (LNPs) e observaram que após adicionar as LNPs aos filmes, o ângulo de contato do filme de amido puro aumentou de 65° para 98° e 118° , ao adicionar 1% e

3% de LNP, respectivamente. A justificativa dada para este comportamento é que essa aglomeração de nanopartículas é rica em grupos metoxi hidrofóbicos, que formam uma camada densa, coesa e pouco permeável à água. Constatações semelhantes foram observadas por Yu *et al.* (2025), ao elaborarem filmes de quitosana e lignina da palha do milho. Os filmes de quitosana por si só já apresentam excelente hidrofobicidade, o que foi confirmado no filme de quitosana puro, com um ângulo de contato de 103, 5°. Ao adicionar a lignina em 5% de peso, o valor do ângulo de contato aumentou para 148,9°, demonstrando uma intensificação da hidrofobicidade dos materiais.

De forma semelhante, Dou *et al.* (2024) observou tendência similar em filmes compósitos de PVA e PVA/lig DTPA (lignina alcalina modificada com ácido dietilenotriaminopentaacético). O filme de PVA puro apresentou baixo ângulo de contato (38°), ao passo que a adição de 3% de lignina aumentou para 85, 44°. Essa melhora da hidrofobicidade está relacionada à densificação das conexões entre PVA e lignina DPTA nos filmes.

5.3 Isotermas de sorção dos filmes de amido com incorporação de lignina do pedúnculo do caju

A absorção de umidade é um bom indicativo de quão sensível um material é ao contato com água. Em filmes produzidos à base de amido, o teor de umidade pode influenciar diretamente tanto as características físicas quanto as propriedades de barreira do material (Mali *et al.*, 2005). Na tabela 8 encontram-se os resultados dos modelos matemáticos para os filmes, que foram ajustados para BET, GAB, Oswin e Peleg com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvios percentuais médios (P%) e qui-quadrado (χ^2).

Tabela 8. Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados às isotermas de adsorção de água, a 25°C e 35 °C, dos filmes de amido e incorporados com lignina do pedúnculo de caju, seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvios percentuais médios (E%) e qui-quadrado (χ^2).

Parâmetros	FL0%	FL1%	FL3%	FL5%
------------	------	------	------	------

	25 °C	35 °C	25 °C	35 °C	25 °C	35 °C	25 °C	35 °C
BET								
X_m	0,142	0,183930	0,242	0,131	0,144	0,118	0,182	0,103
C	0,643	0,340	0,198	10,124	0,519	2,578	0,282	3,273
R²	0,99690	0,99732	0,99780	0,97254	0,99907	0,98994	0,99530	0,99237
E (%)	7,527	11,464	7,636	15,255	2,845	9,900	8,184	8,010
χ²	0,00050	0,00093	0,00055	0,00452	0,00006	0,00093	0,00042	0,00056
GAB								
X_m	0,077	0,074	0,084	21,515	0,098	5,115	0,064	2,598
C	4,909	3,121	1,438	0,018	0,937	0,042	2,766	0,084
k	1,061	1,068	1,066	0,599	1,043	0,684	1,087	0,663
R²	0,99931	0,99954	0,99954	0,98865	0,99930	0,99358	0,99977	0,99675
E (%)	2,645	2,796	2,707	10,877	2,073	7,361	1,762	5,092
χ²	0,00015	0,00021	0,00015	0,00251	0,00006	0,00079	0,00003	0,00032
Oswin								
a	0,112	0,096	0,082	0,246	0,100	0,171	0,082	0,159
b	1,091	1,223	1,345	0,704	1,144	0,826	1,274	0,790
R²	0,99719	0,99771	0,99806	0,98029	0,99914	0,99123	0,99578	0,99425
E (%)	7,178	10,684	7,102	13,569	2,705	9,307	7,647	7,197
χ²	0,00045	0,00079	0,00049	0,00326	0,00005	0,00081	0,00038	0,00042
Peleg								
K1	0,789	1,057	1,345	0,589	0,586	0,492	0,818	0,415
N1	4,814	5,763	6,909	2,436	4,042	2,683	5,373	2,479
K2	0,789	1,057	1,345	0,589	0,586	0,492	0,818	0
N2	4,814	5,763	6,909	2,436	4,042	2,683	5,373	2,479
R²	0,98313	0,98475	0,98581	0,99426	0,98963	0,99502	0,97431	0,99756
E (%)	16,023	26,098	21,096	7,919	10,204	4,397	19,326	1,992
χ²	0,00541	0,01050	0,00705	0,00191	0,00124	0,00092	0,00457	0,00036

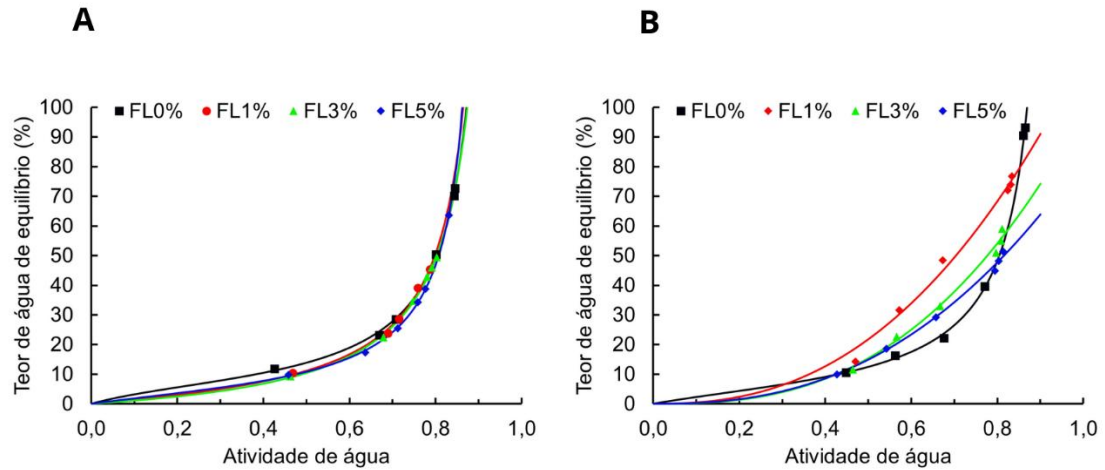
FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

X_m -conteúdo de umidade na monocamada molecular (g de água por g de sólidos secos); R² - coeficiente de determinação; E (%) - erro médio relativo; C, K - constante de sorção da camada molecular; n - número de camadas moleculares; a, b - parâmetros de ajuste, K1, K2, N1, N2 são constantes modelo.

Fonte: autora (2026).

Analisando os formatos das isotermas na figura 9, as curvas exibiram perfil sigmoidal do tipo III (formato em J), caracterizado por baixa adsorção em atividades de água reduzidas e um aumento considerável em atividades de água mais altas. Esta observação é compatível com resultados por Chinma, Ariaahu e Alakali (2013) ao estudarem as isotermas de sorção de filmes produzidos com amido de mandioca e concentrado proteico de soja. Os autores também apresentaram curvas em J, com isotermas do tipo III, de acordo com a classificação de Al-Muhtaseb (2002).

Figura 9. Isotermas de sorção dos filmes de amido e incorporados com diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju a 25 °C (A) e 35 °C (B).



FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para as amostras mantidas a 25 °C, todas foram melhor descritas pelo modelo de GAB (Brunauer-Emmett-Teller). Apenas na amostra FL3% o menor valor de χ^2 não apareceu em GAB, mas sim no modelo de Oswin. Mesmo assim, essa diferença mostrou-se muito pequena, na ordem de 10^{-5} , não sendo suficiente para mudar a interpretação. Além disso, em FL3% o modelo GAB ainda apresentou o maior R^2 e o menor erro percentual (E%), reforçando que ele continua sendo o modelo mais seguro e confiável também para essa formulação.

Quando a temperatura aumentou para 35 °C, houve mudança no comportamento dos filmes. A amostra FL0% manteve-se ainda compatível com o modelo de GAB, enquanto FL1%, FL3% e FL5% ajustaram-se melhor ao modelo de Peleg, mostrando que o aumento da temperatura alterou a forma como essas formulações absorveram umidade. Em FL3% e FL5%, o modelo escolhido não cumpriu simultaneamente todos os critérios de qualidade ($> R^2$, $< E\%$ e $< \chi^2$), mas como apresentou o maior R^2 e o menor E%, Peleg ainda pode ser considerado o modelo mais adequado. Este modelo é uma alternativa útil aos modelos tradicionais como GAB e BET por possuir um parâmetro a mais, ajudando a ajustar melhor os dados que não se encaixam nas equações mais clássicas.

Ao analisarmos os gráficos de isotermas individualmente, notamos que todas as formulações apresentam comportamento semelhante a 25 °C e diferenças

ficaram mais evidentes quando a temperatura foi elevada para 35 °C. Dentre todas as amostras, FL5% foi a que apresentou a menor adsorção de água, especialmente em 35 °C, condição em que o teor de água de equilíbrio reduziu de forma mais expressiva, passando de 90% em média em FL0% para aproximadamente 65% em FL5%. Outro ponto que merece destaque é o efeito da atividade de água. Na faixa de $a_w < 0,40$, todos os tratamentos demonstraram semelhanças, sugerindo que a presença da lignina não causa influência perceptível na sorção nessa faixa de atividade de água. Porém, quando a a_w foi superior a 0,70, foi possível notar claramente separação entre as curvas e principalmente uma redução no teor de água em equilíbrio nas formulações a 35 °C. Esse comportamento sugere que em concentrações mais altas, a lignina reduz a afinidade dos filmes aos vapores de água. Esse era um resultado já esperado, pois como já se sabe, a lignina possui caráter hidrofóbico, contribuindo para melhorar a estabilidade estrutural dos filmes mesmo em altas temperaturas e alta atividade de água.

Cova *et al.* (2009) apontaram comportamento semelhante de hidrofobicidade ao desenvolver filmes de amido de mandioca não modificado e modificado com anidrido succínico (OSA). Segundo os autores, quando há um aumento da constante C da equação de GAB, a hidrofobicidade do material aumenta pois é necessário maior energia para adsorção molecular nos sítios ativos. Esse resultado corrobora com o presente estudo, onde a constante C passa de 1,438 em F1 a 2,766 em F3, confirmando os dados apresentados anteriormente de ser a formulação que apresentou a menor absorção de umidade dentre todos os filmes testados.

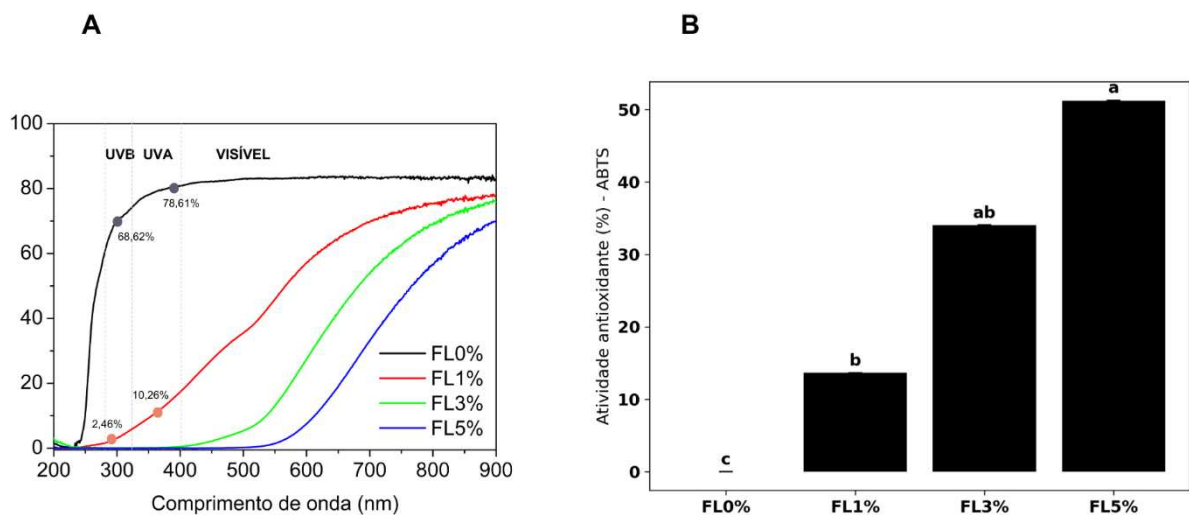
Em uma pesquisa análoga, com fibras de celulose que possuem caráter hidrofóbico assim como a lignina, Avérous *et al.* (2001) demonstraram redução do teor de umidade de equilíbrio de filmes de amido de trigo incorporados com fibras de celulose. Segundo os autores, isso acontece devido às interações entre as fibras da celulose e os sítios hidrofílicos do amido, substituindo interações do tipo amido-água que é prevalente em filmes sem fibras.

5.4 Propriedades funcionais dos filmes - Espectroscopia UV-vis e atividade antioxidante

Um dos principais requisitos para filmes destinados à embalagem de alimentos é a presença de propriedades funcionais capazes de proteger o produto contra processos degradativos, especialmente aqueles induzidos por radiação UV e oxidação lipídica. A exposição à luz ultravioleta pode desencadear reações de foto-oxidação, promovendo a formação de radicais livres, degradação de pigmentos, alterações sensoriais e redução do valor nutricional dos alimentos (Yang *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a incorporação de lignina aos filmes de amido de milho mostrou-se uma estratégia eficaz para conferir simultaneamente capacidade de bloqueio à radiação ultravioleta e atividade antioxidante, características altamente desejáveis para o desenvolvimento de embalagens ativas. Conforme observado na Figura 10, a eficiência do bloqueio à luz UV foi diretamente proporcional à concentração de lignina incorporada à matriz de amido, que acompanhou o desempenho antioxidante (Tabela 9).

Figura 10. Espectros de absorção UV-vis (A) e atividade antioxidante (B) de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju.



FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

Fonte: autora (2026).

Tabela 9. Capacidade antioxidante de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina

Amostra	Atividade antioxidante (%) - ABTS	Atividade antioxidante (%) - ABTS - Filmes reciclados
FL0%	0,0 ± 0,00 ^c	--
FL1%	13,65 ± 0,01 ^b	15,41 ± 0,00 ^b
FL3%	34,06 ± 0,01 ^{ab}	37,73 ± 0,07 ^a
FL5%	51,24 ± 0,03 ^a	--

FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina)

Fonte: autora (2026).

O filme controle (FL0%) apresentou elevada transmitância, com 68,62% na faixa UVB e 78,61% na faixa UVA, evidenciando proteção UV insignificante. De forma coerente, esse mesmo filme apresentou atividade praticamente nula de sequestro do radical ABTS·+, demonstrando que a matriz de amido, isoladamente, não contribui significativamente para a proteção contra radiação ou neutralização de radicais livres.

A incorporação de apenas 1% de lignina (FL1%) resultou em redução expressiva da transmitância, alcançando 2,46% na faixa UVB e 10,26% na faixa UVA, indicando que pequenas quantidades do biopolímero já promovem melhoria substancial nas propriedades ópticas de barreira. Paralelamente, observou-se aumento significativo da atividade antioxidante, evidenciando que a lignina não atua apenas como barreira física à radiação incidente, mas também como agente químico capaz de neutralizar espécies reativas.

Os filmes FL3% e FL5% apresentaram transmitância próxima de 0% na região UV, caracterizando bloqueio praticamente total da radiação nesse espectro. Foi observado também um aumento progressivo da atividade antioxidante, atingindo 51,24% no filme FL5%, configurando comportamento claramente dose-dependente. Esses resultados demonstram que o incremento na concentração de lignina potencializa simultaneamente duas propriedades funcionais complementares: a proteção física contra a incidência de radiação UV e a ação antioxidante por sequestro de radicais livres.

Esse comportamento está associado à natureza estrutural da lignina, um polímero aromático naturalmente marrom, rico em cromóforos, cetonas e grupos fenólicos, capazes de absorver radiação UV (Mousavi *et al.*, 2021). Além disso, estudos indicam que a exposição à radiação UV pode intensificar a absorção da lignina nesse espectro, em razão da conversão de grupos metoxi e hidroxilas aromáticas em grupamentos carbonila (Guo *et al.*, 2019). Resultados semelhantes foram relatados por Parit *et al.* (2018) ao produzirem filmes de celulose nanocristalina (CNC) com lignina alcalina (LA) e lignina de madeira macia (LMM), em concentrações que variaram de 1 a 10% em peso. Os autores relataram que o filme de celulose nanocristalina apresentou alta transmitância (90%) nas regiões UV e visível, demonstrando fraca capacidade de bloqueio, enquanto o uso de 1% LMM e 1% de LA bloquearam todo o espectro UV-C e parcialmente o UV-C, respectivamente. Ao adicionar 10% em peso de ambas as ligninas, houve proteção total, com completo bloqueio nos espectros UV-C, UV-B e UV-A para ambos os filmes.

A atividade antioxidante observada pode ser atribuída à presença de grupamentos hidroxila e fenólicos na estrutura da lignina, que atuam na estabilização de radicais livres por meio da doação de hidrogênio (Begali *et al.*, 2021). Além disso, durante a preparação dos filmes, a solubilização prévia da lignina em meio alcalino (NaOH) pode ter promovido redução de sua massa molecular, aumentando sua solubilidade e favorecendo maior exposição de grupos funcionais reativos (Jiang *et al.*, 2018). Estudos também indicam que o caráter antioxidante da lignina está relacionado à migração de frações moleculares mais reativas no interior da matriz polimérica (Crouvisier-Ourion *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2022).

Resultados semelhantes foram reportados por Espinoza *et al.* (2015), que não observaram atividade antioxidante em filmes de amido de trigo duro sem lignina, mas registraram incremento progressivo da atividade de eliminação de radicais livres com o aumento da concentração do biopolímero. Entretanto, ao incorporar lignina, os autores registraram atividades antioxidantes de 12,33%, 23,37% e 43,68% em filmes contendo 5%, 10% e 20%, respectivamente. A atividade antioxidante da lignina é atribuída principalmente à presença de grupamentos hidroxila e fenólicos em sua estrutura, os quais atuam na estabilização de radicais livres por meio da doação de hidrogênio (Begali *et al.*, 2021).

Além disso, estudos indicam que o caráter antioxidante da lignina não está relacionado apenas a esses grupamentos funcionais, mas também à capacidade de migração de frações moleculares mais reativas no interior da matriz polimérica (Crouvisier-Ourion et al., 2016; Zhang et al., 2022).

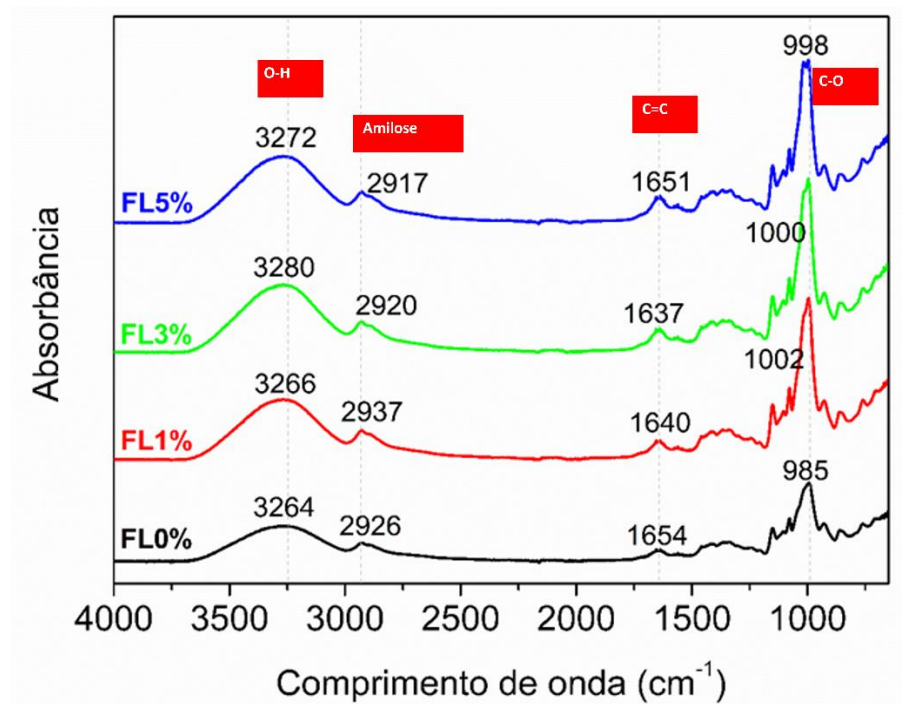
Dessa forma, os filmes desenvolvidos no presente estudo podem ser classificados como materiais com propriedades funcionais ativas, uma vez que associam elevada capacidade de bloqueio à radiação UV à ação antioxidante significativa. Essa combinação é particularmente relevante para aplicações em embalagens de alimentos fotossensíveis e suscetíveis à oxidação lipídica, contribuindo para o prolongamento da estabilidade e da vida útil do produto, além de minimizar alterações indesejáveis como despigmentação, perda de sabor e formação de compostos potencialmente tóxicos (Yang *et al.*, 2020).

5.6 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) dos filmes

A análise foi realizada por meio da comparação dos espectros dos filmes de amido puro (FL0%) e de amido com diferentes concentrações de lignina (1, 3 e 5%), e são mostrados na figura 11.

Uma banda larga foi observada entre 3600 e 3000 cm^{-1} resultante do estiramento O–H e a presença de grupamentos hidroxilas (Pfister e Zeeman, 2016). Neste ponto, é possível notar um suave aumento de intensidade nas amostras que tiveram a incorporação de lignina. Isso acontece, de forma geral, devido às amplas interações intra e intermoleculares (Rangan *et al.*, 2017). Observa-se também outra banda em aproximadamente 2900 - 2940 cm^{-1} , que segundo Oliveira *et al.* (2018), refere-se ao conteúdo de amilose, presente no amido, e que compõe a matriz base de todos os filmes. A presença de picos próximos à 1600 cm^{-1} é atribuída à vibração de esqueletos aromáticos (C=C), confirmando a presença de anéis aromáticos associados à lignina (Aqlil, 2017). Picos entre 1100 e 800 cm^{-1} são indicativos de deformação de ligações C-O pertencentes às unidades estruturais dos polissacarídeos (Wang *et al.*, 2022).

Figura 11. Espectros de FTIR de filmes compostos por amido de milho e lignina do pedúnculo de caju.



FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina).

Fonte: autora (2026).

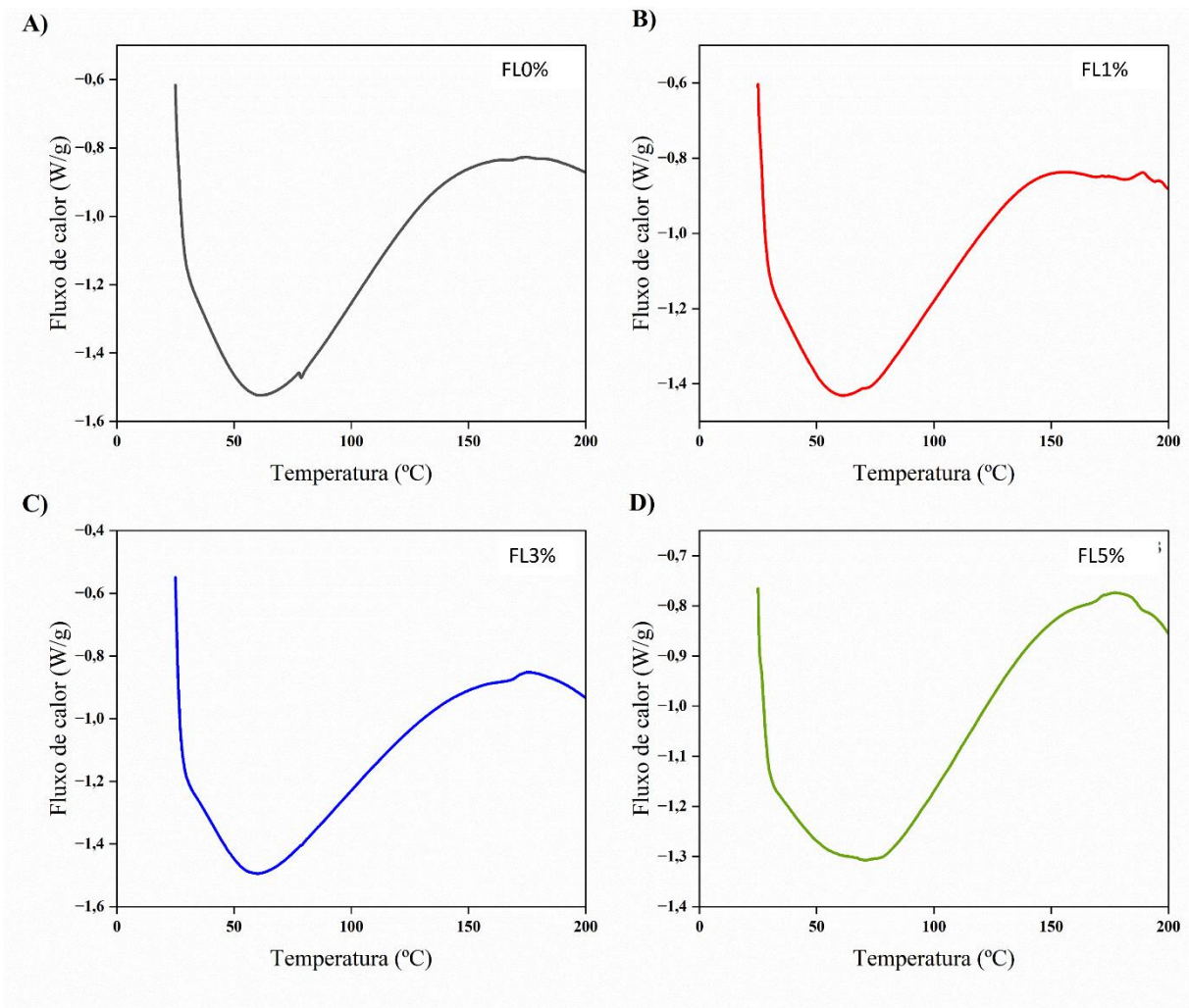
De forma geral, os espectros do filme de amido puro e daqueles incorporados com diferentes percentuais de lignina são bastante semelhantes, já que o amido de milho é o principal polímero constituinte dos filmes. A presença da lignina causou poucas alterações, como leves deslocamentos de bandas e aumento/diminuição de picos, sem surgimento ou desaparecimento de bandas, evidenciando boa interação entre os polímeros e reorganização estrutural. Outro ponto a destacar é que a presença do glicerol na formulação dos filmes não foi capaz de apresentar modificações nos espectros, pois existem muitas semelhanças entre os grupos funcionais do plastificante e do amido, conforme já evidenciado na literatura (Abotbina *et al.*, 2021; Tarique, Sapuan e Khalina, 2021).

5.7 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A calorimetria exploratória diferencial é uma metodologia termoanalítica bastante utilizada para fazer caracterizações de polímeros à base de amido e lignina (Amit *et al.*, 2021; Yu e Christie, 2001).

Durante a análise, as amostras são aquecidas de forma controlada e podem apresentar diferentes transformações físicas, como transição vítrea e fusão. Em filmes de amido e lignina, conhecer a temperatura de transição vítrea (T_g) e ponto de fusão cristalina (T_m) é de fundamental importância pois são partes essenciais na análise térmica e estabelece quais são as aplicações mais indicadas e quais são as alterações causadas pelas modificações químicas que ocorrem durante a varredura. As transições térmicas dos filmes são apresentadas na figura 12.

Figura 12. Curvas de DSC de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju.



A: filme FL0%, B: filme FL1%, C: filme FL3% e D: filme FL5%.

Fonte: autora (2026).

O filme FL0% exibiu um primeiro evento endotérmico próximo a 60 °C, associado à perda de água livre e ligada à matriz de amido, seguido por um segundo evento próximo a 160 °C, relacionado a fusões parciais e rearranjos cristalinos do amido.

Para FL1%, o comportamento foi bastante semelhante ao filme controle no primeiro pico, com leve redução de intensidade na faixa de 60 °C, referente à perda de umidade. É possível notar que o segundo pico acontece em uma temperatura levemente mais baixa que FL0%, aproximadamente a 155 °C, o que pode indicar interação entre amido e lignina.

O primeiro pico de FL3% manteve-se semelhante aos de FL0% e FL1%, com diferença no pico de fusão, deslocando-se para aproximadamente 176 °C. Esta ampliação de transição é sugestiva de redução de cristalinidade e melhor dispersão

da lignina na matriz do amido de milho, contribuindo para melhorar a estabilidade térmica dos filmes.

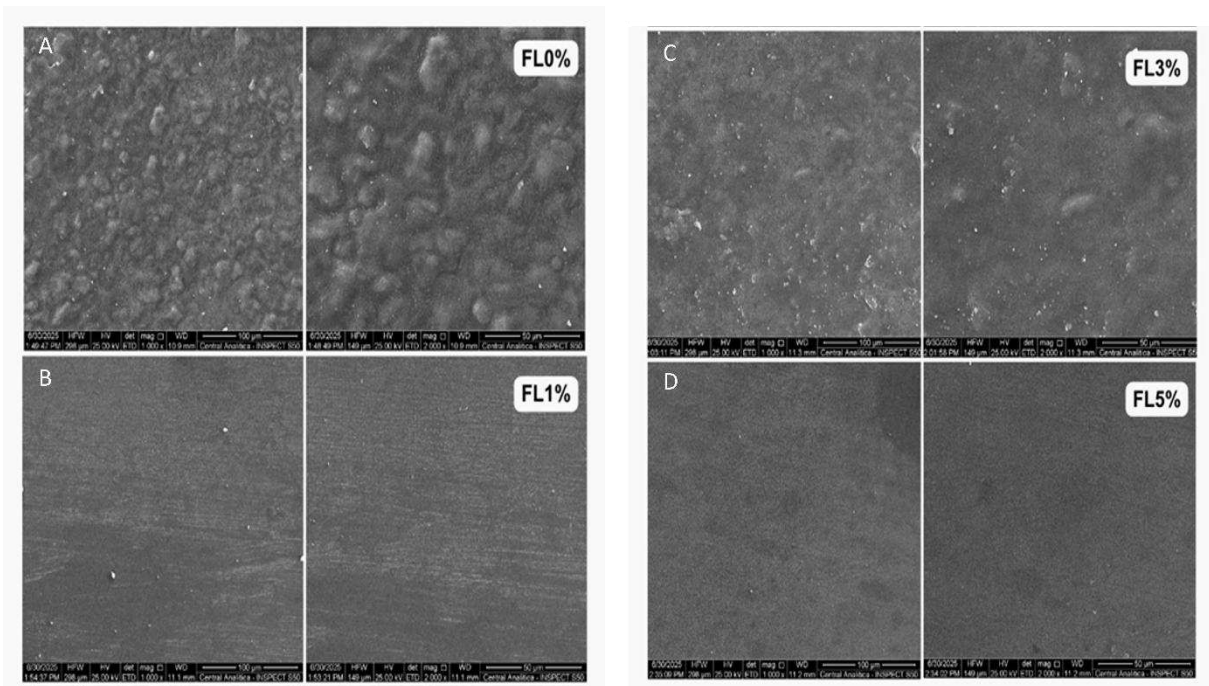
No que se refere a FL5%, o primeiro pico aparece mais à direita, em uma temperatura levemente mais alta (66 °C) e com pico mais suave. O ponto de fusão do segundo pico aparece em uma faixa de temperatura média de 176 °C. Isso mostra que a incorporação de lignina em maior concentração proporcionou uma melhoria na estabilidade térmica dentre todos os tratamentos dos filmes, onde essa melhora de funcionalidade deve-se à substituição de grupamentos hidroxilas pertencentes ao amido por grupos éter alquílicos da lignina (Imre e Vilaplana, 2020; Teramoto *et al.*, 2003). Acima de 200 °C para todos os filmes, já é caracterizado evento de degradação térmica.

5.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia superficial dos filmes foi caracterizada usando microscopia eletrônica de varredura. A figura 13 mostra as imagens obtidas dos filmes com aumentos de 1000x e 2000x, onde é possível perceber diferenças entre a morfologia dos filmes.

O filme controle (FL0%) exibiu uma superfície consideravelmente rugosa, com aglomerados distribuídos de forma aleatória, comumente associado ao colapso parcial de grânulos de amido durante o processamento dos filmes (Mittal *et al.*, 2020). O filme FL3% apresentou comportamento semelhante, porém com uma distribuição mais homogênea. Os filmes FL1% e FL5% exibiram superfícies mais contínuas e uniformes, sugerindo melhor compatibilidade amido-lignina, e menos defeitos superficiais que as demais formulações.

Figura 13. Microscopias obtidas por MEV de filmes compostos por amido de milho e lignina do pedúnculo de caju, em escala de ampliação de 1000x e 2000x.



A: filme FL0% (0% lignina), B: filme FL1% (1% lignina), C: filme FL3% (3% lignina) e D: filmes FL5% (5% lignina).

Fonte: autora (2026).

Este resultado pode ser considerado positivo, visto que muitos outros estudos trazem resultados contrários, mostrando que a incorporação de lignina causa aglomerações e conseqüentemente muitas irregularidades aos filmes, como observou Michelin *et al.* (2020) em sua pesquisa com filmes de carboximetilcelulose e lignina organosolv. Resultados semelhantes foram observados por Xiong *et al.* (2020), que constataram a presença de aglomerações de lignina em filmes adipato-co-tereftalato de butileno (PBAT).

O resultado positivo do presente estudo pode ser explicado, ao menos em parte, pela boa solubilização da lignina na solução filmogênica em pH 8,5 durante a fabricação dos filmes, favorecendo interações mais adequadas entre os polímeros. Araújo (2014) aponta que a presença de rugosidades pode estar ligada à tendência do material em formar caminhos por onde a secagem ocorre com mais facilidade, devido a intensa agitação de moléculas de ar durante o processo de secagem, que ocorreu em estufa de circulação de ar no presente estudo. Outra possibilidade para a presença de rugosidades e grânulos nas micrografias, segundo Luchese *et al.* (2015), ao desenvolver filmes de amido de pinhão e goma xantana, é que o tempo de agitação

total da solução filmogênica seja insuficiente para completa solubilização dos grânulos de amido.

5.9 Biodegradabilidade

Ensaio de biodegradabilidade são essenciais para verificar o potencial de aplicação de materiais desenvolvidos como substitutos das embalagens de origem sintética, cuja degradação ocorre de forma lenta (Da Silva Filipini; Romani; Guimarães Martins, 2020).

A biodegradabilidade dos materiais foi testada por meio de registros de fotos semanais e cálculo da perda de massa ao longo do período de teste. Após 35 dias, observou-se, conforme a figura 14, que todos os filmes apresentaram características ressecadas, enrugadas e quebradiças, indicando degradação parcial durante o tempo de realização da análise.

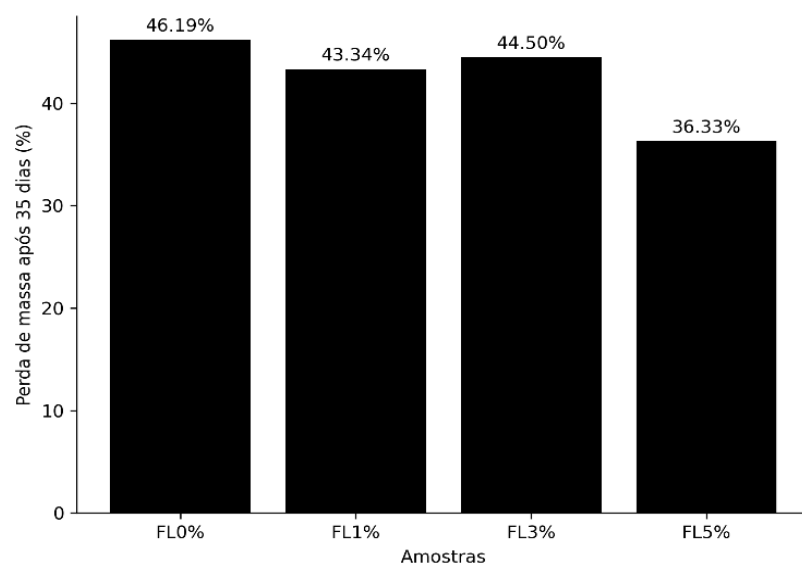
Figura 14. Análise visual do ensaio de biodegradação em solo dos filmes de amido com diferentes teores de lignina ao longo do tempo.



As linhas correspondem às formulações FL0% (0% lignina), FL1% (1% lignina), FL3% (3% lignina) e FL5% (5% lignina). As colunas representam os tempos de exposição ao solo (0, 7, 14, 21 e 35 dias).
Fonte: Autora (2026).

No presente estudo, a degradação avaliada através da perda de massa dos filmes variou de 46,19% em FL0% a 36,33% em FL5%, conforme apresentado na figura 15.

Figura 15. Perda de peso percentual dos filmes por um período de 35 dias.



Por se tratar de filmes elaborados com compostos biodegradáveis, presume-se que eles sofram maiores degradações pelos microrganismos presentes no solo caso o tempo de análise seja prolongado.

Alguns estudos corroboram com esse resultado, como o de Freitas *et al.* (2021), que apontam tendências semelhantes nos resultados de biodegradabilidade de filmes de amido termoplástico e lignina kraft. As amostras permaneceram imersas em meio biológico líquido por 10 dias e sua perda de massa total foi calculada ao fim deste período. Os autores mostraram uma redução na porcentagem de perda de massa de 41,6% para o filme controle (somente amido) para 25,4%, 17,5% e 9,2% nos filmes de 2%, 4% e 8% de lignina, respectivamente.

Gui *et al.* (2024) conduziram um teste de biodegradação em filmes de PVA puro e PVA com diferentes percentuais lignina C (10-50% em peso). Os pesquisadores identificaram a presença de enrugamento nos filmes, e aqueles filmes com 10-20% em peso de lignina se degradaram rapidamente, misturando-se ao solo e aqueles com 30-50% em peso de lignina se degradaram por completo em aproximadamente dois meses. De forma geral, todos os filmes desenvolvidos pelos pesquisadores se degradaram por completo em 3 meses.

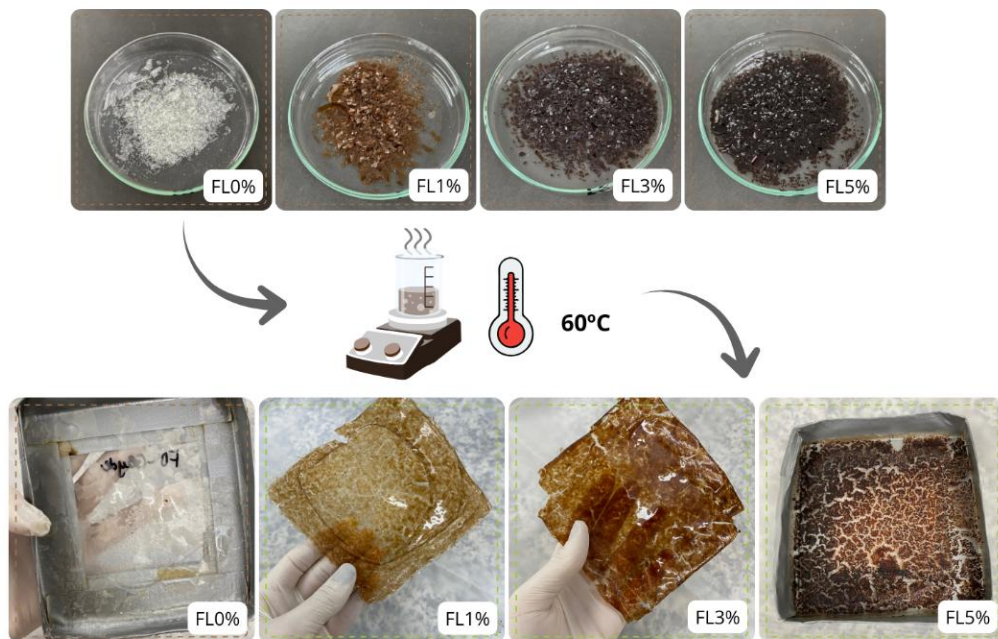
Embora a norma europeia EN 13432 seja aplicada como referência em cenário industrial, seus critérios são amplamente utilizados como referência em pesquisas, ao estabelecer que materiais devem alcançar pelo menos 90% de desintegração em até seis meses para serem considerados biodegradáveis nesse ambiente (Vincotte, 2014). No presente estudo, observou-se que os filmes apresentaram uma perda de massa expressiva já nos primeiros 35 dias de ensaio, indicando uma cinética de degradação acelerada. Esses resultados sugerem um elevado potencial de biodegradabilidade dos materiais desenvolvidos, embora a confirmação do atendimento integral aos critérios da EN 13432 dependa da realização de ensaios prolongados até o período de seis meses.

5.10 Reciclabilidade

A reciclabilidade dos filmes foi investigada por meio do processo de recasting. Os testes indicaram que apenas os filmes FL1% e FL3% apresentaram

possibilidade de reaproveitamento após processo de reciclagem (figura 16). Já o filme FL0% mostrou-se ressecado e quebradiço, desfazendo-se ainda em placa, fenômeno atribuído à elevada rigidez da matriz amilácea e FL5% não se reorganizou em um novo filme, aderindo fortemente à placa, ocasionando alta adesividade à placa, possivelmente associada ao excesso de lignina.

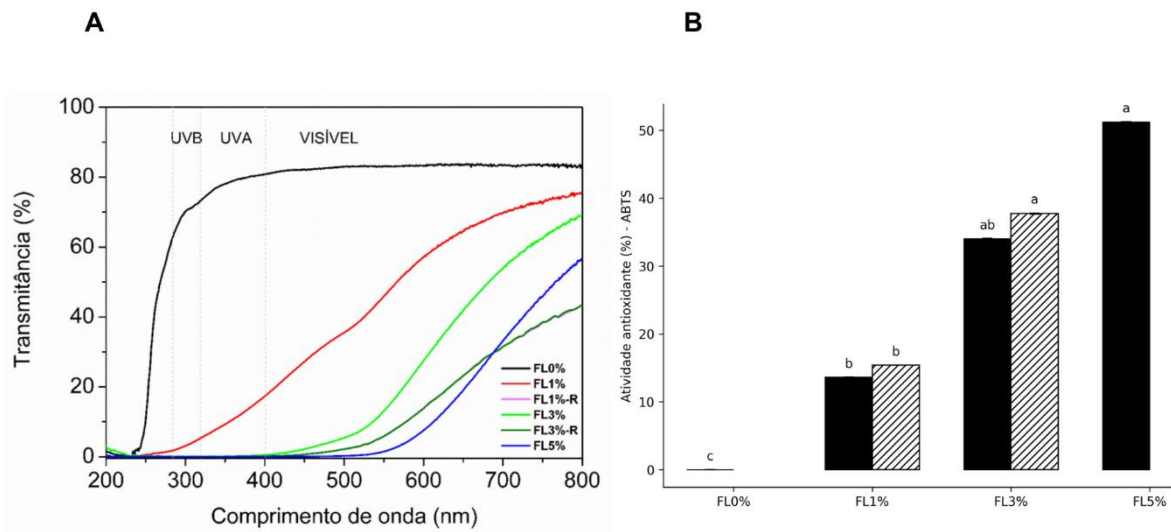
Figura 16. Reciclabilidade de filmes compostos por amido de milho e diferentes concentrações de lignina do pedúnculo de caju.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para avaliar melhor a capacidade de reciclabilidade, os filmes reprocessados passaram por nova análise de bloqueio UV e atividade antioxidante, e os resultados podem ser vistos na figura 17 e tabela 9, respectivamente.

Figura 17. Desempenho óptico e antioxidante dos filmes reciclados por recasting: (A) espectros de transmitância UV-Vis e (B) atividade antioxidante das formulações FL0%, FL1%, FL3% e FL5%.



Os resultados apontaram que os filmes reciclados apresentaram poucas alterações quando comparados aos filmes originais, com desempenho semelhante na propriedade antioxidante, bem como no bloqueio UV. Isso mostra que as estruturas químicas e interações moleculares dos polímeros não sofrem grandes modificações após o ciclo de reciclagem.

A atividade antioxidante de FL1% reciclado foi de 15,41%, em comparação a 13,65% de FL1% original, enquanto FL3% reciclado apresentou 37,73% frente a 34,06% de FL3% original. Comportamento semelhante foi observado para a atividade bloqueadora de radiação UV, com FL1% reciclado promovendo bloqueio total do espectro UV, ao passo que FL1% original apresentou transmitância de 2,46% na faixa UVB e 10,26% na faixa UVA. O filme FL3% reciclado manteve bloqueio de 100%, comportamento semelhante ao observado no filme original.

Mais estudos se fazem necessários para melhorar a viabilidade de reciclabilidade dos filmes e avaliação de eficiência dos materiais reaproveitados. Em um cenário em que filmes desenvolvidos com polímeros sintéticos levam anos para se degradar, a presente pesquisa oferece novas possibilidades de reutilização de materiais que podem degradar-se naturalmente no solo, diminuindo o impacto ambiental ao prolongar sua vida útil, reduzindo também a necessidade de confecção constante de novos filmes, desde que submetidos a processos adequados de higienização, reaproveitamento ou reciclagem. Considera-se que, após o uso em matrizes alimentares, os filmes necessitam de tratamento específico para remoção de

resíduos, de modo a viabilizar sua reutilização ou destinação ambientalmente adequada.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresenta-se uma contribuição relevante para o desenvolvimento de materiais sustentáveis no segmento de filmes biodegradáveis destinados à aplicação em embalagens alimentícias. A lignina obtida do processamento do pedúnculo do caju, um coproduto geralmente descartado após a extração do suco, foi empregada com sucesso como componente funcional no desenvolvimento de filmes à base de amido de milho. A incorporação desse biopolímero permitiu não apenas a valorização de um resíduo agroindustrial abundante, mas também a obtenção de materiais com propriedades tecnológicas aprimoradas.

A presença de lignina promoveu modificações importantes nas propriedades estruturais e funcionais dos filmes. Observou-se comportamento reológico pseudoplástico nas soluções filmogênicas, indicando boa processabilidade do sistema. Em termos mecânicos, a incorporação de lignina reduziu a resistência à tração e aumentou a elongação na ruptura, evidenciando maior flexibilidade e deformabilidade da matriz polimérica. Além disso, a presença de lignina influenciou as propriedades ópticas e de cor dos filmes, promovendo escurecimento progressivo da matriz e contribuindo para o aumento da capacidade de bloqueio da radiação ultravioleta.

Os resultados também demonstraram melhorias expressivas nas propriedades funcionais dos materiais. A incorporação de lignina promoveu aumento significativo da atividade antioxidante e bloqueio efetivo da radiação UV nas formulações com maiores teores do biopolímero, características desejáveis para aplicações em embalagens ativas voltadas à proteção de alimentos suscetíveis à foto-oxidação. Adicionalmente, verificou-se aumento da hidrofobicidade dos filmes, evidenciado pela redução da absorção de água e pelo aumento do ângulo de contato, o que contribui para maior estabilidade do material em condições de umidade.

Outro aspecto relevante refere-se ao comportamento higroscópico dos filmes, uma vez que as isotermas de sorção apresentaram comportamento do tipo III

e foram adequadamente descritas pelos modelos de GAB e Peleg, indicando a influência da lignina nas interações entre água e matriz polimérica. No que se refere ao impacto ambiental, os filmes apresentaram comportamento satisfatório de biodegradação, com perdas de massa significativas após 35 dias em solo, indicando potencial degradação completa em um período relativamente curto quando comparado a materiais plásticos convencionais, que podem persistir no ambiente por décadas.

Dentre as formulações avaliadas, os filmes contendo 1% e 3% de lignina (FL1% e FL3%) destacaram-se pelo potencial de reciclabilidade, mantendo propriedades de bloqueio UV e atividade antioxidante semelhantes às observadas nos filmes originais após o reprocessamento. Esse resultado reforça a viabilidade do reaproveitamento do material, ampliando ainda mais seu caráter sustentável.

Dessa forma, o presente estudo valida a utilização da lignina proveniente do pedúnculo de caju como uma matéria-prima renovável e promissora para o desenvolvimento de materiais de embalagem ativa multifuncionais. Os filmes desenvolvidos apresentam potencial para atuar na proteção de alimentos contra processos de degradação foto-oxidativa, contribuindo para a preservação de propriedades sensoriais, como cor, sabor e aroma, bem como para o prolongamento da vida de prateleira dos produtos alimentícios. Além disso, a valorização de resíduos agroindustriais regionais reforça a relevância ambiental e socioeconômica da proposta, alinhando-se às estratégias de economia circular e ao desenvolvimento de soluções mais sustentáveis para a indústria de alimentos.

REFERÊNCIAS

- ABDEL AZIZ, Mohamed S.; SALAMA, Hend E. Development of alginate-based edible coatings of optimized UV-barrier properties by response surface methodology for food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 212, 2022.
- ABID, Umer et al. Potential applications of polycarbohydrates, lignin, proteins, polyacids, and other renewable materials for the formulation of green elastomers. **International Journal of Biological Macromolecules**. [s.l: s.n.], 2021.
- ABOTBINA, W. *et al.* Development and characterization of cornstarch-based bioplastics packaging film using a combination of different plasticizers. **Polymers**, [s. l.], v. 13, n. 20, 2021.
- ADELERE, I. *et al.* Cashew Plant-Mediated Biosynthesis of Silver Nanoparticles and Evaluation of their Applications as Antimicrobial Additive for Consumer Care Products. **Tanzania Journal of Science**, [s. l.], v. 46, n. 3, 2020.
- AHMAD, Atika; QURASHI, Ahsanulhaq; SHEEHAN, David. Nano packaging – Progress and future perspectives for food safety, and sustainability. **Food Packaging and Shelf Life**, [s.l: s.n.], 2023.
- AHMED, M. *et al.* Oxidation of Lipids in Foods. **Sarhad Journal of Agriculture**, [s. l.], v. 32, n. 3, 2016.
- AKYEREKO, Yaw Gyau et al. Cashew Apples in Ghana: Stakeholders' Knowledge, Perception, and Utilization. **International Journal of Food Science**, [s. l.], v. 2022, 2022.
- AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. **Food and Bioproducts Processing: Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, [s. l.], v. 80, n. 2, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM Book of Standards, Philadelphia, PA. ASTM E96-00 - Standard test methods for determining gas permeability characteristics of plastic film and sheeting, 1995.
- AMIT, Tanvir A.; ROY, Ranen; RAYNIE, Douglas E. Thermal and structural characterization of two commercially available technical lignins for potential depolymerization via hydrothermal liquefaction. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, [s. l.], v. 4, 2021.
- ANUSHIKHA; GAIKWAD, K. K. Lignin as a UV blocking, antioxidant, and antimicrobial agent for food packaging applications. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], 2023.

AOAC- Association of Official Analytical Chemists. Official method of Analysis. 18th Edition, Association of Officiating Analytical Chemists, Washington, DC, 2005.

AQLIL, Meryem et al. Graphene Oxide Filled Lignin/Starch Polymer Bionanocomposite: Structural, Physical, and Mechanical Studies. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 65, n. 48, 2017.

ARAÚJO, G. K. P. **Desenvolvimento de filmes biodegradáveis de amido incorporados com extrato de própolis**. 2014. 43 f. Monografia (Graduação) - Curso Superior de Tecnologia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campo Mourão, 2014.

ASTM D882–10. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. Am. Soc. Test. Mater. Philadelphia, 2010.

ATTA, O. M. *et al.* Biobased materials for active food packaging: A review. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 125, 2022.

AVÉROUS, L.; FRINGANT, C.; MORO, L. Plasticized starch-cellulose interactions in polysaccharide composites. **Polymer**, [s.l.], v. 42, n. 15, 2001.

BAIR, Scott. High pressure rheology for quantitative elastohydrodynamics. [s.l.: s.n.], 2019.

BASRI, Mohd Salahuddin Mohd *et al.* Progress in the valorization of fruit and vegetable wastes: Active packaging, biocomposites, by-products, and innovative technologies used for bioactive compound extraction. **Polymers**. [s.l.: s.n.], 2021.

BERTELLA, Stefania; LUTERBACHER, Jeremy S. Lignin Functionalization for the Production of Novel Materials. **Trends in Chemistry**. [s.l.: s.n.], 2020.

BHARDWAJ, Aastha; ALAM, Tanweer; TALWAR, Nishtha. Recent Advances in Active Packaging of Agri-food Products: a Review. **Journal of Postharvest Technology**, v. 07, n. 1, 2019.

BHAT, Rajeev *et al.* Producing novel sago starch based food packaging films by incorporating lignin isolated from oil palm black liquor waste. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 4, 2013.

BIOPLASTICS. Bioplastics Market Worldwide 2016-2025. 2018. Disponível em: <https://www.marketintellix.com/report/global-bioplastics-market-208611>. Acesso em: 17 de jun. de 2025.

BOHLMANN, Gregory M. Biodegradable packaging life-cycle assessment. **Environmental Progress**, v. 23, n. 4, 2004.

BRASIL. (2018). Combate ao desperdício de alimentos é desafio do Brasil e do mundo nos próximos anos. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/noticias/cidadania-einclusao/2018/08/combate-ao->

desperdício-de-alimentos-e-desafio-do-brasil-e-do-mundo-nos-próximos-anos. Acesso em: 26 de abr. de 2024.

CAMPAGNER, Marina Rodrigues *et al.* Filmes poliméricos baseados em amido e lignossulfonatos: preparação, propriedades e avaliação da biodegradação. **Polímeros**, v. 24, n. 6, 2014.

CAZÓN, Patricia *et al.* Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review. **Food Hydrocolloids**, v. 68, 2017.

CHANNA, Iftikhar Ahmed *et al.* UV Blocking and Oxygen Barrier Coatings Based on Polyvinyl Alcohol and Zinc Oxide Nanoparticles for Packaging Applications. **Coatings**, v. 12, n. 7, 2022.

CHEN, Guiyun *et al.* Zein films with porous polylactic acid coatings via cold plasma pre-treatment. **Industrial Crops and Products**, v. 150, 2020.

CHEN, Yian *et al.* Antimicrobial, UV blocking, water-resistant and degradable coatings and packaging films based on wheat gluten and lignocellulose for food preservation. **Composites Part B: Engineering**, v. 238, 2022.

CHENG, Hao *et al.* Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. **Food Chemistry**. [s.l.]: Elsevier Ltd. 2022.

CHERIAN, Shymi; LEKSHMI, P R Geetha. Ready to serve Aloe vera Gel blended functional cashew apple beverage for improved nutritional and sensory qualities. **Journal of Krishi Vigyan**, v. 9, n. 2, 2021.

CHHANDAMA, Michael Van Lal *et al.* Valorisation of food waste to sustainable energy and other value-added products: A review. **Bioresource Technology Reports**. [S.l.: s.n.], 2022.

ENYINNAYA CHINMA, Chiemela; CHUKWUMA ARIAHU, Charles; ALAKALI, Joseph. Moisture sorption and thermodynamic properties of cassava starch and soy protein concentrate based edible films. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 48, n. 11, 2013.

CHINMA, C. E.; ARIAHU, C. C.; ALAKALI, J. S. Effect of temperature and relative humidity on the water vapour permeability and mechanical properties of cassava starch and soy protein concentrate based edible films. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 4, 2015.

CHOI, Inyoung *et al.* Effect of oxidized phenolic compounds on cross-linking and properties of biodegradable active packaging film composed of turmeric and gelatin. **LWT**, v. 93, 2018.

CORRADINI, Elisângela. *et al.* Estudo Comparativo de amidos termoplásticos derivados do milho com diferentes teores de amilose. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 15, n. 4, p. 268-273, 2005.

COVA, Aura *et al.* The effect of hydrophobic modifications on the adsorption isotherms of cassava starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 81, n. 3, 2010.

CRAPISTE, G. H.; ROTSTEIN, E. Prediction of Sorptional Equilibrium Data for Starch-Containing Foodstuffs. **Journal of Food Science**, v. 47, n. 5, 1982.

CROUVISIER-URION, Kevin *et al.* Biobased Composite Films from Chitosan and Lignin: Antioxidant Activity Related to Structure and Moisture. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 4, n. 12, 2016.

CRUZ, Rui M.S. *et al.* Bioplastics for Food Packaging: Environmental Impact, Trends and Regulatory Aspects. **Foods**. [S.l.: s.n.], 2022.

CULEBRAS, Mario *et al.* Bio-derived Carbon Nanofibres from Lignin as High-Performance Li-Ion Anode Materials. **ChemSusChem**, v. 12, n. 19, 2019.

DA COSTA CORREIA, Jéssyca Aline *et al.* Different design configurations of simultaneous saccharification and fermentation to enhance ethanol production from cashew apple bagasse pretreated with alkaline hydrogen peroxide applying the biorefinery concept. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 7, 2022.

DA SILVA FILIPINI, Gabriel; ROMANI, Viviane Patrícia; GUIMARÃES MARTINS, Vilásia. Biodegradable and active-intelligent films based on methylcellulose and jambolão (*Syzygium cumini*) skins extract for food packaging. **Food Hydrocolloids**, v. 109, 2020.

DANTAS, Emanuelle Andrade *et al.* Caracterização e avaliação das propriedades antioxidantes de filmes biodegradáveis incorporados com polpas de frutas tropicais. **Ciência Rural**, v. 45, n. 1, p. 142–148, 2015.

DAS, Ipsita; ARORA, Amit. Post-harvest processing technology for cashew apple – A review. **Journal of Food Engineering**. [S.l.: s.n.], 2017.

DE ALBUQUERQUE, Tiago Lima *et al.* Xylitol production by different yeasts: Kinetic study and biosynthesis from cashew apple bagasse hydrolysate. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 101, n. 7, 2023.

DE FRANÇA SERPA, Juliana *et al.* Extraction and characterization of lignins from cashew apple bagasse obtained by different treatments. **Biomass and Bioenergy**, v. 141, 2020.

DE OLIVEIRA BEGALI, Danielly *et al.* Effect of the incorporation of lignin microparticles on the properties of the thermoplastic starch/pectin blend obtained by extrusion. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 180, 2021.

DE S. M. DE FREITAS, Amanda *et al.* Improvements in thermal and mechanical properties of composites based on thermoplastic starch and Kraft Lignin. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 184, p. 863–873, 1 ago. 2021.

DEENANATH, Evanie Devi; RUMBOLD, Karl; IYUKE, Sunny. The Production of Bioethanol from Cashew Apple Juice by Batch Fermentation Using *Saccharomyces cerevisiae* Y2084 and Vin13. **ISRN Renewable Energy**, v. 2013, 2013.

DIAZ-BACA, Jonathan A.; FATEHI, Pedram. Production and characterization of starch-lignin based materials: A review. **Biotechnology Advances**. [S.l.: s.n.], 2024.

DO NASCIMENTO SILVA, Nara Rúbia Rodrigues; CAVALCANTE, Rodrigo Barbosa Monteiro; DA SILVA, Flávio Alves. Nutritional properties of Buriti (*Mauritia flexuosa*) and health benefits. **Journal of Food Composition and Analysis**. [S.l.: s.n.], 2023.

DOU, Yun *et al.* Enhancing PVA mulching films: Leveraging modified lignin as a bio-based crosslinking agent for improved mechanical strength, UV barrier, and biodegradability. **Industrial Crops and Products**, v. 222, 15 dez. 2024.

ESPINOZA ACOSTA, José Luis *et al.* Mechanical, thermal, and antioxidant properties of composite films prepared from durum wheat starch and lignin. **Starch/Staerke**, v. 67, n. 5–6, 2015.

EZATI, Parya *et al.* Biopolymer-based UV protection functional films for food packaging. **Food Hydrocolloids**. [S.l.: s.n.], 2023.

FATHIMA, P. E. *et al.* Polylactic acid/chitosan films for packaging of Indian white prawn (*Fenneropenaeus indicus*). **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 117, 2018.

FERNANDES DE CARVALHO REIS, Matheus *et al.* Strengthening poly (lactic acid): The role of fractionated lignin in the development of sustainable films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 320, 1 ago. 2025.

FIGUEIREDO, Patrícia *et al.* Properties and chemical modifications of lignin: Towards lignin-based nanomaterials for biomedical applications. **Progress in Materials Science**. [S.l.: s.n.], 2018.

FONSECA, Laura Martins. **Produção e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de batata (*Solanum tuberosum* L.) para aplicação em embalagens de alimentos**. 127 p. 2015. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2015.

DE S. M. DE FREITAS, Amanda *et al.* Improvements in thermal and mechanical properties of composites based on thermoplastic starch and Kraft Lignin. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 184, p. 863–873, 1 ago. 2021.

GIANICO, Andrea *et al.* A novel cascade biorefinery approach to transform food waste into valuable chemicals and biogas through thermal pretreatment integration. **Bioresource Technology**, v. 338, 2021.

GORDOBIL, Oihana *et al.* Potential of lignin multifunctionality for a sustainable skincare: Impact of emulsification process parameters and oil-phase on the

characteristics of O/W Pickering emulsions. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 233, 1 abr. 2023.

GORE, Anil H.; PRAJAPAT, Amrutlal L. Biopolymer Nanocomposites for Sustainable UV Protective Packaging. **Frontiers in Materials**. [S.l.: s.n.], 2022.

GOUDARZI, Vahid; SHAHABI-GHAHFARROKHI, Iman; BABAEI-GHAZVINI, Amin. Preparation of ecofriendly UV-protective food packaging material by starch/TiO₂ bio-nanocomposite: Characterization. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 95, 2017.

GUI, Tao *et al.* Tough and biodegradable C-lignin cross-linked polyvinyl alcohol supramolecular composite films with closed-looping recyclability. **Chemical Engineering Journal**, v. 491, 1 jul. 2024.

GUO, Xu Jing *et al.* The binding properties of copper and lead onto compost-derived DOM using Fourier-transform infrared, UV–vis and fluorescence spectra combined with two-dimensional correlation analysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, p. 457–466, 5 mar. 2019.

HAMBARDZUMYAN, A. *et al.* Organosolv lignin as natural grafting additive to improve the water resistance of films using cellulose nanocrystals. **Chemical Engineering Journal**, v. 264, 2015.

HANANI, Z. A. Nur; YEE, F. Cheng; NOR-KHAIZURA, M. A.R. Effect of pomegranate (*Punica granatum* L.) peel powder on the antioxidant and antimicrobial properties of fish gelatin films as active packaging. **Food Hydrocolloids**, v. 89, 2019.

HARI, Karina Dyasti *et al.* Improvement of the UV barrier and antibacterial properties of crosslinked pectin/zinc oxide bionanocomposite films. **Polymers**, v. 13, n. 15, 1 ago. 2021.

HE, Xiaoyan *et al.* Thermal, antioxidant and swelling behaviour of transparent polyvinyl (alcohol) films in presence of hydrophobic citric acid-modified lignin nanoparticles. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 127, 2019.

HU, D. *et al.* A novel edible packaging film based on chitosan incorporated with persimmon peel extract for the postharvest preservation of banana. **Food Quality and Safety**, v. 6, 2022.

HUANG, Nicolas. Rheological Characterization of Pharmaceutical and Cosmetic Formulations for Cutaneous Applications. **Current Pharmaceutical Design**, v. 25, n. 21, 2019.

HUANG, Xiang *et al.* Formation mechanism of egg white protein/ κ -Carrageenan composite film and its application to oil packaging. **Food Hydrocolloids**, v. 105, 2020.

IMRE, Balázs; VILAPLANA, Francisco. Organocatalytic esterification of corn starches towards enhanced thermal stability and moisture resistance. **Green Chemistry**, v. 22, n. 15, 2020.

JAFARZADEH, Shima; JAFARI, Seid Mahdi. *Impact of metal nanoparticles on the mechanical, barrier, optical and thermal properties of biodegradable food packaging materials*. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. [S.l.: s.n.], 2020.

JEEVAHAN, Jeya; CHANDRASEKARAN, M. Nanoedible films for food packaging: a review. **Journal of Materials Science**. [S.l.: s.n.], 2019.

JIANG, Bo *et al.* A strategy to improve enzymatic saccharification of wheat straw by adding water-soluble lignin prepared from alkali pretreatment spent liquor. **Process Biochemistry**, v. 71, p. 147–151, 1 ago. 2018.

JIMÉNEZ, Sebastián Caparrós. **Fraccionamiento integral de vegetales no alimentarios para la obtención de pasta celulósica y subproductos**. Tese (Doutorado). Universidad de Huelva, Huelva, 2009.

JORGE, Neuza. **Embalagens para alimentos**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2013.

KAMBLE, Apeksha B. *et al.* Effect of Blending Cashew Apple (*Anacardium occidentale* L.) and Aonla (*Emblica officinalis* Gaertn.) Juice on Fermentation of Wine. **Journal of Advances in Biology & Biotechnology**, v. 27, n. 9, 2024.

KARIMI SANI, Iraj *et al.* Value-added utilization of fruit and vegetable processing by-products for the manufacture of biodegradable food packaging films. **Food Chemistry**. [S.l.: s.n.], 2023.

KHAN, Ajahar; EZATI, Parya; RHIM, Jong Whan. Chitosan/gelatin-based multifunctional film integrated with green tea carbon dots to extend the shelf life of pork. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 37, 1 jun. 2023.

KHAN, Bahram *et al.* Thermoplastic Starch: A Possible Biodegradable Food Packaging Material—A Review. **Journal of Food Process Engineering**, 2017.

KIM, Jong Chan *et al.* Fabrication of transparent cellulose nanofibril composite film with smooth surface and ultraviolet blocking ability using hydrophilic lignin. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 245, 1 ago. 2023.

KOOSHA, Mojtaba; HAMED, Sepideh. Intelligent Chitosan/PVA nanocomposite films containing black carrot anthocyanin and bentonite nanoclays with improved mechanical, thermal and antibacterial properties. **Progress in Organic Coatings**, v. 127, p. 338–347, 1 fev. 2019.

KOZLOWICZ, Katarzyna *et al.* Lyophilized Protein Structures as an Alternative Biodegradable Material for Food Packaging. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 24, 1 dez. 2019.

KUSHWAHA, Radha; KAUR, Seeratpreet; KAUR, Devinder. *Potential of Jackfruit (Artocarpus Heterophyllus Lam.) Seed Starch as an Alternative to the Commercial Starch Source—a Review*. **Food Reviews International**. [S.l: s.n.], 2023.

LANDIM, Ana Paula Miguel *et al.* Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros**, v. 26, 2016.

LAURICHESSE, Stéphanie; AVÉROUS, Luc. Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers. **Progress in Polymer Science**. [S.l: s.n.], 2014.

LISÝ, Anton *et al.* About Hydrophobicity of Lignin: A Review of Selected Chemical Methods for Lignin Valorisation in Biopolymer Production. **Energies**. [S.l: s.n.], 2022

LIU, Chaozheng *et al.* Production of lignin-containing cellulose nanofibers using deep eutectic solvents for UV-absorbing polymer reinforcement. **Carbohydrate Polymers**, v. 246, 2020.

LIU, Jingrong *et al.* Films based on κ -carrageenan incorporated with curcumin for freshness monitoring. **Food Hydrocolloids**, v. 83, 2018.

LIU, Jun *et al.* Physical, mechanical and antioxidant properties of chitosan films grafted with different hydroxybenzoic acids. **Food Hydrocolloids**, v. 71, 2017.

LOMBARDI, Andrea *et al.* Natural Active Ingredients for Poly (Lactic Acid) -Based Materials: State of the Art and Perspectives. **Antioxidants**. [S.l: s.n.], 2022.

LOURENCON, Tainise V. *et al.* Lignin-First Integrated Hydrothermal Treatment (HTT) and Synthesis of Low-Cost Biorefinery Particles. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 8, n. 2, 2020.

LOWOR, S. T.; AGYEUTE-BADU, C. K. Mineral and proximate composition of cashew apple (*Anarcadium occidentale* L.) juice from northern savannah, forest and coastal savannah regions in Ghana. **American Journal of Food Technology**, v. 4, n. 4, 2009.

LU, Baiyi; ZHAO, Yajing. Photooxidation of phytochemicals in food and control: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**. [S.l: s.n.], 2017.

LUCHESE, Cláudia Leites *et al.* Development and characterization of cassava starch films incorporated with blueberry pomace. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 106, 2018.

LUCHESE, Cláudia Leites *et al.* Synthesis and characterization of biofilms using native and modified pinhão starch. **Food Hydrocolloids**, v. 45, 2015.

MACHADO, Bruna Aparecida Souza *et al.* Desenvolvimento e avaliação da eficácia de filmes biodegradáveis de amido de mandioca com nanocelulose como reforço e com extrato de erva-mate como aditivo antioxidante. **Ciência Rural**, v. 42, n. 11, p. 2085 - 2091, 2012.

- MALI, S. *et al.* Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect. **Carbohydrate Polymers**, v. 60, n. 3, 2005.
- MARQUES JÚNIOR, José Edvan; ROCHA, Maria Valdez Ponte. Development of a purification process via crystallization of xylitol produced for bioprocess using a hemicellulosic hydrolysate from the cashew apple bagasse as feedstock. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 44, n. 4, 2021.
- MARTÍN-SAMPEDRO, Raquel *et al.* Effect of the combined addition of ultrasonicated kraft lignin and montmorillonite on hydroxypropyl methylcellulose bionanocomposites. **Nanoscale Advances**, v. 5, n. 16, 2023.
- MIAO, Zhikun *et al.* Development of antioxidant active packaging films with slow release properties incorporated with tea polyphenols-loaded porous starch microcapsules. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 222, 2022.
- MIKAME, Keigo *et al.* Natural Organic Ultraviolet Absorbers from Lignin. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 9, n. 49, 2021.
- MITTAL, Aanchal; GARG, Sangeeta; BAJPAI, Shailendra. Thermal decomposition kinetics and properties of grafted barley husk reinforced PVA/starch composite films for packaging applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 240, 2020.
- DE MORAES, Jaqueline Oliveira *et al.* Scale-up of the production of cassava starch based films using tape-casting. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 4, 2013.
- MOUSAVI, Seyedeh Najmeh *et al.* Ultrafine friction grinding of lignin for development of starch biocomposite films. **Polymers**, v. 13, n. 12, 2021.
- MÜLLER, Kerstin *et al.* Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields. **Nanomaterials**. [S.l.]: MDPI AG., 1 abr. 2017.
- NAGARAJA, K. V. Biochemical characteristics of released varieties. Directorate of Cashew Research, **Puttur**, p. 49, 2010.
- NI, Shuzhen *et al.* Starch-Based Composite Films with Enhanced Hydrophobicity, Thermal Stability, and UV-Shielding Efficacy Induced by Lignin Nanoparticles. **Biomacromolecules**, v. 23, n. 3, 2022.
- NIKVARZ, Navid; KHAYATI, Gholam Reza; SHARAFI, Shahriar. Preparation of UV absorbent films using polylactic acid and grape syrup for food packaging application. **Materials Letters**, v. 276, 2020.
- NÚÑEZ-FLORES, R. *et al.* Physical and functional characterization of active fish gelatin films incorporated with lignin. **Food Hydrocolloids**, v. 30, n. 1, 2013.
- OLIVEIRA, Ana Vitória *et al.* Nanocomposite Films from Mango Kernel or Corn Starch with Starch Nanocrystals. **Starch/Staerke**, v. 70, n. 11–12, 2018.

OLONISAKIN, Kehinde *et al.* The Development of Biodegradable PBAT-Lignin-Tannic Acid Composite Film: Properties, Biodegradability, and Potential Barrier Application in Food Packaging. **Food and Bioprocess Technology**, v. 16, n. 7, 2023.

ONYEAKA, Helen *et al.* Current Research and Applications of Starch-Based Biodegradable Films for Food Packaging. **Polymers**. [S.l: s.n.], 2022.

OSEI, Emmanuel Duah *et al.* Cashew Apple Pomace: Chemical Composition and Applications in Functional Food Product Development—A Review. **Food Science and Nutrition**. [S.l: s.n.], 2025.

PARIT, Mahesh *et al.* Transparent and Homogenous Cellulose Nanocrystal/Lignin UV-Protection Films. **ACS Omega**, v. 3, n. 9, 2018.

PFISTER, Barbara; ZEEMAN, Samuel C. Formation of starch in plant cells. **Cellular and Molecular Life Sciences**. [S.l: s.n.], 2016.

QIN, Yan *et al.* Comparison of the physical and functional properties of starch/polyvinyl alcohol films containing anthocyanins and/or betacyanins. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 163, 2020.

RAJABINEJAD, Hossein *et al.* Fabrication and properties of keratases/polyvinyl alcohol blend films. **Polymer Bulletin**, v. 77, n. 6, 2020.

RANGAN, Anupama *et al.* Novel method for the preparation of lignin-rich nanoparticles from lignocellulosic fibers. **Industrial Crops and Products**, v. 103, 2017.

FERNANDES DE CARVALHO REIS, Matheus *et al.* Strengthening poly (lactic acid): The role of fractionated lignin in the development of sustainable films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 320, 1 ago. 2025.

REIS, Carla Luzia Borges *et al.* Pretreatment of cashew apple bagasse using protic ionic liquids: Enhanced enzymatic hydrolysis. **Bioresource Technology**, v. 224, 2017.

RESHMY, R. *et al.* Sugarcane bagasse derived nanocellulose reinforced with frankincense (*Boswellia serrata*): Physicochemical properties, biodegradability and antimicrobial effect for controlling microbial growth for food packaging application. **Environmental Technology and Innovation**, v. 21, 2021.

RINCÓN, Esther *et al.* Effect of bay leaves essential oil concentration on the properties of biodegradable carboxymethyl cellulose-based edible films. **Materials**, v. 12, n. 15, 2019.

RIOUX, Bernard *et al.* Structure-properties relationship in cross-linked high amylose starch cast films. **Carbohydrate Polymers**, v. 50, n. 4, 2002.

ROCHA, Maria Valderez Ponte *et al.* Evaluation of dilute acid pretreatment on cashew apple bagasse for ethanol and xylitol production. **Chemical Engineering Journal**, v. 243, 2014.

RONG, Sing Yao; MUBARAK, N. M.; TANJUNG, Faisal Amri. Structure-property relationship of cellulose nanowhiskers reinforced chitosan biocomposite films. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 6, 2017.

RUKMANIKRISHNAN, Balasubramanian *et al.* Binary and ternary sustainable composites of gellan gum, hydroxyethyl cellulose and lignin for food packaging applications: Biocompatibility, antioxidant activity, UV and water barrier properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 153, 2020.

SÁ, Nádia M.S.M. *et al.* From cashew byproducts to biodegradable active materials: Bacterial cellulose-lignin-cellulose nanocrystal nanocomposite films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 161, 2020.

SAKAKIBARA, A. C. L. V; HON, V. D. N. S; HON, S. N. (org.) Chemistry of lignin. **Wood and cellulosic chemistry**. 1991.

SANTOS, Ricardo P. *et al.* Production and characterization of the cashew (*Anacardium occidentale* L.) peduncle bagasse ashes. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, 2007.

SARKHEIL, Hamid; RAHBARI, Shahrokh. Fractal geometry analysis of chemical structure of natural starch modification as a green biopolymeric product. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 12, n. 8, 2019.

SARWONO, Ariyanti *et al.* Swelling mechanism of urea cross-linked starch–lignin films in water. **Environmental Technology** (United Kingdom), v. 39, n. 12, 2018.

SCHIANO, A. N. *et al.* Does vitamin fortification affect light oxidation in fluid skim milk? **Journal of Dairy Science**, v. 102, n. 6, 2019.

SETHUPATHY, Sivasamy *et al.* Lignin valorization: Status, challenges and opportunities. **Bioresource Technology**. [S.l.: s.n.], 2022

SHANKAR, S.; RHIM, J.W.; WON, K. Preparation of poly (lactide)/lignin/silver SHANKAR, Shiv *et al.* Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films. **Food Hydrocolloids**, v. 45, 2015.

SHANKAR, S; REDDY, J. P.; RHIM, J. Effect of lignin on water vapor barrier, mechanical, and structural properties of agar/lignin composite films. **International journal of biological macromolecules**, v. 81, p. 267-273, 2015.

SHARMA, Poonam *et al.* Valorization of cashew nut processing residues for industrial applications. **Industrial Crops and Products**, v. 152, 2020.

SHEN, Maocai *et al.* (Micro)plastic crisis: Un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. **Journal of Cleaner Production**.

[S.l.: s.n.], 2020.

SHI, Rui *et al.* The effect of citric acid on the structural properties and cytotoxicity of the polyvinyl alcohol/starch films when molding at high temperature. **Carbohydrate Polymers**, v. 74, n. 4, 2008.

SIEMIŃSKA-KUCZER, Anna; SZYMAŃSKA-CHARGOT, Monika; ZDUNEK, Artur. Recent advances in interactions between polyphenols and plant cell wall polysaccharides as studied using an adsorption technique. **Food Chemistry**. [S.l.: s.n.], 2022.

SILVA, J. S. *et al.* Cashew apple bagasse as new feedstock for the hydrogen production using dark fermentation process. **Journal of Biotechnology**, v. 286, 2018.

SILVA, Karoline Ferreira *et al.* Whey protein isolate and kraft lignin multifunctional films for potential food packaging application: UV block and antioxidant potential. **Food Bioscience**, v. 53, 2023.

SINGH, Rashmi *et al.* Development and characterization of elephant foot yam starch based pH-sensitive intelligent biodegradable packaging. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 3, 2022.

SOLTANI FIROUZ, Mahmoud; MOHI-ALDEN, Khaled; OMID, Mahmoud. A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. **Food Research International**. [S.l.: s.n.], 2021

SUN, Mengya *et al.* Enhanced strength, antioxidant and barrier properties of chitosan-based film by bentonite and lignosulfonate. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 42, 2024.

TAMIELLO-ROSA, Camila Silva *et al.* Pectins from cashew apple fruit (*Anacardium occidentale*): Extraction and chemical characterization. **Carbohydrate Research**, v. 483, 2019.

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

TEDESCO, Marcela Perozzi *et al.* Production of oral films based on pre-gelatinized starch, CMC and HPMC for delivery of bioactive compounds extract from acerola industrial waste. **Industrial Crops and Products**, v. 170, 2021.

TERAMOTO, Naozumi *et al.* Synthesis, thermal properties, and biodegradability of propyl-etherified starch. [S.l.: s.n.], [S.d.]. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/europolj>.

THAKUR, Sourbh *et al.* Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**. [S.l.: s.n.], 2018.

TIAN, Wenjie et al. Microplastic materials in the environment: Problem and strategical solutions. **Progress in Materials Science**. [S.l.: s.n.], 2023.

TIEKSTRA, Sanne et al. Holistic approach to a successful market implementation of active and intelligent food packaging. *Foods*, v. 10, n. 2, 2021.

TONELI, Juliana Tófano de Campos Leite; MURR, Fernanda Elisabeth Xidieh; PARK, Kil Jin. Study of the rheology of polysaccharides used in the food industry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 7, n. 2, 2005.

TRAN, Thi Nga et al. Starch-based bio-elastomers functionalized with red beetroot natural antioxidant. **Food Chemistry**, v. 216, 2017.

TRIDGE. La production mondiale de noix de cajou. Disponível em: <https://www.tridge.com/insights/forecasted-cashew-nuts-production-for-2022-2023>.

TRIPATHI, Shefali et al. Ultraviolet Blocking Films for Food Packaging Applications. **Food and Bioprocess Technology**, 2023.

VILELA, Carla et al. A concise guide to active agents for active food packaging. **Trends in Food Science and Technology**. [S.l.: s.n.], 2018.

VINCOTTE. Requirements of the EN 13432 Standard. v. 32, n. 0, p. 13432, 2014.

WANG, Wenli et al. The influence of solvent on the pyrolysis of organosolv lignins extracted from willow. **Energy Conversion and Management: X**, v. 13, 2022.

WANG, Yibo et al. Antibacterial poly(butylene succinate-co-terephthalate)/titanium dioxide/copper oxide nanocomposites films for food packaging applications. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 34, 2022.

WELIGAMA THUPPAHIGE, Vindya Thathsarane; KARIM, Md Azharul. A comprehensive review on the properties and functionalities of biodegradable and semibiodegradable food packaging materials. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. [S.l.: s.n.], 2022.

WINOTAPUN, Charinee et al. Self-assembly of colloidal lignin nanosphere particles blended with chitosan composite coated bagasse paper: An eco-friendly food packaging with antimicrobial properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 655, 2022.

WU, Qin et al. A separable paper adhesive based on the starch—lignin composite. **Carbohydrate Polymers**, v. 229, 2020.

XIONG, Shao Jun et al. Economically Competitive Biodegradable PBAT/Lignin Composites: Effect of Lignin Methylation and Compatibilizer. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 8, n. 13, 2020.

YAN, Shizhang et al. Comparison of the physical stabilities and oxidation of lipids and proteins in natural and polyphenol-modified soybean protein isolate-stabilized emulsions. **Food Research International**, v. 162, 2022.

YANG, Qianwen et al. Effect of emulsifiers on the properties of corn starch films incorporated with *Zanthoxylum bungeanum* essential oil. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 256, 2024.

YANG, Manli et al. High performance of alginate/polyvinyl alcohol composite film based on natural original melanin nanoparticles used as food thermal insulating and UV-vis block. **Carbohydrate Polymers**, v. 233, 2020.

YANG, W. et al. Antioxidant and antibacterial lignin nanoparticles in polyvinyl alcohol/chitosan films for active packaging. **Industrial Crops and Products**, v. 94, 2016.

YANG, W. et al. Effect of processing conditions and lignin content on thermal, mechanical and degradative behavior of lignin nanoparticles/polylactic (acid) bionanocomposites prepared by melt extrusion and solvent casting. **European Polymer Journal**, v. 71, 2015.

YANG, Qianwen et al. Effect of emulsifiers on the properties of corn starch films incorporated with *Zanthoxylum bungeanum* essential oil. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 256, 2024.

YANG, Weijun et al. Poly(lactic acid)/lignin films with enhanced toughness and anti-oxidation performance for active food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 144, 2020.

YANG, Weijun; KENNY, Jose M.; PUGLIA, Debora. Structure and properties of biodegradable wheat gluten bionanocomposites containing lignin nanoparticles. **Industrial Crops and Products**, v. 74, 2015.

YOUSEFI, Hanie et al. Intelligent Food Packaging: A Review of Smart Sensing Technologies for Monitoring Food Quality. **ACS Sensors**. [S.l.: s.n.], 2019

YU, L.; CHRISTIE, G. Measurement of starch thermal transitions using differential scanning calorimetry. **Carbohydrate Polymers**, v. 46, n. 2, 2001.

YU, Tao et al. Development of corn straw lignin-based cling films for enhanced preservation of strawberries. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 49, 1 jun. 2025.

YUAN, Yue et al. Fabrication and characterization of natural polyphenol and ZnO nanoparticles loaded protein-based biopolymer multifunction electrospun nanofiber films, and application in fruit preservation. **Food Chemistry**, v. 418, 2023.

ZADEH, Elham Mohammad; O'KEEFE, Sean F.; KIM, Young Teck. Utilization of Lignin in Biopolymeric Packaging Films. **ACS Omega**, v. 3, n. 7, 2018.

ZAMUDIO-FLORES, Paul Baruk et al. Influence of the oxidation and acetylation of

banana starch on the mechanical and water barrier properties of modified starch and modified starch/chitosan blend films. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 115, n. 2, p. 991–998, 15 jan. 2010.

ZENG, Ya Fan et al. Preparation and characterization of lotus root starch based bioactive edible film containing quercetin-encapsulated nanoparticle and its effect on grape preservation. **Carbohydrate Polymers**, v. 323, 2024.

ZHANG, Hong et al. Migration testing of metallized polypropylene films treated with ionizing radiation. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 31, 2022.

ZHANG, Wenshuo et al. Dynamic borate ester bond reinforced hydroxyethyl cellulose/corn starch crosslinked film for simple recycling and regeneration. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 279, 1 nov. 2024.

ZHANG, Wei et al. Sustainable chitosan films containing a betaine-based deep eutectic solvent and lignin: Physicochemical, antioxidant, and antimicrobial properties. **Food Hydrocolloids**, v. 129, 2022.

ZHANG, Yi; NAEBE, Maryam. Lignin: A Review on Structure, Properties, and Applications as a Light-Colored UV Absorber. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**. [S.l.: s.n.], 2021.

ZHANG, Zisen et al. Lysozyme-based composite membranes and their potential application for active packaging. **Food Bioscience**, v. 43, 2021.

ZHONG, Yuyue et al. High-amylose starch: Structure, functionality and applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. [S.l.: s.n.], 2023.

ZOLFAGHARI, Shiva et al. Starch biocomposites preparation by incorporating organosolv lignins from potato crop residues. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 259, 2024.