

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PRODUTOS E
PROCESSOS**

Nayara Gabriela da Silva

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIODEGRADÁVEIS À
BASE DE AMIDO INCORPORADOS COM CURCUMINA E QUITOSANA PARA
EMBALAGENS ATIVAS E INTELIGENTES**

Belo Horizonte (MG)

2026

Nayara Gabriela da Silva

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIODEGRADÁVEIS À
BASE DE AMIDO INCORPORADOS COM CURCUMINA E QUITOSANA PARA
EMBALAGENS ATIVAS E INTELIGENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito para a obtenção do título de Mestra em Tecnologia de Produtos e Processos.

Orientadora: Prof.^a Dra. Adriana Akemi Okuma

Coorientadora: Prof.^a Dra. Flávia A. G. Gonçalves Rezende

Coorientador: Prof.^o Dr. Leonel da Silva Teixeira

Belo Horizonte (MG)

2026

Silva, Nayara Gabriela da.
S586d Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis à base de amido incorporados com curcumina e quitosana para embalagens ativas e inteligentes / Nayara Gabriela da Silva. – 2026.
111 f. : il.
Orientadora: Adriana Akemi Okuma.
Coorientadora: Flávia Augusta Guilherme Gonçalves Rezende.
Coorientador: Leonel da Silva Teixeira.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, Belo Horizonte, 2026.
Bibliografia.
1. Filmes biodegradáveis. 2. Alimentos - Embalagens. 3. Embalagem ativa. 4. Curcumina. 5. Quitosana. I. Okuma, Adriana Akemi. II. Rezende, Flávia Augusta Guilherme Gonçalves. III. Teixeira, Leonel da Silva. IV. Título.
CDD: 664.09

NAYARA GABRIELA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIODEGRADÁVEIS À
BASE DE AMIDO INCORPORADOS COM CURCUMINA E QUITOSANA PARA
EMBALAGENS ATIVAS E INTELIGENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Belo Horizonte, 06 de março de 2026.

Aprovada pela Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANA AKEMI OKUMA**
Data: 20/03/2026 16:34:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Adriana Akemi Okuma (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **LEONEL DA SILVA TEIXEIRA**
Data: 18/03/2026 21:32:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonel da Silva Teixeira (coorientador)

Documento assinado digitalmente
 **FLAVIA AUGUSTA GUILHERME GONCALVES REZ**
Data: 18/03/2026 17:31:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Flávia Augusta Guilherme Gonçalves Rezende (coorientadora)

Documento assinado digitalmente
 **CLEVERSON FERNANDO GARCIA**
Data: 18/03/2026 08:26:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cleverson Fernando Garcia

Documento assinado digitalmente
 **ANGELA DE MELLO FERREIRA**
Data: 16/03/2026 22:38:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Angela de Mello Ferreira

Documento assinado digitalmente
 **JOAO PAULO FERREIRA SANTOS**
Data: 12/03/2026 01:01:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo desta trajetória, por me amparar nos momentos de dificuldade e guiar meus passos até a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Maria e Antônio, e aos meus irmãos, Rondineli e Shirley, pelo amor incondicional, apoio constante e por sempre acreditarem em mim, mesmo quando eu mesma duvidei. Vocês são a base de tudo.

Ao meu namorado, Diogo, pelo companheirismo, paciência e apoio ao longo dessa trajetória, em especial pela ajuda nas pesquisas bibliográficas e pelo incentivo contínuo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu cunhado Fábio, pela contribuição fundamental ao projeto, especialmente no desenvolvimento e na fabricação do suporte de cromatografia em camada delgada utilizado na síntese dos filmes, contribuindo diretamente para a execução experimental do estudo.

Ao Jorge, técnico do Laboratório de Caracterização de Materiais do DEMAT/CEFET-MG, pelo valioso apoio técnico no desenvolvimento do projeto e na fabricação do espalhador utilizado no suporte de cromatografia em camada delgada, sempre com grande disponibilidade e atenção.

Aos técnicos do Laboratório de Química do DEQUI/CEFET-MG, em especial Adhonis, Rayssa, Ana, Taiane e Aline, pela boa vontade, companheirismo e constante disponibilidade em auxiliar com o acesso aos laboratórios, vidrarias e equipamentos, inclusive em dias não letivos (até mesmo no Natal).

À professora Fátima, do DEQUI/CEFET-MG, e, de forma especial, à professora Fabiana, do DCB/CEFET-MG, pelo apoio na realização dos ensaios microbiológicos, além do incentivo, confiança e torcida para que tudo desse certo.

Ao André, discente, estagiário e monitor do Laboratório de Polímeros do DEMAT/CEFET-MG, pela ajuda na análise e interpretação dos ensaios de tração, contribuindo de forma significativa para a compreensão dos resultados.

Ao Anderson, mestre pelo PPGTPP-CEFET-MG, pela paciência, disponibilidade e generosidade ao auxiliar no entendimento dos conteúdos, bem como na interpretação e obtenção de dados ao longo do trabalho.

Ao Daniel, discente do POSMAT-CEFET-MG, pelo apoio na realização das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no LCPNano – Física/UFMG.

Ao Jhonatan Bispo, do INTECHLAB-CEFET-MG, pela ajuda na instalação de softwares para análise de dados e gráficos científicos, bem como pelo suporte na plotagem dos gráficos.

Aos meus amigos próximos, que estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis, oferecendo apoio, palavras de incentivo e força para seguir em frente.

À minha orientadora, Adriana Akemi, minha “mamãe científica”, por todo o apoio, compreensão, incentivo e confiança depositados em mim ao longo desta trajetória. Sua orientação foi fundamental para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos meus coorientadores, Leonel e Flávia, pelas contribuições, ensinamentos e por me ajudarem a desenvolver um olhar mais crítico e maduro ao longo dessa jornada.

Ao laboratório LCPNano do departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), pela parceria estabelecida e pela disponibilização da infraestrutura necessária para a realização das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), pela infraestrutura, apoio institucional e por possibilitar a realização desta pesquisa.

RESUMO

O aumento dos impactos ambientais decorrentes do uso de plásticos sintéticos derivados do petróleo em embalagens alimentícias tem impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, os biofilmes à base de amido surgem como solução promissora devido à sua biodegradabilidade, ao baixo custo e à ampla disponibilidade. A incorporação de curcumina, substância bioativa extraída da *Curcuma longa*, associada à quitosana, amplia a funcionalidade desses materiais ao possibilitar propriedades antioxidantes, antimicrobianas e resposta colorimétrica a variações de pH, características desejáveis em embalagens ativas e inteligentes. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e a caracterização de filmes biodegradáveis à base de amido incorporados com curcumina e quitosana, visando aplicações em embalagens capazes de prolongar a vida útil dos alimentos e atuar como indicadores visuais de frescor. Os filmes foram obtidos por meio da adaptação do método de *casting*, utilizando placas de vidro e espalhador de cromatografia em camada delgada (CCD). A formulação principal foi composta por amido solúvel P.A., curcumina e quitosana, utilizando glicerol como plastificante. Além dessa formulação, foram preparados filmes controle contendo somente amido ou combinações parciais dos componentes, utilizados para fins comparativos. Após a secagem, os filmes foram caracterizados por espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia na região do ultravioleta-visível para sólidos (UV-Vis), análise termogravimétrica (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), ensaio de tração, solubilidade em água, microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaio de biodegradabilidade em solo, avaliação qualitativa da mudança de cor do filme em resposta à variação de pH provocada pela deterioração do alimento e ensaios microbiológicos frente a *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Candida albicans*. As análises espectroscópicas indicaram interações químicas entre os componentes, enquanto os ensaios térmicos revelaram modificações no perfil de degradação e na estabilidade da matriz polimérica. As propriedades mecânicas evidenciaram que o filme ternário apresentou o melhor equilíbrio entre resistência e flexibilidade, com resistência à tração de $0,5 \pm 0,1$ Mpa, módulo de elasticidade de $1,85 \pm 0,07$ Mpa e alongação de $28 \pm 8\%$, indicando menor rigidez e maior capacidade de deformação em comparação com o amido puro. A solubilidade em água ($52,0 \pm 1\%$) revelou estabilidade compatível com aplicações em embalagens biodegradáveis. A análise morfológica por MEV demonstrou uma superfície contínua, matriz homogênea e ausência de defeitos estruturais críticos. Nos ensaios microbiológicos, o filme ternário exibiu atividade antimicrobiana mensurável, evidenciada por halos de inibição de $30,0 \pm 1,0$ mm (*Staphylococcus aureus*), $24,7 \pm 0,6$ mm (*Escherichia coli*) e $22,3 \pm 0,6$ mm (*Candida albicans*), sugerindo maior sensibilidade da bactéria Gram-positiva. Os testes de biodegradação em solo confirmaram a natureza biodegradável do material, com redução progressiva da massa remanescente para $70 \pm 4\%$ (15 dias), $59,4 \pm 0,3\%$ (30 dias) e $28 \pm 1\%$ (60 dias). Adicionalmente, a avaliação qualitativa com alimentos demonstrou resposta cromática evidente da curcumina às variações de pH associadas à deterioração dos alimentos, validando seu potencial como indicador visual de frescor, observado pela mudança de coloração para tons alaranjados e avermelhados, compatíveis com meios alcalinos com pH estimado entre 10 e 12. De forma integrada, os resultados indicam que o filme de amido, quitosana e curcumina reúne biodegradabilidade, estabilidade estrutural, atividade antimicrobiana e funcionalidade inteligente, mostrando potencial para aplicação em embalagens alimentícias sustentáveis, em consonância com os princípios da Química Verde e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: Filmes biodegradáveis. Embalagens alimentícias. Embalagens inteligentes. Curcumina. Quitosana.

ABSTRACT

The increasing environmental impacts resulting from the use of petroleum-derived synthetic plastics in food packaging have driven the search for more sustainable alternatives. In this context, starch-based biodegradable films have emerged as a promising solution due to their biodegradability, low cost, and wide availability. The incorporation of curcumin, a bioactive compound extracted from *Curcuma longa*, associated with chitosan, enhances the functionality of these materials by providing antioxidant, antimicrobial, and colorimetric responses to pH variations, which are desirable characteristics for active and intelligent packaging applications. Therefore, this study aimed to develop and characterize starch-based biodegradable films incorporated with curcumin and chitosan for applications in packaging capable of extending food shelf life and acting as visual freshness indicators. The films were obtained by adapting the casting method using glass plates and a thin-layer chromatography (TLC) spreader. The main formulation consisted of soluble starch (P.A. grade), curcumin, and chitosan, with glycerol used as a plasticizer. In addition to this formulation, control films containing only starch or partial combinations of the components were prepared for comparative purposes. After drying, the films were characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible spectroscopy for solid samples (UV-Vis), thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), tensile testing, water solubility, scanning electron microscopy (SEM), soil biodegradability testing, qualitative color change evaluation in response to pH variation caused by food spoilage, and microbiological assays against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Candida albicans*. Spectroscopic analyses indicated chemical interactions between the components, while thermal analyses revealed modifications in the degradation profile and stability of the polymeric matrix. Mechanical properties demonstrated that the ternary film exhibited the best balance between strength and flexibility, with tensile strength of 0.5 ± 0.1 MPa, elastic modulus of 1.85 ± 0.07 MPa, and elongation of $28 \pm 8\%$, indicating lower rigidity and greater deformation capacity compared with pure starch. Water solubility ($52.0 \pm 1\%$) revealed stability compatible with biodegradable packaging applications. Morphological analysis by SEM showed a continuous surface, homogeneous matrix, and absence of critical structural defects. In microbiological assays, the ternary film exhibited measurable antimicrobial activity, evidenced by inhibition zones of 30.0 ± 1.0 mm (*Staphylococcus aureus*), 24.7 ± 0.6 mm (*Escherichia coli*), and 22.3 ± 0.6 mm (*Candida albicans*), suggesting greater sensitivity of the Gram-positive bacterium. Soil biodegradation tests confirmed the biodegradable nature of the material, with a progressive reduction in the remaining mass to $70 \pm 4\%$ (15 days), $59.4 \pm 0.3\%$ (30 days), and $28 \pm 1\%$ (60 days). Additionally, qualitative food storage tests demonstrated a clear colorimetric response of curcumin to pH variations associated with food spoilage, confirming its potential as a visual freshness indicator. This response was evidenced by a color change to orange and reddish hues, consistent with alkaline conditions at an estimated pH range of 10 to 12. Overall, the results indicate that the starch–chitosan–curcumin film combines biodegradability, structural stability, antimicrobial activity, and intelligent functionality, demonstrating potential for application in sustainable food packaging in accordance with the principles of Green Chemistry and the Sustainable Development Goals.

Keywords: Biodegradable films. Food packaging. Smart packaging. Curcumin. Chitosan.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Mudança de cor como indicador de frescor aplicado a embalagens inteligentes	19
Figura 2- Diagramas esquemáticos de filmes de embalagens de alimentos inteligentes de base biológica que respondem a (A) pH/gás, (B) temperatura, (C) umidade e (D) enzimas.	20
Figura 3- Estrutura química da Amilose.....	22
Figura 4- Estrutura química da Amilopectina	22
Figura 5 - Processo de gelatinização do amido	24
Figura 6- Estruturas químicas da quitina e quitosana.....	25
Figura 7- Mecanismos de interação entre amido e quitosana.....	27
Figura 8 - Estrutura química dos curcuminoides.....	29
Figura 9- Reação de tautomerização ceto-enólico da curcumina	29
Figura 10 - Estrutura química do glicerol.....	32
Figura 11 - Fluxograma da metodologia experimental para obtenção e caracterização dos filmes	34
Figura 12- Suporte e espalhador de cromatografia em camada delgada	36
Figura 13- Esquema do procedimento de obtenção do filme de amido	38
Figura 14- Esquema do procedimento de obtenção do filme de amido e curcumina.....	39
Figura 15- Esquema do procedimento de obtenção do filme de amido e quitosana	41
Figura 16- Esquema do procedimento de obtenção do filme de amido, curcumina e quitosana	42
Figura 17- Filme na tela plástica antes de ser enterrado	48
Figura 18- Termogramas de DSC dos filmes à base de amido	52
Figura 19- Curvas termogravimétricas (TG) e derivadas termogravimétricas (DTG) dos filmes à base de amido.....	55
Figura 20- Espectros de FTIR para filmes biodegradáveis à base de amido.....	61
Figura 21 - Espectros UV-Vis dos filmes à base de amido	64
Figura 22- Curvas tensão versus deformação dos filmes à base de amido.....	67
Figura 23- Micrografias dos filmes e grânulos de amido	73
Figura 24- Avaliação da atividade antimicrobiana dos filmes à base de amido.....	75
Figura 25- Ensaio de difusão em ágar com controles positivos para <i>S. aureus</i> (a) e <i>E. coli</i> (b)	76
Figura 26- Percentual de biodegradação em solo dos filmes ao longo de 60 dias	81
Figura 27- Resposta colorimétrica dos filmes biodegradáveis em função do pH	85

Figura 28- Desempenho dos filmes na conservação de (a) morango, (b) presunto e (c) camarão	86
Figura 29- Mecanismo de mudança de cor da curcumina em função do pH	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fontes convencionais de amido com teores de amilose e amilopectina	23
Quadro 2 – Reagentes e insumos utilizados na produção e caracterização dos biofilmes	35
Quadro 3- Equipamentos utilizados na produção e caracterização dos filmes.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição quantitativa das formulações filmogênicas à base de amido.....	37
Tabela 2- Espessura média dos filmes biodegradáveis	51
Tabela 3- Temperaturas dos picos de degradação térmica, perdas de massa associadas e resíduo final obtidos por análise TG/DTG dos filmes à base de amido.....	56
Tabela 4- Solubilidade média dos filmes biodegradáveis	59
Tabela 5- Espessura média, absorbância a 600 nm e opacidade dos filmes à base de amido ..	65
Tabela 6- Propriedades mecânicas dos filmes à base de amido: resistência à tração, módulo de elasticidade e alongação na ruptura	67
Tabela 7- Halos de inibição (mm) dos filmes frente aos microrganismos testados	76
Tabela 8- Massa inicial e massa remanescente dos filmes durante a degradação em solo	80
Tabela 9 - Percentual de biodegradação dos filmes ao longo do ensaio de degradação em solo	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMP	Ampicilina
ANOVA	Análise de Variância (do inglês, <i>Analysis of Variance</i>)
ATR	Reflectância Total Atenuada (do inglês, <i>Attenuated Total Reflectance</i>)
BAC	Bacitracina
CCD	Cromatografia em Camada Delgada
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CRO	Ceftriaxona
DCB	Departamento de Ciências Biológicas
DEMAT	Departamento de Engenharia de Materiais
DEQUI	Departamento de Química
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial (do inglês, <i>Differential Scanning Calorimetry</i>)
DTG	Termogravimetria Derivada (do inglês, <i>Derivative Thermogravimetry</i>)
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (do inglês, <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>)
LCPNano	Laboratório de Caracterização de Propriedades Nanoestruturais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OPT	Optoquímica
P.A.	Grau analítico (Para Análise)
pH	Potencial hidrogeniônico
PIT	Piperacilina/tazobactam
PPGTPP	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos
PVA	Álcool Polivinílico
PVC	Policloreto de vinila
T _c	Temperatura de cristalização (do inglês, <i>Crystallization Temperature</i>)
TG	Termogravimetria
T _g	Temperatura de transição vítrea (do inglês, <i>Glass Transition Temperature</i>)
TGA	Análise Termogravimétrica (do inglês, <i>Thermogravimetric Analysis</i>)
T _m	Temperatura de fusão (do inglês, <i>Melting Temperature</i>)
UV-Vis	Espectroscopia na região do ultravioleta-visível
X _c	Grau de cristalinidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Embalagens Ativas e Inteligentes.....	19
3.2 Amido como matriz polimérica.....	21
3.3 Quitosana: propriedades, obtenção e aplicação em filmes biodegradáveis para embalagens ativas e inteligentes	24
3.4 Curcumina como composto ativo e indicador de frescor	28
3.5 Filmes biodegradáveis em embalagens alimentícias	30
4 METODOLOGIA.....	34
4.1 Reagentes e insumos.....	34
4.2 Equipamentos	35
4.3 Desenvolvimento dos filmes.....	36
4.3.1 Amido.....	37
4.3.2 Amido e Curcumina	38
4.3.3 Amido e Quitosana.....	40
4.3.4 Amido, Curcumina e Quitosana	41
4.4 Caracterização dos Filmes.....	42
4.4.1 Espessura.....	42
4.4.2 Calorimetria exploratória diferencial.....	43
4.4.3 Termogravimetria	43
4.4.4 Solubilidade em água.....	43
4.4.5 Espectroscopia na região do infravermelho.....	44
4.4.6 Espectroscopia na região do ultravioleta para sólidos	44

<i>4.4.7 Ensaio de Tração</i>	45
<i>4.4.8 Microscopia eletrônica de varredura</i>	46
<i>4.4.9 Ensaio de difusão em ágar</i>	46
<i>4.4.10 Ensaio de degradação em solo</i>	47
<i>4.4.11 Avaliação qualitativa da resposta colorimétrica ao pH e da atividade antimicrobiana de filmes biodegradáveis</i>	49
<i>4.4.12 Análise Estatística</i>	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1 Espessura	51
5.2 Calorimetria Exploratória Diferencial	52
5.3 Termogravimetria	54
5.4 Solubilidade em Água	59
5.5 Espectroscopia na região do infravermelho	61
5.6 Espectroscopia na região do ultravioleta-visível para sólidos	64
5.7 Ensaio de Tração	66
5.8 Microscopia eletrônica de varredura	72
5.9 Ensaio de difusão em ágar	75
5.10 Ensaio de degradação em solo	80
5.11 Avaliação qualitativa da resposta colorimétrica ao pH e da atividade antimicrobiana de filmes biodegradáveis	85
6 CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o consumo de plásticos sintéticos derivados do petróleo, sobretudo em embalagens alimentícias, consolidou-se como um dos maiores desafios ambientais. Estimativas indicam que as embalagens respondem por mais de 40% de todo o lixo plástico gerado no planeta, intensificando a contaminação de solos e ecossistemas aquáticos (MENA, 2024; PANDA; SADEGHI; SEO, 2022). Em 2015, cerca de 141 milhões de toneladas de embalagens plásticas foram descartadas globalmente, mas apenas 14% desse volume foi efetivamente reciclado; o restante acabou em aterros ou lixões, alimentando uma projeção de aumento nos resíduos sólidos urbanos de 3,5 para 6,1 milhões t dia⁻¹ até 2025 (AFZAL *et al.*, 2021). Com a produção mundial ultrapassando 400 milhões t ano⁻¹ em 2022 e mantido o ritmo ascendente previsto para os próximos anos, torna-se imperativo buscar soluções de embalagens ambientalmente sustentáveis (PILAPITIYA; RATNAYAKE, 2024).

A crescente demanda por embalagens mais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de materiais biodegradáveis obtidos a partir de fontes renováveis. Nesse contexto, o uso de macromoléculas naturais na produção de filmes poliméricos tem se destacado como uma alternativa promissora aos plásticos convencionais, em razão de seu apelo ecológico, biodegradável e potencial aplicação na indústria de alimentos. Diversos biopolímeros vêm sendo amplamente investigados, como gelatina, proteínas e polissacarídeos, com destaque para o amido e a quitosana, que podem ser utilizados isoladamente ou em combinação para melhorar o desempenho funcional das embalagens (REMEDIO, 2016).

Entre essas alternativas, os filmes biodegradáveis à base de amido ganham relevância por aliarem renovabilidade, baixo custo e facilidade de processamento (CUI *et al.*, 2021; DUTTA; SIT, 2024; MOHAMMED *et al.*, 2022). O amido representa a maior fração do mercado de bioplásticos, podendo ser empregado em sua forma nativa, quimicamente modificada ou em *blendas*, o que permite a modulação de suas propriedades conforme a aplicação desejada (MOHAMMED *et al.*, 2022). No entanto, limitações como elevada sensibilidade à umidade e baixa resistência mecânica tornam necessária a incorporação de plastificantes, os quais reduzem a temperatura de transição vítrea e aumentam a mobilidade das cadeias poliméricas, resultando em materiais mais flexíveis e adequados ao uso como filmes (LIU *et al.*, 2022).

A quitosana, por sua vez, destaca-se entre os polímeros naturais por ser biodegradável, atóxica e apresentar atividade antimicrobiana. Obtida a partir da desacetilação da quitina, o segundo polímero natural mais abundante na natureza e amplamente disponível como resíduo

da indústria pesqueira, a quitosana possui características físico-químicas que favorecem sua aplicação como formadora de filmes. Sua solubilidade em meio ácido amplia seu potencial de uso em embalagens, especialmente para alimentos, sendo amplamente estudada como componente funcional capaz de agregar propriedades ativas aos materiais biodegradáveis. (PAVONI *et al.*, 2019).

A funcionalização desses filmes com compostos bioativos amplia ainda mais seu potencial. A curcumina, principal polifenol da cúrcuma, é reconhecida por suas atividades antioxidante, antimicrobiana, anti-inflamatória e anticancerígena (ROY *et al.*, 2022; FORSYTH *et al.*, 2019). Além disso, em matrizes amiláceas, atua como sensor colorimétrico de pH, mudando de cor em resposta à liberação de aminas voláteis durante a deterioração de alimentos ricos em proteínas (ERNA *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2024). Dessa forma, filmes de amido e quitosana plastificados e enriquecidos com curcumina apresentam potencial para atuar na preservação da qualidade dos alimentos e no monitoramento de alterações associadas à sua deterioração.

Nesse cenário, emergem as embalagens ativas e inteligentes como alternativas inovadoras que ampliam o papel tradicional da embalagem. Em vez de apenas proteger e transportar, essas embalagens atuam na preservação e no monitoramento dos alimentos, trazendo ganhos funcionais e informacionais. As embalagens ativas interagem diretamente com o produto, prolongando frescor e qualidade por meio da liberação ou absorção controlada de substâncias, como antioxidantes e absorvedores de oxigênio. Já as inteligentes monitoram em tempo real as condições do alimento, utilizando sensores, biossensores e indicadores visuais que transmitem informações relevantes ao consumidor. Dessa forma, além de estender a vida de prateleira e assegurar maior segurança, essas tecnologias fortalecem a competitividade das indústrias ao atenderem demandas por soluções modernas, práticas, sustentáveis e funcionais (MIRANDA; SOUSA, 2024).

Por fim, o desenvolvimento desses filmes biodegradáveis conecta-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente ao ODS 12, que trata do consumo e produção responsáveis, e ao ODS 9, que incentiva inovação e infraestrutura sustentáveis. Além disso, essas soluções atendem aos princípios da Química Verde, uma vez que utilizam matérias-primas renováveis, solventes predominantemente aquosos e temperaturas moderadas de processamento, reduzindo tanto o consumo energético quanto a geração de resíduos (CARVALHO *et al.*, 2022). Assim, a substituição das embalagens convencionais de origem fóssil por filmes de amido plastificados e funcionalizados com curcumina representa não apenas uma alternativa viável para mitigar os impactos ambientais dos resíduos plásticos,

mas também um avanço tecnológico alinhado às demandas globais de sustentabilidade e segurança alimentar do século XXI.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e caracterizar filmes biodegradáveis à base de amido incorporados com curcumina e quitosana, visando seu uso em embalagens ativas e inteligentes.

2.2 Objetivos Específicos

- Formular filmes biodegradáveis à base de amido com incorporação de curcumina e quitosana, ajustando as concentrações e condições de processamento para obter uma matriz homogênea e funcional.
- Caracterizar os filmes produzidos por meio da determinação de suas propriedades físico-químicas e mecânicas, visando avaliar sua viabilidade estrutural para uso em embalagens.
- Avaliar as propriedades antimicrobianas dos filmes, a fim de determinar seu potencial para inibir o crescimento de microrganismos.
- Avaliar a capacidade de resposta do filme às mudanças de pH, verificando a eficácia da curcumina como indicador visual da degradação de alimentos, o que confere funcionalidade de monitoramento de frescor aos filmes.
- Analisar a biodegradabilidade dos filmes determinando a taxa de decomposição em solo.
- Realizar testes qualitativos de preservação de alimentos, avaliando o desempenho dos filmes na conservação e monitoramento de produtos alimentícios de origem animal e frutas, ao longo de um determinado período.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Embalagens Ativas e Inteligentes

As embalagens ativas e inteligentes representam um avanço tecnológico no setor de alimentos, ampliando o papel da embalagem além da função tradicional de proteção e transporte. Essas inovações contribuem diretamente para a preservação da qualidade dos produtos, aumento da vida útil, redução de desperdícios e fornecimento de informações sobre a qualidade e o estado de conservação do alimento ao consumidor (GROSSMANN, 2007; MIRANDA; SOUSA, 2024).

As embalagens ativas são projetadas para interagir com o alimento ou com a atmosfera interna da embalagem, com o intuito de retardar a deterioração. Entre os mecanismos mais comuns, destacam-se a absorção de oxigênio e umidade, além da liberação controlada de compostos antimicrobianos e antioxidantes (GROSSMANN, 2007; CUI *et al.*, 2021). Essas embalagens são aplicadas, por exemplo, em carnes, queijos e pães, nos quais reduzem a oxidação lipídica e o crescimento de microrganismos deteriorantes.

Por sua vez, as embalagens inteligentes não atuam diretamente sobre a conservação, mas fornecem informações sobre o estado do alimento em tempo real. Tecnologias como indicadores de tempo-temperatura, sensores de gases e indicadores de frescor baseados em corantes sensíveis ao pH são capazes de monitorar alterações ocorridas durante o armazenamento e o transporte (GHAANI *et al.*, 2016; LV *et al.*, 2023; HUANG *et al.*, 2025). Essas embalagens apresentam resposta visual simples, como a mudança de cor, que pode sinalizar a deterioração de peixes e carnes em função da presença de aminas voláteis, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1- Mudança de cor como indicador de frescor aplicado a embalagens inteligentes



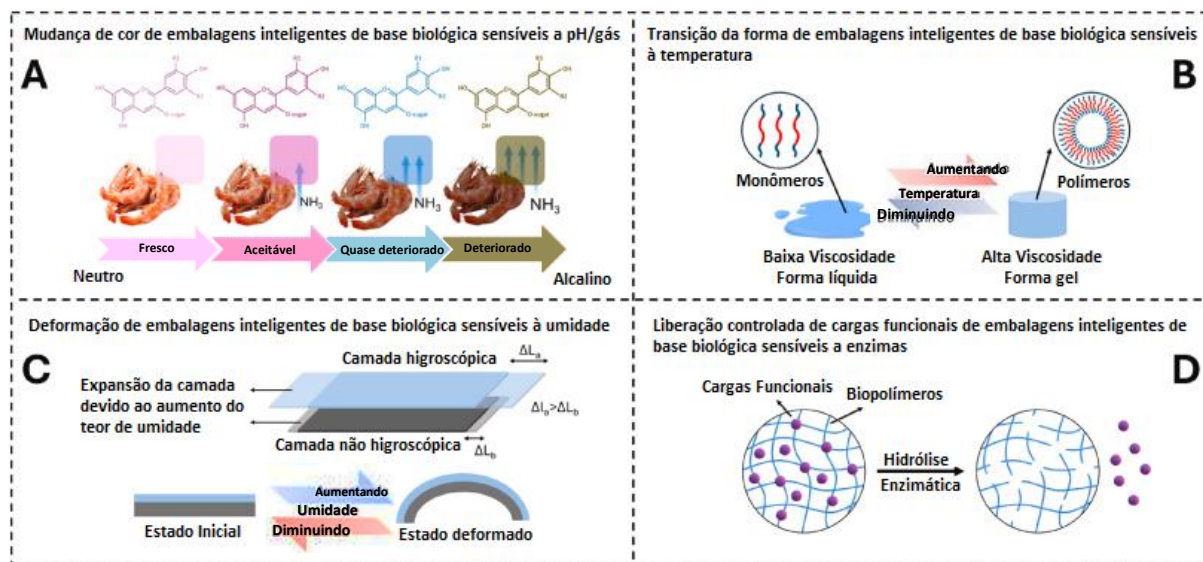
Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2024)

Nos últimos anos, observa-se a convergência entre esses dois conceitos, resultando no chamado *smart packaging*, em que a embalagem atua tanto de forma ativa, protegendo o alimento, quanto de forma inteligente, monitorando e informando seu estado de conservação.

Neste cenário, o uso de compostos bioativos naturais tem se destacado, em especial a curcumina, metabólito secundário extraído da *Curcuma longa* com propriedades antioxidantes, antimicrobianas e sensibilidade ao pH. Quando incorporada a filmes poliméricos biodegradáveis, como os de amido, a curcumina desempenha uma dupla função: (i) ativa, ao reduzir processos oxidativos e microbianos; e (ii) inteligente, ao indicar a deterioração de alimentos proteicos por meio da mudança de cor diante da liberação de amins voláteis (ONGARATTO *et al.*, 2022; MIRANDA; SOUSA, 2024; CHAUHAN *et al.*, 2022).

Diversos estudos têm evidenciado a eficiência de filmes bioativos e inteligentes incorporados com compostos naturais. A Figura 2 apresenta diferentes mecanismos responsivos aplicados a essas embalagens, incluindo alterações de cor induzidas por pH e gases voláteis liberados durante a deterioração (A); indicadores sensíveis à temperatura, utilizados no monitoramento da cadeia de frio (B) (HUANG *et al.*, 2025; SINGH *et al.*, 2017); mecanismos responsivos à umidade relativa, capazes de controlar a liberação ou a absorção de água (C); e processos enzimáticos associados à liberação de compostos ativos na presença de enzimas microbianas (D). Nesse contexto, as embalagens multirresponsivas associam mais de um desses mecanismos, permitindo o monitoramento simultâneo de diferentes variáveis relacionadas à conservação e à qualidade dos alimentos (HUANG *et al.*, 2025).

Figura 2- Diagramas esquemáticos de filmes de embalagens de alimentos inteligentes de base biológica que respondem a (A) pH/gás, (B) temperatura, (C) umidade e (D) enzimas.



Fonte: Adaptado de Huang *et al.* (2025).

Os filmes biodegradáveis à base de amido destacam-se como suporte para essas inovações, uma vez que são acessíveis, renováveis, biodegradáveis e alinhados à Química Verde e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 13 (Ação

contra a Mudança Global do Clima) (CARVALHO *et al.*, 2022; ROY *et al.*, 2022). Assim, a integração de bioativos como a curcumina em filmes de amido configura uma alternativa promissora para o desenvolvimento de embalagens multifuncionais que unam conservação, monitoramento e sustentabilidade.

Apesar dos avanços, desafios ainda precisam ser superados, como os custos de produção, a estabilidade de materiais ativos e inteligentes durante a vida útil e a adequação às regulamentações internacionais. A União Europeia, por exemplo, por meio do Regulamento CE nº 450/2009, estabelece diretrizes para materiais ativos e inteligentes em contato com alimentos, exigindo comprovação de segurança e clareza na comunicação ao consumidor (GHAANI *et al.*, 2016).

Dessa forma, as embalagens ativas e inteligentes, especialmente quando produzidas a partir de matrizes biodegradáveis como o amido e enriquecidas com compostos naturais, configuram-se como soluções inovadoras e estratégicas para a segurança alimentar, a redução do desperdício e a sustentabilidade da cadeia de suprimentos.

3.2 Amido como matriz polimérica

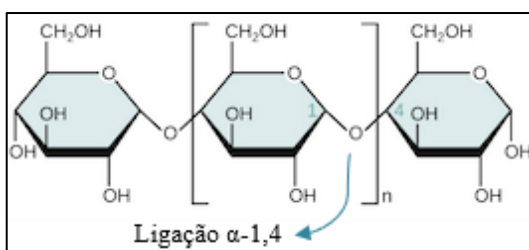
O amido é reconhecido como um dos polímeros naturais mais abundantes e versáteis, sendo amplamente utilizado na indústria alimentícia e no desenvolvimento de materiais biodegradáveis. Seu interesse tecnológico está associado ao baixo custo, à ampla disponibilidade, à biodegradabilidade e à possibilidade de aplicação em materiais comestíveis. Nesse contexto, o amido tem se destacado como matéria-prima promissora na substituição parcial de polímeros sintéticos em embalagens sustentáveis (AVÉROUS, 2004; TESTER; KARKALAS; QI, 2004; THARANATHAN, 2003).

Do ponto de vista estrutural, o amido é constituído por dois polissacarídeos principais: amilose e amilopectina, cujas proporções variam conforme a fonte botânica e influenciam diretamente suas propriedades físico-químicas e tecnológicas (BILIADERIS, 2009; CUI *et al.*, 2021).

A amilose é um polissacarídeo predominantemente linear, formado por unidades de glicose ligadas principalmente por ligações glicosídicas α -1,4, como mostra a Figura 3. Sob a perspectiva físico-química, sua estrutura pouco ramificada favorece maior aproximação e organização entre as cadeias poliméricas, possibilitando maior densidade de interações intermoleculares, especialmente por ligações de hidrogênio entre grupos hidroxila. Esse maior empacotamento molecular resulta na formação de uma rede mais coesa durante o processo de secagem, o que contribui para a obtenção de filmes contínuos, homogêneos e, frequentemente,

mais transparentes. Dessa forma, materiais com maior teor de amilose tendem a apresentar melhor capacidade de formação de filmes, sendo amplamente explorados em aplicações de embalagens biodegradáveis e filmes comestíveis (ZHANG *et al.*, 2014).

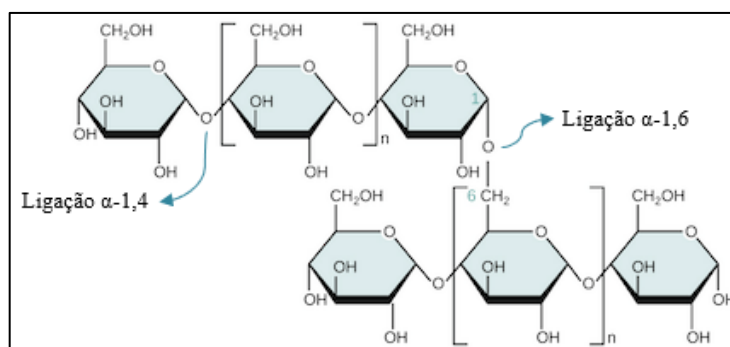
Figura 3- Estrutura química da Amilose



Fonte: Adaptado de Tan *et al.* (2022a)

A amilopectina, por sua vez, apresenta uma estrutura altamente ramificada, composta por ligações α -1,4 na cadeia principal e α -1,6 nos pontos de ramificação, como mostra a Figura 4. Do ponto de vista físico-químico, essas ramificações dificultam o alinhamento entre as cadeias, reduzindo a eficiência do empacotamento molecular e modificando as interações intermoleculares do material polimérico. Como consequência, a presença de amilopectina influencia significativamente as propriedades reológicas do material, como viscosidade, elasticidade e comportamento sob deformação. Assim, a estrutura ramificada da amilopectina não é a única responsável pelo comportamento viscoelástico, mas desempenha papel fundamental na modulação da resposta viscoelástica da matriz amilácea, além de contribuir para a formação e estabilidade de géis e pastas. (WHISTLER; DANIEL, 1984; TESTER *et al.*, 2004).

Figura 4- Estrutura química da Amilopectina



Fonte: Adaptado de Tan *et al.* (2022a)

Dessa forma, a proporção entre amilose e amilopectina constitui um fator determinante para as propriedades finais do material, influenciando características como solubilidade, retrogradação, viscosidade, formação de filmes e resistência mecânica (CUI *et al.*, 2021). Essa

proporção varia conforme a origem botânica do amido, como milho, batata e mandioca. As variações composicionais entre diferentes fontes são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Fontes convencionais de amido com teores de amilose e amilopectina

Fontes de amido	Teor de amido (%)	Teor de amilose (%)	Teor de amilopectina (%)
Batata	60–80	25–31	69–75
Araruta	88–89	20,5	79,5
Arroz	81–92	15–35	65–85
Milho	70–75	17–28	75–83
Milho (Normal)	70–72	15–20	80–85
Milho (<i>Hylon 7</i>)	71–87	40–77	23–60
Trigo	60–70	17–34	75–80
Mandioca	20–32	19–22	28–81
Leguminosas	50–60	36–42	58–64
Inhame	16–20	9–15	85–91
Castanha	-	15–22	78–85

Fonte: Fatima *et al.* (2024)

As diferentes fontes de amido conferem características estruturais específicas ao material, o que possibilita sua aplicação tanto de forma isolada quanto em combinação com outras matrizes poliméricas. Por exemplo, filmes biodegradáveis produzidos com amido de batata têm demonstrado maior cristalinidade, estabilidade térmica superior e menor temperatura de gelatinização em comparação aos filmes feitos com amido de milho. Essas propriedades tornam o amido de batata mais adequado para aplicações que exigem flexibilidade e resistência à umidade (ARIAS *et al.*, 2024; FRIEDRICHSEN *et al.*, 2022).

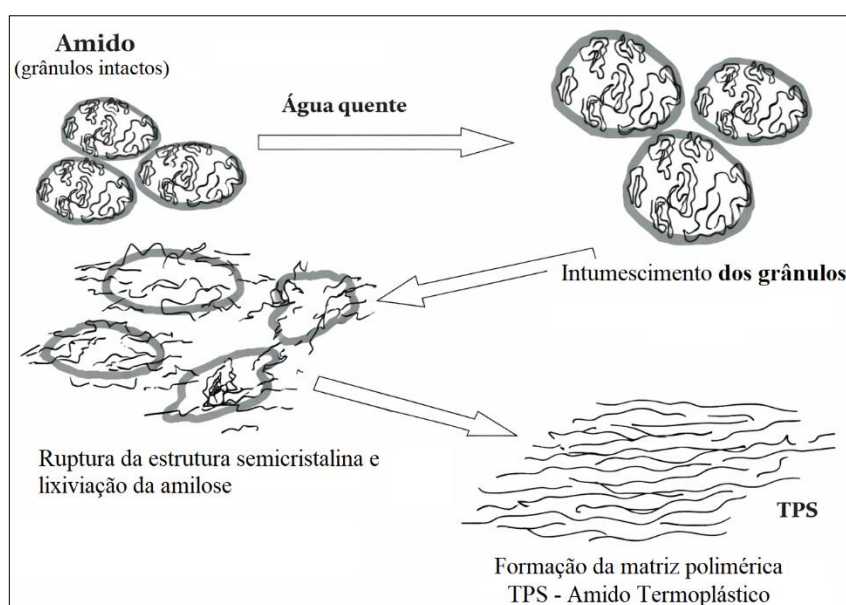
O amido de mandioca, por sua vez, tem se destacado pela sua excelente processabilidade térmica e capacidade de formar estruturas uniformes. Além disso, ao ser combinado com fibras naturais ou nanocelulose, o amido de mandioca forma compósitos com propriedades mecânicas significativamente aprimoradas, alcançando resistências à tração de até 12,8 MPa, enquanto reduz a absorção de umidade e melhora a cristalinidade do material (GARUTI *et al.*, 2024).

As diferenças no tamanho dos grânulos também são relevantes: o amido de milho apresenta grânulos menores (5–30 μm) e temperatura de gelatinização mais elevada (62–72 °C) em comparação ao da batata (59–68 °C), o que pode demandar ajustes no processamento térmico, dependendo da aplicação final (MURATKHAN *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a formação de filmes à base de amido está diretamente associada ao processo de gelatinização, etapa fundamental para a obtenção de uma matriz contínua, como mostra a Figura 5. A gelatinização dos grânulos ocorre em meio aquoso sob aquecimento e consiste, do ponto de vista físico-químico, na ruptura progressiva da organização semicristalina

do amido. Inicialmente, a água penetra nas regiões amorfas do grânulo, promovendo seu intumescimento e o enfraquecimento das interações intermoleculares. Com o aumento da temperatura, ocorre perda da birrefringência, aumento da mobilidade das cadeias poliméricas e lixiviação parcial da amilose para o meio aquoso. Após a etapa de moldagem, durante a secagem, as cadeias poliméricas se reaproximam e estabelecem novas interações, principalmente por ligações de hidrogênio entre grupos hidroxila, resultando na formação de uma matriz contínua na forma de filme (TESTER; KARKALAS; QI, 2004; SINGH *et al.*, 2003; AYYUBI *et al.*, 2022).

Figura 5 - Processo de gelatinização do amido



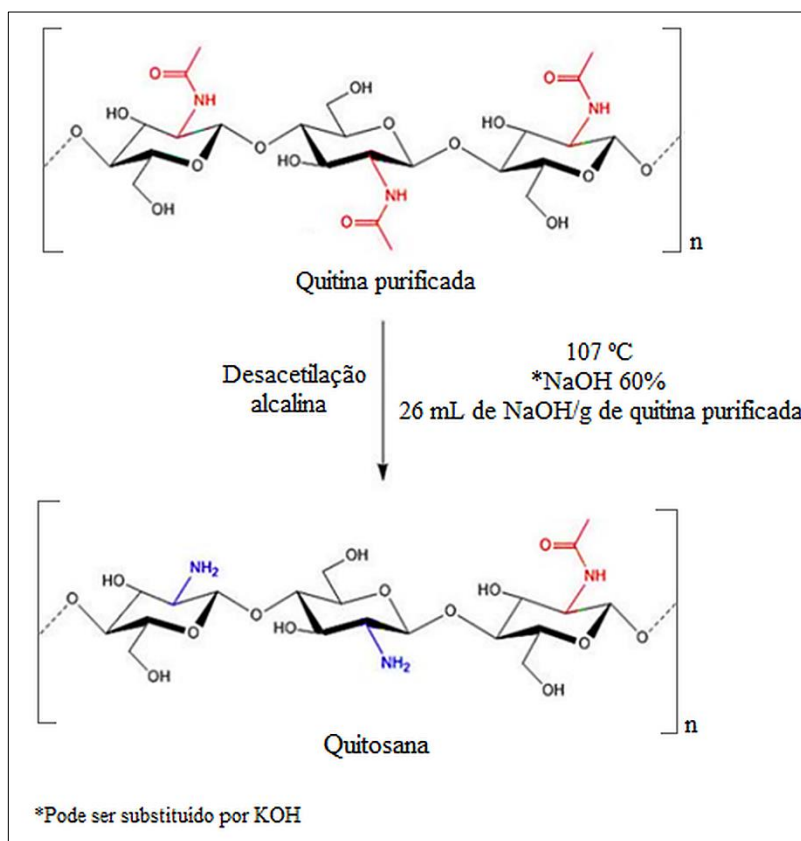
Fonte: Adaptado de Barufaldi (2023)

Em suma, a escolha da fonte de amido é uma variável crítica no desenvolvimento de materiais poliméricos biodegradáveis. Compreender suas propriedades estruturais e funcionais permite direcionar sua aplicação de forma mais eficiente, seja na produção de filmes, cápsulas, embalagens ativas ou compósitos, contribuindo para a substituição sustentável dos polímeros sintéticos convencionais (MOLAVI *et al.*, 2015; ŽOLEK-TRYZNOWSKA *et al.*, 2021).

3.3 Quitosana: propriedades, obtenção e aplicação em filmes biodegradáveis para embalagens ativas e inteligentes

A quitosana é um polissacarídeo linear de natureza catiônica obtido a partir da desacetilação da quitina, um biopolímero amplamente encontrado em resíduos da indústria pesqueira, como cascas de camarão e caranguejo, além de insetos e fungos (YI *et al.*, 2024), como mostra a Figura 6.

Figura 6- Estruturas químicas da quitina e quitosana



Fonte: Adaptado de Pena *et al.* (2021) e O. *et al.* (2017)

Tradicionalmente, a conversão da quitina em quitosana é realizada por processos químicos de desacetilação alcalina, nos quais grupos acetila são removidos, originando grupos amino livres ao longo da cadeia polimérica (NOVIKOV *et al.*, 2023). Nos últimos anos, entretanto, têm sido propostas rotas mais sustentáveis, como processos enzimáticos, fermentativos e o uso de solventes eutéticos profundos, alinhadas aos princípios da Química Verde e à valorização de resíduos (LI, Rou *et al.*, 2024; MERSMANN *et al.*, 2025; THAMER *et al.*, 2025). A presença de grupos amino permite a protonação da quitosana em meio ácido, tornando-a solúvel em soluções aquosas de ácidos orgânicos fracos, como ácido acético, láctico e cítrico, condição essencial para a preparação de soluções filmogênicas homogêneas e para sua aplicação em embalagens biodegradáveis (NOVIKOV *et al.*, 2023).

As propriedades físico-químicas da quitosana que condicionam sua capacidade de formar filmes estão principalmente relacionadas ao grau de desacetilação e à massa molar do polímero (DINCULESCU *et al.*, 2024).

O grau de desacetilação determina a quantidade de grupos amino livres ao longo da cadeia polimérica e, conseqüentemente, a densidade de carga positiva em meio ácido, influenciando a solubilidade, a intensidade das interações intermoleculares e a coesão da matriz

filmogênica; de modo geral, quitosanas com maior grau de desacetilação favorecem a formação de filmes mais homogêneos e com melhor desempenho funcional (CARRERA *et al.*, 2023; MARTINS *et al.*, 2025).

A massa molar, por sua vez, afeta a viscosidade das soluções filmogênicas, a organização estrutural e o comportamento mecânico do filme, sendo que massas molares mais elevadas tendem a originar filmes mais coesos e resistentes, enquanto massas molares menores aumentam a mobilidade das cadeias (ARAÚJO *et al.*, 2025). Em conjunto, o equilíbrio entre grau de desacetilação e massa molar resulta em filmes de quitosana com boa transparência, elevada barreira a gases como oxigênio e dióxido de carbono e atividade antimicrobiana, embora sejam hidrofílicos e sensíveis à umidade, o que frequentemente requer a incorporação de plastificantes para melhorar a flexibilidade e a resistência mecânica (BEZERRA, 2018; REMEDIO, 2016).

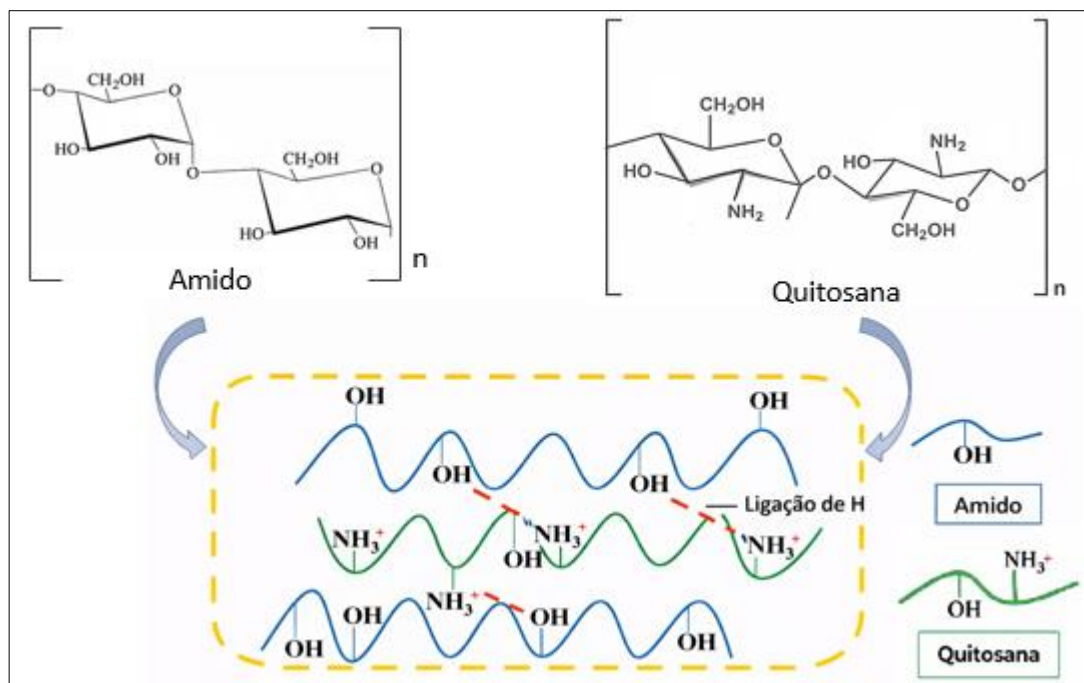
A atividade antimicrobiana da quitosana decorre de sua estrutura catiônica em meio ácido, na qual os grupos amino protonados ($-NH_3^+$) interagem eletrostaticamente com componentes negativamente carregados das paredes e membranas celulares de bactérias e fungos. Essa interação provoca aumento da permeabilidade da membrana, desorganização estrutural e extravasamento de constituintes celulares, resultando na inibição do crescimento microbiano, sem a necessidade de agentes antimicrobianos adicionais (GOY; BRITTO; ASSIS, 2009). A eficiência desse mecanismo é fortemente dependente do pH, do grau de desacetilação e da massa molar da quitosana (MIRBAGHERI *et al.*, 2024). Quitosanas com baixo grau de desacetilação apresentam menor densidade de carga positiva e, conseqüentemente, menor atividade antimicrobiana, enquanto aquelas com alto grau de desacetilação favorecem interações eletrostáticas mais intensas. No entanto, massas molares excessivamente elevadas podem limitar a difusão do polímero até os sítios de ação microbiana, ao passo que massas molares muito baixas, embora aumentem a mobilidade e a penetração celular, podem ter sua eficácia reduzida se o grau de desacetilação for insuficiente (CONFEDERAT *et al.*, 2021).

Assim, a literatura aponta que quitosanas com grau de desacetilação intermediário a elevado e massa molar intermediária apresentam o melhor equilíbrio entre densidade de carga e mobilidade molecular, resultando em maior eficiência antimicrobiana frente a microrganismos de interesse em embalagens alimentícias, como *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* (CONFEDERAT *et al.*, 2021; EICKELPASCH *et al.*, 2025).

A associação da quitosana com o amido tem sido amplamente explorada como estratégia para melhorar o desempenho funcional de materiais biodegradáveis. Em matrizes de amido e quitosana, ocorrem interações intermoleculares, principalmente ligações de hidrogênio entre os

grupos hidroxila do amido e os grupos amino da quitosana, além de interações eletrostáticas, que promovem maior coesão estrutural do material polimérico (LI, Xin *et al.*, 2024; REN *et al.*, 2017; YUSOF *et al.*, 2024), como mostra a Figura 7.

Figura 7- Mecanismos de interação entre amido e quitosana



Fonte: Adaptado de Xin Li *et al.* (2024)

Como consequência dessas interações, materiais à base de amido e quitosana têm apresentado propriedades físico-mecânicas e de barreira superiores às observadas nos componentes isolados, uma vez que a combinação desses polímeros pode minimizar limitações individuais e favorecer a formação de redes mais coesas. Por exemplo, filmes de amido de arroz e quitosana exibiram aumento da resistência à tração e redução da solubilidade em água, além de melhor organização estrutural, indicando miscibilidade molecular entre os polímeros e maior coesão em comparação com filmes de amido puro (BOURTOOM *et al.*, 2008; OYEKUNLE *et al.*, 2024).

Revisões recentes também ressaltam que a incorporação de quitosana em matrizes de amido pode melhorar propriedades de barreira, estabilidade térmica e funcionalidade, além de contribuir com características antioxidantes e antimicrobianas, quando comparada aos filmes baseados apenas em amido (OYEKUNLE *et al.*, 2024). Estudos experimentais reportaram ainda que o aumento do teor de quitosana em *blendas* com amido geralmente aumenta a força mecânica e a resistência ao vapor d'água, tornando esses filmes mais adequados para aplicações em embalagens de alimentos que exigem desempenho funcional mais robusto (SOUZA, 2018).

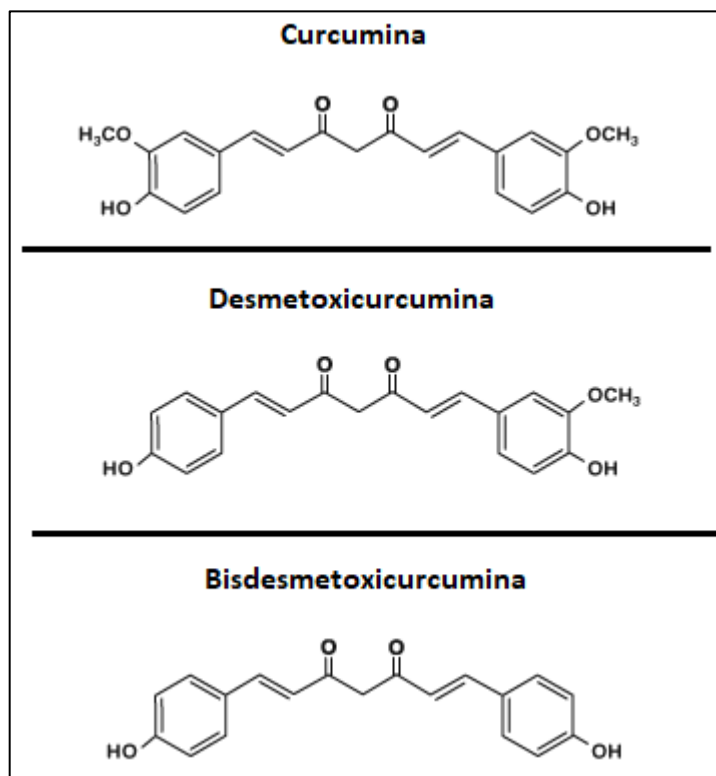
A incorporação de curcumina em filmes de quitosana ou em formulações ternárias à base de amido e quitosana tem impulsionado o desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes (ROY *et al.*, 2022), principalmente devido às propriedades funcionais desse composto fenólico natural. A curcumina apresenta reconhecida atividade antioxidante e antimicrobiana, além de sensibilidade a variações de pH, característica que possibilita sua aplicação como indicador colorimétrico de frescor (DEVI *et al.*, 2025). Em matrizes contendo quitosana, a curcumina pode apresentar maior estabilidade e melhor dispersão, favorecidas pelas interações físico-químicas estabelecidas entre os componentes.

Além disso, estudos recentes demonstram efeito sinérgico entre quitosana e curcumina, no qual a ação da quitosana sobre a membrana celular favorece a penetração da curcumina e potencializa sua atividade antimicrobiana (ETEMADI *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2016; RACHTANAPUN *et al.*, 2021). Liu *et al.* (2016) e Han Li *et al.* (2023) observaram que filmes contendo quitosana e curcumina apresentaram maior atividade antimicrobiana, melhor desempenho antioxidante e resposta visual associada à deterioração dos alimentos quando comparados àqueles produzidos com apenas um dos componentes, evidenciando o potencial desses materiais para aplicação em embalagens biodegradáveis ativas e inteligentes.

3.4 Curcumina como composto ativo e indicador de frescor

A curcumina, principal composto bioativo extraído da *Curcuma longa*, é amplamente reconhecida por suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, anticancerígenas e antimicrobianas, que a tornam valiosa tanto na medicina tradicional quanto em aplicações alimentícias, como na conservação de carnes, frutos do mar e laticínios (FORSYTH *et al.*, 2019; RACHTANAPUN *et al.*, 2021). Representando aproximadamente 70% dos curcuminoides da cúrcuma, a curcumina confere a cor amarelo-alaranjada característica do pó, possuindo uma estrutura molecular com grupos *orto*-metóxi fenólicos responsáveis pela sua capacidade antioxidante, especialmente na neutralização de radicais livres como ânions superóxidos e radicais hidroxilas, desempenhando papel essencial na inibição da peroxidação lipídica (ROY *et al.*, 2022; RACHTANAPUN *et al.*, 2021). A Figura 8 representa a estrutura química dos principais curcuminoides encontrados na cúrcuma.

Figura 8 - Estrutura química dos curcuminoides



Fonte: Adaptado de Mazzarino (2013)

Devido ao fato de as hidroxilas fenólicas da curcumina desprotonarem-se em meio alcalino, estendendo o sistema π -conjugado por meio de tautomerismo ceto-enólico (Figura 9) e gerando fenóxidos que deslocam a banda de absorção da região amarela para laranja-avermelhada, sua sensibilidade ao pH tem sido recentemente aproveitada para criar sensores colorimétricos e embalagens inteligentes capazes de monitorar, de forma visual, a elevação do pH provocada pela liberação de aminas voláteis durante a deterioração de alimentos como peixes e carnes (ROY *et al.*, 2022; MALI *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2024). Esses sensores baseados em filmes biodegradáveis incorporados com curcumina contribuem para soluções sustentáveis e práticas no controle da segurança alimentar.

Figura 9- Reação de tautomerização ceto-enólico da curcumina



Fonte: Oliveira *et al.* (2021).

Apesar de seu amplo potencial bioativo, a aplicação direta da curcumina é limitada por sua baixa solubilidade em água e por sua instabilidade quando exposta à luz, ao calor e ao oxigênio, fatores que comprometem sua biodisponibilidade e funcionalidade (MA *et al.*, 2021;

SONG *et al.*, 2023). Para superar essas limitações, diversas estratégias têm sido investigadas, destacando-se a encapsulação da curcumina em matrizes poliméricas naturais e sintéticas, como amido, quitosana, álcool polivinílico (PVA) e polímeros biodegradáveis. Essa abordagem melhora a estabilidade química e térmica da curcumina, aumenta sua dispersão em meios aquosos e promove uma liberação controlada, ampliando suas aplicações em embalagens ativas e inteligentes (RANADE *et al.*, 2025; TAMBAWALA *et al.*, 2022)

Além disso, a encapsulação em nanopartículas lipídicas e nanocápsulas poliméricas tem demonstrado eficácia em proteger a curcumina contra a degradação ambiental, além de aumentar suas propriedades antimicrobianas e antioxidantes quando incorporadas em filmes para embalagens alimentícias (ASSIS *et al.*, 2012; WAHAB *et al.*, 2021). Dessa forma, o uso combinado da curcumina com tecnologias modernas de encapsulação e polímeros biodegradáveis representa uma solução inovadora para a criação de embalagens sustentáveis que promovem tanto a conservação quanto o monitoramento da qualidade dos alimentos (WANG *et al.*, 2025).

3.5 Filmes biodegradáveis em embalagens alimentícias

Os filmes biodegradáveis têm sido amplamente investigados como alternativas sustentáveis às embalagens plásticas convencionais, especialmente no setor alimentício, em razão da crescente preocupação ambiental e da necessidade de reduzir a dependência de polímeros derivados do petróleo (HE *et al.*, 2025). Esses materiais são obtidos a partir de biopolímeros naturais renováveis, como polissacarídeos, proteínas e lipídeos, e apresentam a capacidade de se degradar biologicamente após o uso, contribuindo para a redução de resíduos sólidos, a mitigação de impactos ambientais e o fortalecimento dos princípios da economia circular. Além do aspecto ambiental, os filmes biodegradáveis oferecem vantagens tecnológicas relevantes, como segurança alimentar, atoxicidade, compatibilidade com alimentos e potencial para aplicações funcionais, atendendo às exigências atuais da indústria de alimentos (ROCHA *et al.*, 2018).

Entre os biopolímeros mais utilizados, os polissacarídeos, em especial o amido, destacam-se pela ampla disponibilidade, baixo custo e versatilidade. Filmes à base de amido apresentam boa transparência e propriedades de barreira ao oxigênio, sendo adequados para aplicações em embalagens flexíveis. No entanto, limitações como elevada sensibilidade à umidade e resistência mecânica inferior aos polímeros sintéticos exigem estratégias de modificação da matriz polimérica. Nesse contexto, a literatura destaca a formação de *blendas* poliméricas, a incorporação de plastificantes e a associação com outros biopolímeros como

abordagens eficazes para melhorar o desempenho estrutural e funcional desses materiais (DÍAZ-MONTES *et al.*, 2022; DIRPAN *et al.*, 2023; ROCHA *et al.*, 2018).

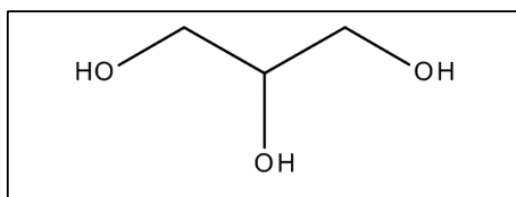
Do ponto de vista do processamento, formulações à base de amido e quitosana apresentam desafios relevantes, uma vez que são polímeros hidrofílicos de difícil solubilização, dispersão e homogeneização. A formação de matrizes uniformes frequentemente requer o uso de condições controladas de temperatura, pH e energia mecânica, sendo comuns abordagens que envolvem aquecimento assistido, agitação intensa, aplicação de cisalhamento e ultrassonicação, visando promover a desagregação estrutural, a dispersão adequada dos componentes e o aumento da interação intermolecular. Em alguns casos, também são empregadas modificações químicas ou físicas, como reticulação, acetilação ou uso de agentes compatibilizantes, com o objetivo de melhorar a estabilidade e as propriedades finais dos filmes (DÍAZ-MONTES *et al.*, 2022; WESTLAKE *et al.*, 2023).

A incorporação da quitosana em matrizes biodegradáveis representa uma estratégia particularmente relevante para embalagens alimentícias, uma vez que esse biopolímero, além de contribuir para a formação de filmes mais coesos, confere atividade antimicrobiana intrínseca, ampliando significativamente a funcionalidade do material. Estudos recentes demonstram que combinações de amido e quitosana permitem superar limitações individuais de cada polímero, resultando em materiais com propriedades ajustáveis conforme a aplicação desejada e maior potencial para substituição de plásticos convencionais em larga escala (BAGHI *et al.*, 2022; DIRPAN *et al.*, 2023).

Paralelamente, os filmes biodegradáveis têm evoluído de embalagens passivas para embalagens ativas e inteligentes, capazes de interagir com o alimento e com o ambiente. A incorporação de compostos bioativos naturais, como antioxidantes, antimicrobianos e corantes sensíveis ao pH, pode ser realizada por diferentes estratégias, incluindo incorporação direta na matriz filmogênica, encapsulação em nano ou microestruturas e imobilização superficial. Essas abordagens permitem não apenas o prolongamento da vida útil de alimentos perecíveis, mas também o monitoramento do estado de conservação, contribuindo para a redução do desperdício alimentar (ROCHA *et al.*, 2018; WESTLAKE *et al.*, 2023). Nesse cenário, a curcumina destaca-se como um composto funcional de grande interesse, devido às suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas, além de sua sensibilidade a variações de pH, permitindo aplicações como indicador visual de deterioração alimentar (WANG *et al.*, 2025).

Um aspecto crucial para o desempenho de filmes biodegradáveis à base de amido é o processo de plastificação, sendo o glicerol (Figura 10) um dos plastificantes mais amplamente empregados nesses materiais (BAGHI *et al.*, 2022; DÍAZ-MONTES *et al.*, 2022).

Figura 10 - Estrutura química do glicerol



Fonte: O autor (2026).

O glicerol é um triol de baixa massa molar, cujas hidroxilas apresentam elevada afinidade por ligações de hidrogênio, permitindo sua interação direta com os grupos hidroxila das cadeias de amilose e amilopectina. Essa interação promove o afastamento das cadeias poliméricas, aumentando o volume livre da matriz e reduzindo a temperatura de transição vítrea, resultando na formação de filmes com elevada flexibilidade (BALLESTEROS-MARTÍNEZ *et al.*, 2020; SOUZA, 2011). Entretanto, devido ao seu caráter altamente hidrofílico, a incorporação de glicerol tende a aumentar a absorção de umidade, o que pode levar à redução da resistência à tração, ao mesmo tempo em que favorece o aumento da elongação na ruptura (SOUZA, 2011). Assim, a concentração de glicerol exerce papel determinante no equilíbrio entre flexibilidade mecânica e estabilidade hídrica dos filmes amiláceos (DIAS *et al.*, 2024). Estudos mostram que, ao utilizar amido de mandioca ou batata em misturas poliméricas com glicerol como plastificante, obtém-se desempenho superior em relação ao uso exclusivo de amido de milho (SANTHOSH *et al.*, 2024; FRIEDRICHSEN *et al.*, 2022).

Além disso, considerando a aplicação em alimentos, a seleção de plastificantes e aditivos deve atender a critérios rigorosos de segurança, incluindo baixa toxicidade, ausência de migração indesejada e conformidade com regulamentações sanitárias. Nesse sentido, plastificantes naturais, como glicerol e sorbitol, são amplamente preferidos, embora apresentem limitações relacionadas à higroscopicidade, o que reforça a necessidade de estratégias de otimização da formulação (RHIM; NG, 2007; SIRACUSA *et al.*, 2008; SOUZA, 2011).

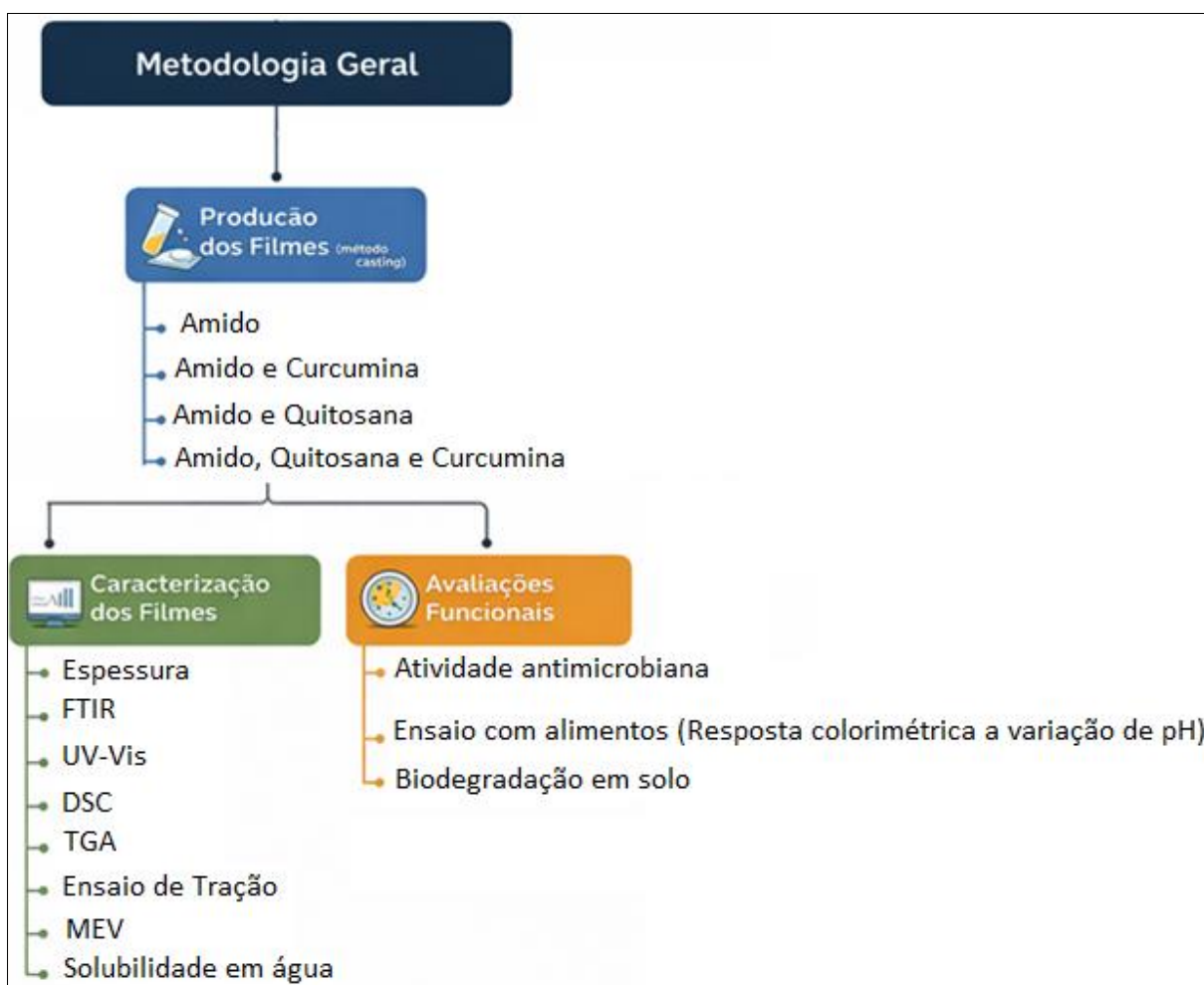
Apesar dos avanços, ainda existem desafios importantes na área. A literatura aponta limitações relacionadas à estabilidade em ambientes úmidos, à compatibilidade entre componentes, à dispersão homogênea de compostos bioativos e à reprodutibilidade dos processos em escala industrial. Além disso, há lacunas no entendimento das interações moleculares em formulações multicomponentes, especialmente quando combinam polímeros naturais e compostos funcionais com diferentes polaridades e estruturas químicas (AVÉROUS; HALLEY, 2009; DÍAZ-MONTES *et al.*, 2022; WESTLAKE *et al.*, 2023).

Em síntese, a pesquisa em embalagens biodegradáveis integra princípios da sustentabilidade, inovação tecnológica e segurança alimentar, despertando interesse crescente tanto da indústria quanto do consumidor consciente. A integração racional de plastificantes naturais, associada à incorporação de aditivos bioativos e ao uso de técnicas avançadas de processamento, posiciona filmes à base de amido, quitosana e celulose como candidatos viáveis para substituir, em larga escala, os plásticos convencionais em aplicações de embalagem seguras, funcionais e ecologicamente corretas (BAGHI *et al.*, 2022; DÍAZ-MONTES *et al.*, 2022; WESTLAKE *et al.*, 2023).

4 METODOLOGIA

A metodologia foi baseada nos trabalhos encontrados na literatura sobre desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis à base de amido. A Figura 11 apresenta o fluxograma com o resumo das atividades experimentais realizadas ao longo do projeto.

Figura 11 - Fluxograma da metodologia experimental para obtenção e caracterização dos filmes



Fonte: O autor (2026)

4.1 Reagentes e insumos

A produção e a caracterização dos filmes biodegradáveis foram realizadas empregando reagentes de grau analítico, visando maior controle experimental, reprodutibilidade e padronização das formulações (PEI *et al.*, 2024). Os reagentes e insumos foram selecionados de acordo com a função específica desempenhada tanto na síntese quanto nas etapas de caracterização dos filmes, conforme descrito a seguir e apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Reagentes e insumos utilizados na produção e caracterização dos biofilmes

Reagente/insumo	Marca	Pureza	Lote
Ácido Acético Glacial	Neon	99,8% P.A.	17966
Ácido Clorídrico	Êxodo Científica	37% P.A	AC09783RA
Ágar Mueller–Hinton	Microgen	-	711118
Água destilada	-	Destilada	-
Alcool	-	70%	-
Amido Solúvel	Anidrol	P.A.	76.010-1
Ampicilina AMP 02	DME	-	3020AMPE
Bacitracina 0,04 UI BAC	DME	-	2934BACID
Caldo nutriente	Himedia	-	81980
Camarão		-	
<i>Candida albicans</i>	ATCC	-	10231
Ceftriaxona CRO 30	DME	-	2962CRO
Curcumina	Neon	P.A.	62650
<i>Escherichia coli</i>	ATCC	-	25922
Etanol	PROC9	99,7% P.A	2409357
Glicerol	Química Moderna	P.A.	15760
Hidróxido de Amônio	Êxodo Científica	28-30% P.A ACS	HA09815RA
Morango	-	-	-
Optoquina OPT 5 mcg	DME	-	2998OPT
Padrão de turbidez McFarland 0,5	-	-	-
Piperacilina/Tazobactam PIT 30/6	DME	-	2990PITE
Presunto	Sadia	-	L4T 291201
Quitosana	Sigma Aldrich	P.A	BCCM7705
<i>Staphylococcus aureus</i>	ATCC	-	25923
Terra Vegetal	Terral	-	09

Fonte: O autor (2026)

4.2 Equipamentos

A síntese, o processamento e a caracterização dos filmes biodegradáveis desenvolvidos neste estudo foram conduzidos com o auxílio de equipamentos laboratoriais adequados a cada etapa experimental, visando assegurar controle das condições operacionais, confiabilidade dos resultados e reprodutibilidade das análises. Os equipamentos foram selecionados de acordo com sua aplicação específica na preparação das soluções filmogênicas, obtenção dos filmes e

realização das caracterizações físico-químicas, térmicas, mecânicas, morfológicas e microbiológicas, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3- Equipamentos utilizados na produção e caracterização dos filmes

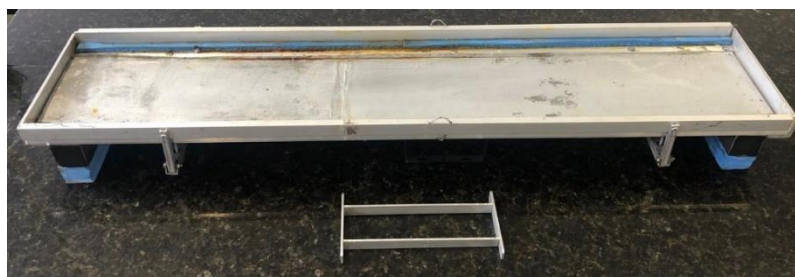
Equipamento	Marca	Modelo
Agitador magnético	Fisatom	752
Agitador mecânico	Fisatom	713D
Autoclave vertical analógica	Prismatec	CS 18
Balança semi-analítica	Marte Científica	AD500
Calorímetro de Varredura Diferencial	Shimadzu	DSC-60
Capela de fluxo laminar vertical de bancada	SPlabor	SP-1890/4-V
Chapa aquecedora redonda	Quimis	Q261-22
Espectrômetro de FTIR	Shimadzu	Espectrômetro IR Prestige 21
Espectrômetro de UV-VIS	Shimadzu	UV-2600 Series
Estufa de Esterilização e secagem digital microprocessada com circulação e renovação de ar forçada	Vulcan	EESCRA-150D
Estufa incubadora bacteriológica	SolidSteel	SSB-64L
Incubadora <i>shaker</i> com agitação orbital	Limatec	LT600/1
Máquina universal de ensaio de tração	Shimadzu	AGS-10kNV
Microscópio Eletrônico de Varredura	Hitachi	TM4000Plus
Módulo de Termogravimetria	Shimadzu	DTG-60
Paquímetro digital suíço	Fowler	Ultra Cal VI
pHmetro digital	Del Lab	DL-PH
Ultrassom	Cristófoli	16784

Fonte: O autor (2026).

4.3 Desenvolvimento dos filmes

A produção dos filmes biodegradáveis foi realizada com base no método de *casting*, porém, diferentemente do procedimento convencional, a dispersão da solução ocorreu sobre placas de vidro (20 x 20 cm), com o auxílio de um espalhador de cromatografia em camada delgada (CCD), como mostra a Figura 12, garantindo uniformidade na espessura.

Figura 12- Suporte e espalhador de cromatografia em camada delgada



Fonte: O autor (2026)

O preparo das formulações filmogênicas foi realizado com base na metodologia proposta por Barnabé (2020) e Schaefer (2018), com adaptações experimentais. Para fins de padronização, utilizou-se uma formulação base de amido, mantendo-se constantes as quantidades de amido, água e plastificante em todas as formulações. As variações entre as formulações ocorreram exclusivamente pela adição de quitosana e/ou curcumina. A formulação composta por amido, quitosana e curcumina constituiu o foco principal deste trabalho por reunir as propriedades filmogênicas do amido, o potencial antimicrobiano da quitosana e as propriedades funcionais da curcumina. Além disso, a presença da quitosana contribui para o aprimoramento estrutural do filme, favorecendo a incorporação do composto bioativo e a potencialização do efeito antimicrobiano. As demais formulações foram produzidas apenas para fins comparativos, com o objetivo de avaliar o efeito isolado da incorporação desses componentes na matriz polimérica.

As formulações foram padronizadas considerando 15 g de amido como matriz polimérica principal. A composição de cada formulação está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição quantitativa das formulações filmogênicas à base de amido

Formulação	Amido (g)	Água (mL)	Glicerol (mL)	Quitosana (g)	Curcumina (g)	Solução de ácido acético (mL)
Amido				–	–	18,00 (4% v/v)
Amido e Curcumina				–	0,132	18,00 (4% v/v)
Amido e Quitosana	15,000	120,00	12,00	2,502	–	63,00 (2% v/v)
Amido, Curcumina e Quitosana				2,502	0,132	63,00 (2% v/v)

Fonte: O autor (2026)

4.3.1 Amido

A formulação constituída exclusivamente por amido foi preparada pela adição inicial do polímero à água destilada, sob agitação mecânica constante, até a obtenção de uma mistura homogênea. Em seguida, o glicerol foi incorporado, atuando como plastificante da matriz polimérica. Após a completa homogeneização, adicionou-se a solução aquosa de ácido acético a 4% (v/v), promovendo a acidificação do meio, condição necessária para a estabilidade da formulação e para a formação da matriz filmogênica.

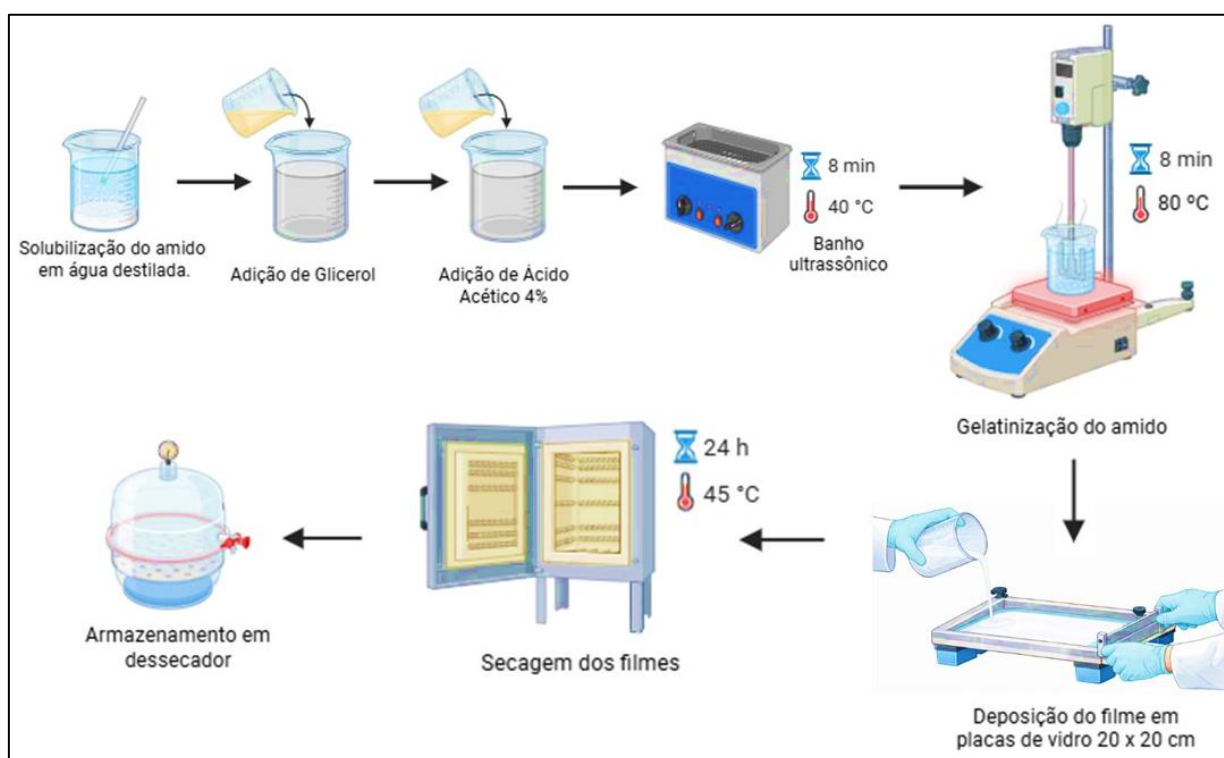
A mistura obtida foi submetida a tratamento em banho ultrassônico a 40 °C por 8 min, com a finalidade de favorecer a distribuição das partículas de amido no meio aquoso e minimizar a formação de aglomerados. Em seguida, a dispersão foi transferida para uma chapa

aquecedora e mantido a 80 °C por 8 min, etapa responsável pela gelatinização do amido e pela consolidação da matriz filmogênica.

Após a gelatinização, a solução filmogênica foi vertida sobre placas de vidro com dimensões de 20 × 20 cm e espalhada com auxílio de um espalhador de cromatografia em camada delgada, assegurando a formação de uma camada uniforme. A secagem dos filmes foi realizada em estufa com circulação de ar a 45 °C por 24 h. Concluída essa etapa, os filmes foram cuidadosamente armazenados em dessecadores até a realização das análises de caracterização.

A Figura 13 apresenta, de forma esquemática e sequencial, o procedimento experimental de obtenção do filme de amido, desde o preparo da solução filmogênica até o armazenamento do material final.

Figura 13- Esquema do procedimento de obtenção do filme de amido



Fonte: O autor (2026)

4.3.2 Amido e Curcumina

Para a obtenção dos filmes de amido incorporados com curcumina, o amido foi inicialmente adicionado à água destilada sob agitação mecânica constante, até a obtenção de uma mistura homogênea. Em seguida, o glicerol foi incorporado, atuando como plastificante da matriz polimérica, mantendo-se a agitação até completa homogeneização.

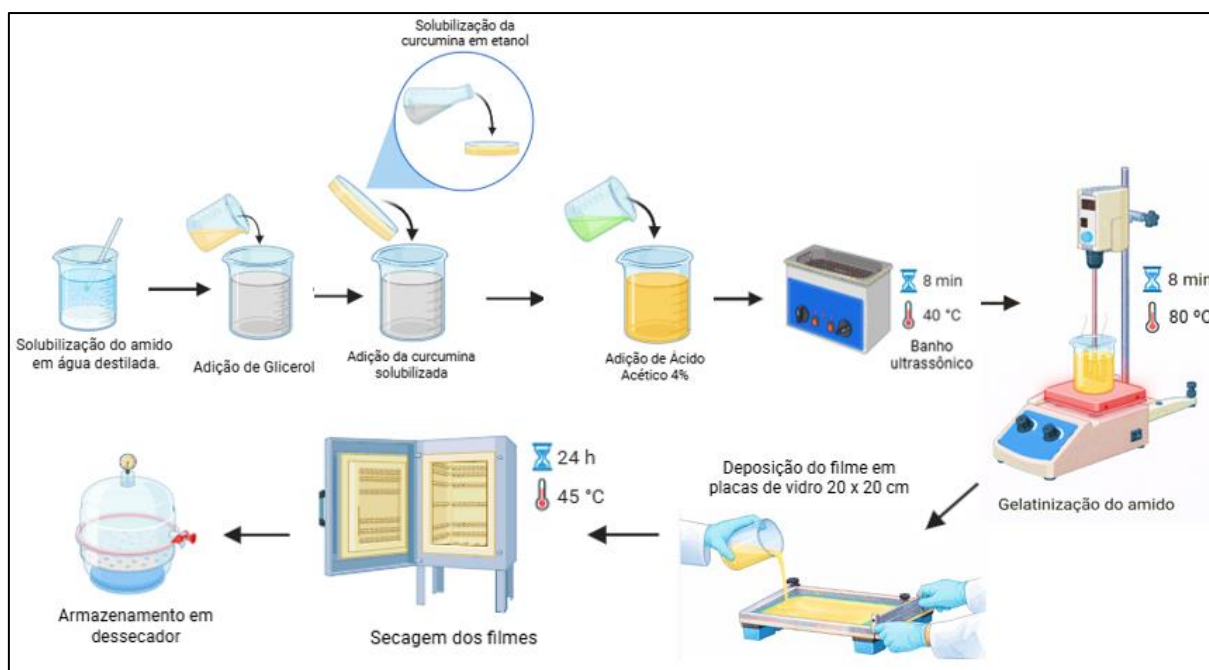
Posteriormente, a curcumina foi previamente solubilizada em etanol, utilizando-se o menor volume possível apenas para favorecer sua dissolução, sendo então adicionada à dispersão de amido e glicerol antes do tratamento em banho ultrassônico. Após a incorporação do composto bioativo, procedeu-se à adição da solução aquosa de ácido acético a 4% (v/v), promovendo a acidificação do meio, condição necessária para a estabilidade da formulação e para a formação da matriz filmogênica.

A dispersão resultante foi submetida a tratamento em banho ultrassônico a 40 °C por 8 min, com a finalidade de assegurar a distribuição homogênea da curcumina na matriz polimérica e minimizar a formação de aglomerados. Em seguida, a dispersão foi aquecida a 80 °C por 8 min, promovendo a gelatinização do amido e a consolidação da matriz filmogênica.

A solução filmogênica obtida foi vertida sobre placas de vidro com dimensões de 20 × 20 cm e espalhada de maneira uniforme. A secagem foi realizada em estufa com circulação de ar a 45 °C por 24 h. Após a secagem, os filmes foram cuidadosamente armazenados em dessecadores até a realização das análises de caracterização.

A Figura 14 apresenta, de forma esquemática e sequencial, o procedimento experimental de obtenção do filme de amido e curcumina, desde o preparo da solução filmogênica até o armazenamento do material final.

Figura 14- Esquema do procedimento de obtenção do filme de amido e curcumina



Fonte: O autor (2026)

4.3.3 Amido e Quitosana

Para a preparação dos filmes constituídos por amido e quitosana, a quitosana foi inicialmente solubilizada em solução aquosa de ácido acético a 2% (v/v), sob agitação magnética contínua, por um período de 24 h, até a completa dissolução do polímero.

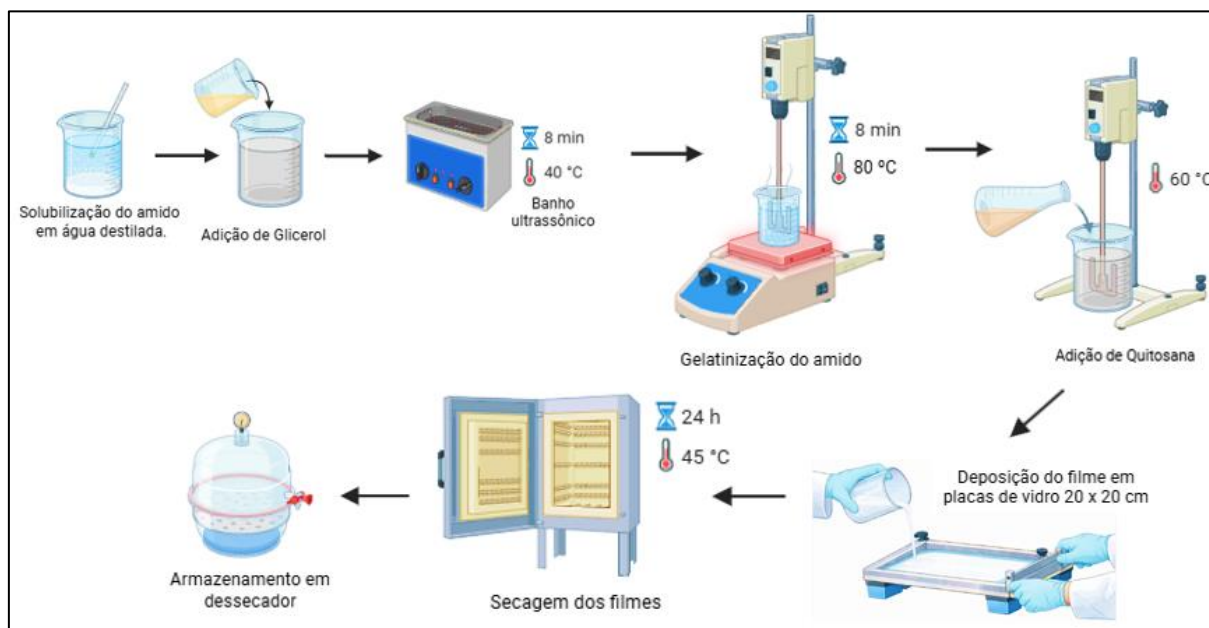
Posteriormente, o amido foi adicionado à água destilada sob agitação mecânica constante, até a obtenção de uma mistura homogênea. Em seguida, o glicerol foi incorporado à matriz polimérica, atuando como plastificante, mantendo-se a agitação até completa homogeneização. A dispersão foi então submetida a tratamento em banho ultrassônico a 40 °C por 8 min, sem adição da solução de ácido acético a 4% (v/v), uma vez que o meio ácido já se encontrava presente na solução de quitosana.

Após isso, a dispersão foi aquecida a 80 °C por 8 min, promovendo a gelatinização do amido. Depois dessa etapa, a matriz plastificada foi retirada do aquecimento e mantida sob agitação até atingir aproximadamente 60 °C, temperatura na qual a solução de quitosana foi adicionada gradualmente.

A solução filmogênica obtida foi vertida sobre placas de vidro com dimensões de 20 × 20 cm, espalhada de maneira uniforme e submetida à secagem em estufa com circulação de ar a 45 °C por 24 h. Após a secagem, os filmes foram armazenados em dessecadores até a realização das análises de caracterização.

A Figura 15 apresenta, de forma esquemática e sequencial, o procedimento experimental de obtenção do filme de amido e quitosana, desde o preparo da solução filmogênica até o armazenamento do material final.

Figura 15- Esquema do procedimento de obtenção do filme de amido e quitosana



Fonte: O autor (2026)

4.3.4 Amido, Curcumina e Quitosana

A formulação foco deste trabalho, composta por amido, curcumina e quitosana, foi preparada de modo a assegurar a incorporação sequencial e controlada de seus constituintes. Inicialmente, o amido foi adicionado à água destilada sob agitação mecânica constante, até a obtenção de uma mistura homogênea. Em seguida, o glicerol foi incorporado à matriz polimérica, atuando como plastificante.

Posteriormente, a curcumina foi previamente solubilizada em etanol, utilizando-se o menor volume possível apenas para favorecer sua dissolução, sendo então adicionada à dispersão de amido e glicerol antes do tratamento em banho ultrassônico, seguindo o mesmo procedimento adotado para as demais formulações contendo o composto bioativo.

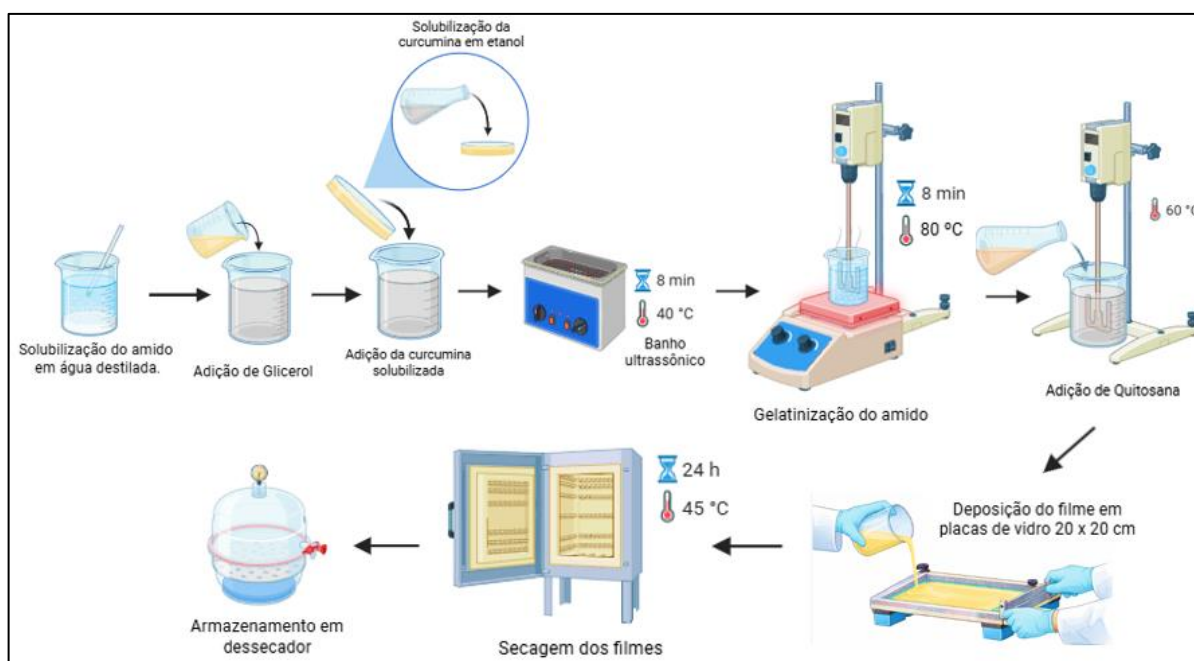
A dispersão foi submetida a tratamento em banho ultrassônico a 40 °C por 8 min, sem adição direta da solução de ácido acético a 4% (v/v), uma vez que o meio ácido já se encontrava presente na solução de quitosana adicionada posteriormente. Em seguida, a matriz plastificada foi aquecida a 80 °C por 8 min, promovendo a gelatinização do amido.

Após essa etapa, a dispersão foi retirada do aquecimento e mantida sob agitação até atingir aproximadamente 60 °C, temperatura na qual a solução de quitosana, previamente solubilizada em solução aquosa de ácido acético a 2% (v/v) por 24 h sob agitação magnética contínua, foi adicionada gradualmente, promovendo a completa homogeneização da formulação.

A solução filmogênica final foi vertida sobre placas de vidro com dimensões de 20 × 20 cm, espalhada com auxílio de um espalhador de cromatografia em camada delgada e submetida à secagem em estufa com circulação de ar a 45 °C por 24 h. Após a secagem, os filmes foram cuidadosamente armazenados em dessecadores até a realização das análises de caracterização.

A Figura 16 apresenta, de forma esquemática e sequencial, o procedimento experimental de obtenção do filme de amido e quitosana, desde o preparo da solução filmogênica até o armazenamento do material final.

Figura 16- Esquema do procedimento de obtenção do filme de amido, curcumina e quitosana



Fonte: O autor (2026)

4.4 Caracterização dos Filmes

Os filmes produzidos foram submetidos a uma série de análises físico-químicas e funcionais, visando avaliar sua aplicabilidade como embalagem para alimentos.

4.4.1 Espessura

A espessura dos filmes foi determinada por meio de paquímetro digital, com escala de 0 a 8"/200 mm. As medições foram realizadas em cinco pontos distintos e equidistantes de cada amostra de filme, a fim de minimizar possíveis variações locais de espessura. O valor final da espessura foi expresso como a média aritmética das medidas obtidas para cada amostra.

4.4.2 Calorimetria exploratória diferencial

A análise térmica dos filmes foi realizada por meio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC, do inglês *Differential Scanning Calorimetry*), com o objetivo de avaliar as transições térmicas dos materiais e investigar possíveis interações entre os componentes da matriz polimérica e o aditivo funcional (PEREIRA, 2011).

As amostras foram submetidas a um programa de aquecimento com taxa de 10 °C min⁻¹, na faixa de 25 a 300 °C, sob atmosfera controlada de nitrogênio (fluxo de aproximadamente 50 mL min⁻¹), a fim de evitar oxidação durante o processo de análise (MANIGLIA, 2017).

4.4.3 Termogravimetria

A análise térmica dos filmes foi realizada por meio de Termogravimetria (TG), com o objetivo de avaliar a estabilidade térmica e os padrões de decomposição dos materiais (FERREIRA, 2019).

As medições foram realizadas em um analisador termogravimétrico sob atmosfera de nitrogênio, com fluxo controlado de 50 mL min⁻¹, a fim de evitar reações oxidativas durante o aquecimento. O programa de aquecimento foi estabelecido de 25 °C a 800 °C, com uma taxa de aquecimento constante de 10 °C min⁻¹ (SANYANG *et al.*, 2015).

Os dados de perda de massa em função da temperatura foram registrados continuamente, permitindo a identificação das etapas de degradação térmica dos filmes.

4.4.4 Solubilidade em água

A solubilidade dos filmes foi determinada de acordo com o método descrito por Araújo (2018), com adaptações realizadas para atender às especificidades do presente estudo. Amostras circulares de 2 cm de diâmetro de cada filme foram recortados e secos em estufa a 105 °C por 15 min, para determinação da massa seca inicial. Em seguida, as amostras foram pesadas e imersas em 50 mL de água destilada, permanecendo sob agitação lenta e periódica (100 rpm), à temperatura de 25 °C por 24 h em uma incubadora *shaker*. Após esse período, os discos foram novamente secos em estufa a 105 °C por 15 min, para a determinação da massa seca final. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

O percentual de solubilidade foi calculado segundo a equação (1):

$$\text{Solubilidade}(\%) = \frac{\text{massa inicial (g)} - \text{massa final (g)}}{\text{massa inicial (g)}} \times 100 \quad (1)$$

4.4.5 Espectroscopia na região do infravermelho

A caracterização espectroscópica dos filmes foi realizada por meio de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR, do inglês *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), com o intuito de identificar os grupos funcionais presentes nos materiais e avaliar possíveis interações moleculares entre o amido, a quitosana e a curcumina (MANIGLIA, 2017).

As amostras foram analisadas diretamente no estado sólido por meio de um espectrômetro FTIR acoplado a refletância total atenuada (ATR, do inglês *Attenuated Total Reflectance*), eliminando etapas de preparo, consumo de solventes e geração de resíduos, o que caracteriza o método como uma técnica analítica verde. Pequenos fragmentos dos filmes foram posicionados diretamente sobre o cristal de ATR, com aplicação de pressão suficiente para garantir bom contato entre a amostra e o cristal. Os espectros foram adquiridos na faixa de varredura de 4000 a 400 cm^{-1} com resolução de 2 cm^{-1} e 52 varreduras por espectro (PÉREZ-VERGARA *et al.*, 2020).

4.4.6 Espectroscopia na região do ultravioleta para sólidos

A espectroscopia no ultravioleta-visível (UV-Vis) em estado sólido foi realizada em um espectrofotômetro acoplado a acessório de refletância difusa (DRS, do inglês *Diffuse Reflectance*), técnica adequada para a análise de amostras sólidas, opacas ou em pó e que dispensa preparo úmido e o uso de solventes, caracterizando-se como uma abordagem analítica verde. Os espectros foram adquiridos na faixa espectral de 220 a 900 nm, com intervalo de dados de 1,0 nm, velocidade de varredura elevada e largura de fenda de 5,0 nm, sendo registrados no modo de refletância, sem aplicação de correções ou pós-processamento espectral. As medições foram conduzidas utilizando unidade de detecção externa com dois detectores, com comutação da fonte de luz em 323 nm e do detector em 870 nm, adotando-se o modo padrão de relação sinal/ruído. As amostras foram fixadas diretamente na base do acessório de refletância, assegurando boa uniformidade superficial e adequado contato com o feixe de luz incidente (MALAFATTI *et al.*, 2023; STEINER., 2015).

Os espectros obtidos foram analisados quanto à presença de bandas de absorção características da curcumina, especialmente na região entre 300 e 500 nm (OLIVEIRA *et al.*, 2020), bem como quanto a possíveis deslocamentos de banda ou variações na intensidade de absorção, indicativos de interações intermoleculares entre a curcumina, a quitosana e a matriz amilácea.

A partir dos espectros de UV-VIS pode-se calcular a opacidade dos filmes analisados. A opacidade de um filme é calculada a partir da absorbância na região visível, geralmente a 600 nm, dividida pela espessura do filme (em mm), como na equação (2) (BISPO, 2024; LUCENA *et al.*, 2017; SALES *et al.*, 2021).

$$\text{Opacidade} = \frac{A_{600}}{e} \quad (2)$$

Onde:

A_{600} = Absorbância a 600 nm

e = Espessura do filme (em mm)

Unidade: Abs/mm

4.4.7 Ensaio de Tração

A avaliação das propriedades mecânicas dos filmes foi realizada por meio de ensaios de tração uniaxial, com o objetivo de determinar parâmetros como resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade.

Os corpos de prova foram recortados em formato retangular, com dimensões padronizadas em torno de 2 cm de largura e 20 cm de comprimento.

Os testes foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios equipada com célula de carga de 10 kN. A velocidade de ensaio foi fixada em 5 mm/min de acordo com a norma ASTM D638. Durante o ensaio, os valores de força (N) e deslocamento (mm) foram continuamente registrados por meio do software de aquisição de dados do equipamento.

A resistência à tração (MPa) foi calculada pela razão entre a força máxima suportada e a área da seção transversal da amostra. O alongamento na ruptura (%) foi obtido pela variação percentual do comprimento da amostra até o ponto de ruptura, enquanto o módulo de elasticidade (MPa) foi determinado a partir da inclinação da região linear inicial da curva tensão-deformação.

Os dados obtidos permitiram avaliar o impacto da incorporação de cúrcuma nas propriedades mecânicas dos filmes, bem como identificar eventuais alterações associadas a variações na espessura do material. Os resultados foram analisados estatisticamente, com replicatas mínimas de três amostras por tratamento, a fim de garantir a reprodutibilidade e confiabilidade dos dados.

4.4.8 Microscopia eletrônica de varredura

A caracterização morfológica dos filmes foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com base no método descrito por Galindo *et al.* (2019), com adaptações. A análise teve como objetivo avaliar a morfologia superficial dos filmes obtidos, bem como analisar o amido utilizado como matéria-prima, a fim de identificar características morfológicas associadas à sua fonte de origem.

As amostras dos filmes foram preparadas por recorte manual em fragmentos de pequenas dimensões, utilizando uma espátula, de modo a possibilitar a análise da superfície dos materiais. Os fragmentos foram fixados diretamente em *stubs* metálicos próprios para MEV, com auxílio de fita adesiva de carbono, assegurando adequada fixação e contato elétrico entre a amostra e o suporte.

As micrografias foram obtidas em microscópio eletrônico de varredura, operando em modo de elétrons secundários, com tensão de aceleração de 15 kV e distância de trabalho em torno de 10 mm. As imagens dos filmes foram adquiridas em ampliações da ordem de 200 a 250×.

O amido utilizado como matéria-prima foi igualmente analisado por MEV, após fixação direta em fita de carbono sobre *stub* metálico, sendo as imagens registradas em ampliação compatível com a visualização dos grânulos de amido (500×). A análise morfológica do amido permitiu identificar características típicas de sua fonte botânica.

4.4.9 Ensaio de difusão em ágar

A atividade antimicrobiana dos filmes biodegradáveis foi avaliada frente a microrganismos representativos de bactérias Gram-positivas, Gram-negativas e leveduras, utilizando o método de difusão em ágar, baseado no ensaio de Kirby–Bauer, com adaptações para amostras em forma de filme (BAUER *et al.*, 1966; BARBOSA; ZANIN, 2010; GALINDO *et al.*, 2019; HUDZICKI, 2009).

Foram empregadas cepas de *Staphylococcus aureus* (Gram-positiva), *Escherichia coli* (Gram-negativa) e *Candida albicans* (levedura). Como meio de cultura sólido, utilizou-se o ágar Mueller–Hinton, preparado de acordo com as instruções do fabricante. O meio foi esterilizado em autoclave a 121 °C por 15 min e distribuído em placas de Petri estéreis (aproximadamente 20 mL por placa), as quais foram mantidas sob capela até completa solidificação.

As culturas microbianas foram obtidas a partir de crescimento prévio em caldo nutriente, incubado a 37 °C por 24 h. Em seguida, a suspensão microbiana foi homogeneizada e ajustada à turbidez equivalente ao padrão McFarland 0,5, por comparação visual. Quando necessário, o inóculo foi diluído em água peptonada a 0,1% ou concentrado por adição de cultura, de modo a assegurar a padronização entre os ensaios.

Os filmes foram recortados em amostras circulares com diâmetro padronizado de 15 mm, esterilizadas sob radiação ultravioleta por 15 min em capela de fluxo laminar e mantidas em recipientes estéreis até o momento do ensaio.

Procedeu-se à distribuição de alíquotas de 0,1 mL da suspensão microbiana sobre a superfície do ágar Mueller–Hinton. O inóculo foi espalhado de forma homogênea com auxílio de alça de Drigalsky, realizando-se movimentos em três direções perpendiculares. Após a semeadura, as placas foram mantidas em repouso por 3 a 5 min, a fim de permitir a secagem superficial do meio.

As amostras circulares dos filmes foram posicionadas sobre o meio de cultura com auxílio de pinça previamente esterilizada por flambagem e resfriada, mantendo-se distância adequada entre elas e aproximadamente 1 cm da borda da placa, de modo a assegurar contato íntimo com a superfície do ágar.

Como controles positivos, foram utilizados discos comerciais de antibióticos, aplicados nas mesmas condições experimentais das amostras de filme: ampicilina (AMP 02), bacitracina (BAC, 0,04 UI), ceftriaxona (CRO 30), optoquina (OPT 5 µg) e piperacilina/tazobactam (PIT 30/6). A formação de halo de inibição ao redor desses discos foi utilizada para validação do ensaio e para verificação da sensibilidade dos microrganismos testados.

As placas foram incubadas em posição invertida a 37 °C por 24 h. Após o período de incubação, os halos de inibição formados ao redor das amostras de filme e dos controles foram avaliados. Os diâmetros dos halos foram medidos com régua milimetrada e os resultados expressos como média $\pm$ desvio-padrão. A presença de halo foi interpretada como atividade antimicrobiana positiva, enquanto a ausência indicou atividade não detectável nas condições do ensaio. Todos os procedimentos foram conduzidos sob condições assépticas, e os ensaios foram realizados em triplicata.

4.4.10 Ensaio de degradação em solo

A biodegradabilidade dos filmes foi avaliada por meio de ensaio de exposição ao solo, método amplamente empregado para simular condições naturais de degradação, no qual o material permanece em contato direto com o solo e com sua microbiota (MARAN *et al.*, 2014).

O procedimento foi conduzido com adaptações dos métodos de Vargas (2022), Chagas *et al.* (2024) e Santos *et al.* (2022), este último baseado na ABNT NBR 14283:2016, com o objetivo de reproduzir, em condições controladas, o processo natural de biodegradação. O solo utilizado como meio de degradação consistiu em um substrato de terra vegetal comercial. O ensaio foi realizado em recipientes individuais contendo o solo, mantidos à temperatura ambiente e protegidos da incidência direta de luz, de modo a minimizar interferências externas ao longo do período experimental.

Os corpos de prova dos filmes foram cortados com área superficial de 3 cm² e pesados em balança analítica para a determinação da massa inicial, sendo, em seguida, submetidos ao ensaio de biodegradação em solo. A montagem experimental foi realizada em camadas, na seguinte sequência: uma camada de solo (10 g), a amostra do filme e outra camada de solo (10 g), assegurando o completo recobrimento do material.

A umidade do sistema foi mantida constante por meio de umedecimento diário com 6 mL de água destilada. As amostras em contato com o solo foram protegidas com uma tela plástica, com o objetivo de facilitar a recuperação posterior para as etapas de pesagem, sem comprometer a interação do material com o solo, como mostra a Figura 17.

Figura 17- Filme na tela plástica antes de ser enterrado



Fonte: O autor (2026)

Os corpos de prova foram removidos do solo após 30, 60 e 90 dias de exposição. Em cada intervalo, as amostras foram cuidadosamente retiradas, lavadas para a remoção de resíduos de solo aderidos e submetidas à secagem em estufa a 45 °C por 48 h, até a estabilização da massa. Posteriormente, as amostras foram novamente pesadas para a determinação da massa final.

A taxa de biodegradação foi expressa como percentual de perda de massa, calculada conforme a equação 3.

$$\text{Biodegradação \%} = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que:

W_1 = massa inicial dos filmes

W_2 = massa ao final do período

4.4.11 Avaliação qualitativa da resposta colorimétrica ao pH e da atividade antimicrobiana de filmes biodegradáveis

A avaliação qualitativa da resposta colorimétrica e do potencial antimicrobiano dos filmes biodegradáveis foi realizada com base em metodologia descrita na literatura, com adaptações (WANG *et al.*, 2024). Os ensaios foram conduzidos em duas etapas independentes: (i) avaliação da resposta colorimétrica dos filmes frente a diferentes valores de pH e (ii) avaliação do desempenho dos filmes durante o armazenamento de alimentos perecíveis.

Para a avaliação da resposta colorimétrica ao pH, amostras dos filmes de amido, amido e curcumina, amido e quitosana e amido, quitosana e curcumina foram recortadas em dimensões padronizadas e imersas individualmente em soluções aquosas com valores de pH variando de 1 a 14. As soluções de pH ácido e básico foram preparadas a partir de água destilada, por meio do ajuste gradual do pH, realizado pela adição gota a gota de ácido clorídrico e hidróxido de amônio, até a obtenção dos valores desejados, os quais foram monitorados com pHmetro previamente calibrado. As amostras permaneceram imersas por tempo suficiente para permitir a completa interação entre o filme e o meio.

As alterações de coloração dos filmes foram registradas por meio de fotografia digital, possibilitando a comparação qualitativa da sensibilidade dos materiais às variações de pH, com ênfase nos filmes contendo curcumina, em função de seu comportamento cromático dependente do pH.

A avaliação do desempenho dos filmes durante o armazenamento de alimentos perecíveis foi realizada utilizando presunto, camarão e morango, selecionados em razão de seu valor agregado e elevada suscetibilidade à deterioração. As amostras de alimentos foram acondicionadas em copos de acrílico e vedadas com os diferentes filmes produzidos. Para fins comparativos, amostras adicionais foram embaladas com filme comercial de policloreto de vinila (PVC), utilizado como controle.

As embalagens foram mantidas à temperatura ambiente por um período de 7 dias, permitindo a deterioração natural dos alimentos. Durante o armazenamento, foram realizadas observações visuais periódicas, com registro fotográfico da coloração dos filmes, especialmente

daqueles contendo curcumina, bem como do aspecto físico dos alimentos, considerando alterações como exsudação, escurecimento, mudança de textura e presença de sinais visuais de deterioração. A resposta colorimétrica dos filmes foi avaliada qualitativamente em função das mudanças observadas ao longo do tempo, associadas à liberação de metabólitos voláteis decorrentes da degradação dos alimentos.

Esse ensaio teve caráter qualitativo e comparativo, permitindo avaliar a aplicabilidade dos filmes desenvolvidos como embalagens ativas e inteligentes, bem como sua capacidade de indicar visualmente alterações associadas ao processo de deterioração de alimentos, em comparação com o plástico filme convencional.

4.4.12 Análise Estatística

Os resultados foram avaliados por meio de análise de variância (ANOVA), utilizando-se o Microsoft Excel® (Office 2019, Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Espessura

Segundo Sarantópoulos *et al.* (2002) a espessura dos filmes constitui um parâmetro fundamental para a avaliação da homogeneidade do material, uma vez que variações expressivas desse atributo podem impactar diretamente o desempenho mecânico. A Tabela 2 apresenta os valores médios de espessura ($n = 3$) determinados para todos os filmes desenvolvidos neste trabalho.

Tabela 2- Espessura média dos filmes biodegradáveis

Formulação	Espessura média (mm)
Amido	$0,22 \pm 0,02^b$
Amido e Curcumina	$0,25 \pm 0,02^a$
Amido e Quitosana	$0,19 \pm 0,02^c$
Amido, Quitosana e Curcumina	$0,18 \pm 0,01^c$

Nota: Valores expressos como média $\pm$ desvio padrão ($n = 3$). Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O autor (2026)

As diferenças entre as espessuras médias das formulações foram avaliadas inicialmente por meio de análise de variância (ANOVA) de um fator, que indicou efeito significativo das formulações sobre a espessura dos filmes ($F = 50,09$; $p = 7,26 \times 10^{-16}$). Em seguida, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Os filmes desenvolvidos apresentaram diferenças estatisticamente significativas de espessura entre as formulações, conforme indicado pela análise de variância de um fator (ANOVA, $p < 0,05$), sendo essas diferenças confirmadas pelo teste de comparações múltiplas de Tukey. O filme de amido apresentou espessura média intermediária ($0,22 \pm 0,02$ mm), enquanto as formulações contendo quitosana, com ou sem curcumina, exibiram menores valores de espessura ($0,19 \pm 0,02$ mm e $0,18 \pm 0,01$ mm, respectivamente), não diferindo estatisticamente entre si.

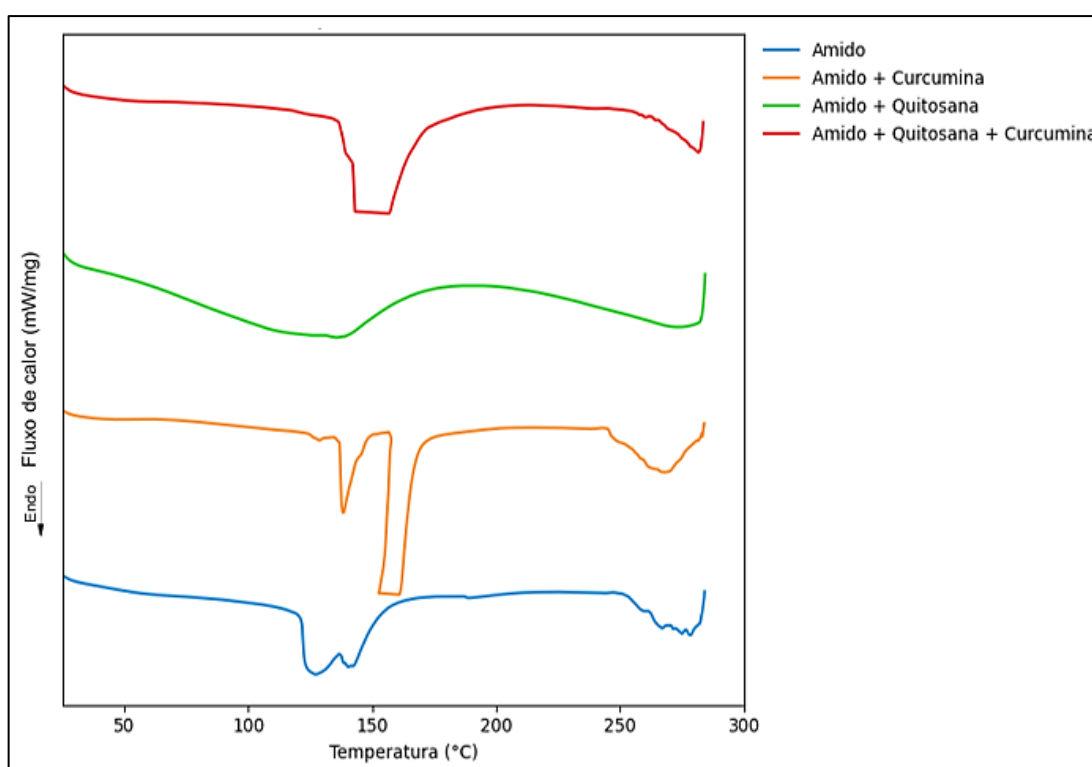
Embora diferenças de espessura tenham sido observadas entre as formulações, esse comportamento não está necessariamente associado à incorporação dos aditivos, mas provavelmente às variações ocorridas durante a etapa de espalhamento da solução filmogênica sobre as placas de vidro. Pequenas diferenças na distribuição do volume e na uniformidade do espalhamento podem resultar em variações locais de espessura, mesmo quando se utilizam as mesmas condições de secagem e composição global da solução. Esse efeito é amplamente reconhecido na literatura como uma das principais fontes de variação em filmes obtidos pelo método de *casting* (SILVA; LAPA; SALES, 2019; SOBRAL, 2000).

Ao comparar os resultados obtidos com dados da literatura, observa-se que as espessuras determinadas neste estudo são superiores às geralmente reportadas para filmes de amido de mandioca, que variam tipicamente entre 0,10 e 0,14 mm, conforme descrito por estudos da Embrapa, o que indica que o processo de formação do filme, especialmente a etapa de espalhamento sobre a placa de vidro, exerce papel determinante na espessura final do material (LIMA *et al.*, 2021).

5.2 Calorimetria Exploratória Diferencial

A Figura 18 apresenta os termogramas de DSC obtidos durante o aquecimento dos filmes à base de amido na faixa de 25 a 300 °C.

Figura 18- Termogramas de DSC dos filmes à base de amido



Fonte: O autor (2026)

De modo geral, todas as curvas apresentam eventos endotérmicos amplos em faixas de temperatura intermediárias, característicos de matrizes poliméricas hidrofílicas. Esses eventos são comumente associados à remoção de água associada à matriz polimérica, bem como a rearranjos estruturais, envolvendo a ruptura progressiva de interações intermoleculares, como ligações de hidrogênio entre as cadeias poliméricas e moléculas de água. Esse processo resulta na formação de uma endoterma alargada, em vez de picos bem definidos (ALVARADO *et al.*, 2021).

Ao analisar especificamente o filme de amido puro, observa-se um evento endotérmico amplo na faixa aproximada de 120 a 170 °C. Embora esse evento seja frequentemente atribuído à remoção de água fortemente associada às cadeias do amido (PERDOMO *et al.*, 2009), a literatura indica que o amido pode apresentar regiões cristalinas residuais, cuja fusão cristalina (associada à T_m) pode ocorrer antes do início da degradação térmica, dependendo da fonte do amido, do teor de água e do histórico de processamento.

Estudos relatam valores de T_m do amido em faixas amplas, geralmente sobrepostas à eliminação de água, o que dificulta a separação inequívoca desses fenômenos por DSC convencional (BILIADERIS, 2009; GHANBARZADEH *et al.*, 2010; SUKHIJA *et al.*, 2016). Assim, o evento observado pode corresponder à superposição de processos de desidratação e possíveis transições estruturais associadas a domínios cristalinos remanescentes (BILIADERIS, 2009).

No entanto, a ausência de um pico estreito e bem definido impede a determinação confiável de ΔH_f e, conseqüentemente, do grau de cristalinidade (X_c) por DSC (GHANBARZADEH *et al.*, 2010; SUKHIJA *et al.*, 2016). Adicionalmente, deve-se considerar que o amido pode apresentar diferentes formas cristalinas (polimorfismo), o que contribui para a sobreposição dos eventos térmicos observados (VAN SOEST; VLIEGENTHART, 1997; BULÉON *et al.*, 1998).

Com a incorporação de quitosana, observam-se alterações na forma e na posição dos eventos endotérmicos, indicando mudanças na organização da matriz (RINAUDO, 2006). Essas modificações estão associadas a interações intermoleculares específicas entre grupos hidroxila do amido e grupos amina da quitosana, que podem reduzir a mobilidade das cadeias e modificar a estabilidade térmica dos domínios estruturais (RINAUDO, 2006; DASH *et al.*, 2011). A literatura mostra que a adição de polímeros compatíveis ou agentes de reticulação pode deslocar eventos térmicos e reduzir o grau de organização estrutural aparente, uma vez que tais interações dificultam o empacotamento ordenado das cadeias poliméricas (HORN *et al.*, 2023; QIAO *et al.*, 2019).

Nesse contexto, o filme principal (amido, quitosana e curcumina) apresenta um perfil endotérmico ainda mais amplo e pouco definido, sugerindo uma matriz estruturalmente mais complexa. A presença de curcumina, além de atuar como composto funcional, pode interferir na organização da matriz polimérica e nos domínios cristalinos, favorecendo um comportamento mais amorfo (XIE *et al.*, 2021). Além disso, a literatura reporta que a curcumina apresenta temperatura de transição vítrea (T_g) na faixa de 170–180 °C (VALENTI *et al.*, 2023), valor que pode se sobrepor a eventos associados à água e à matriz polimérica, dificultando sua

identificação direta nos termogramas. Dessa forma, embora a T_g da curcumina seja descrita na literatura, sua detecção nas formulações avaliadas é limitada pela sobreposição de fenômenos térmicos e pela forte influência da água na matriz polimérica.

Adicionalmente, a presença de picos endotérmicos com formato atípico ou abrupto pode estar associada a processos térmicos mais rápidos ou a eventos cooperativos, como a liberação súbita de água confinada em microdomínios ou rearranjos estruturais abruptos da matriz polimérica. Em matrizes poliméricas heterogêneas, esse tipo de resposta tem sido associado à presença de diferentes domínios com comportamentos térmicos distintos, que se manifestam de forma não clássica no sinal de DSC (ADISSON *et al.*, 1992; GUN'KO *et al.*, 2017; KURITA *et al.*, 1999; OHNO *et al.*, 1983; TA INSTRUMENTS, 2012; WUNDERLICH, 2005).

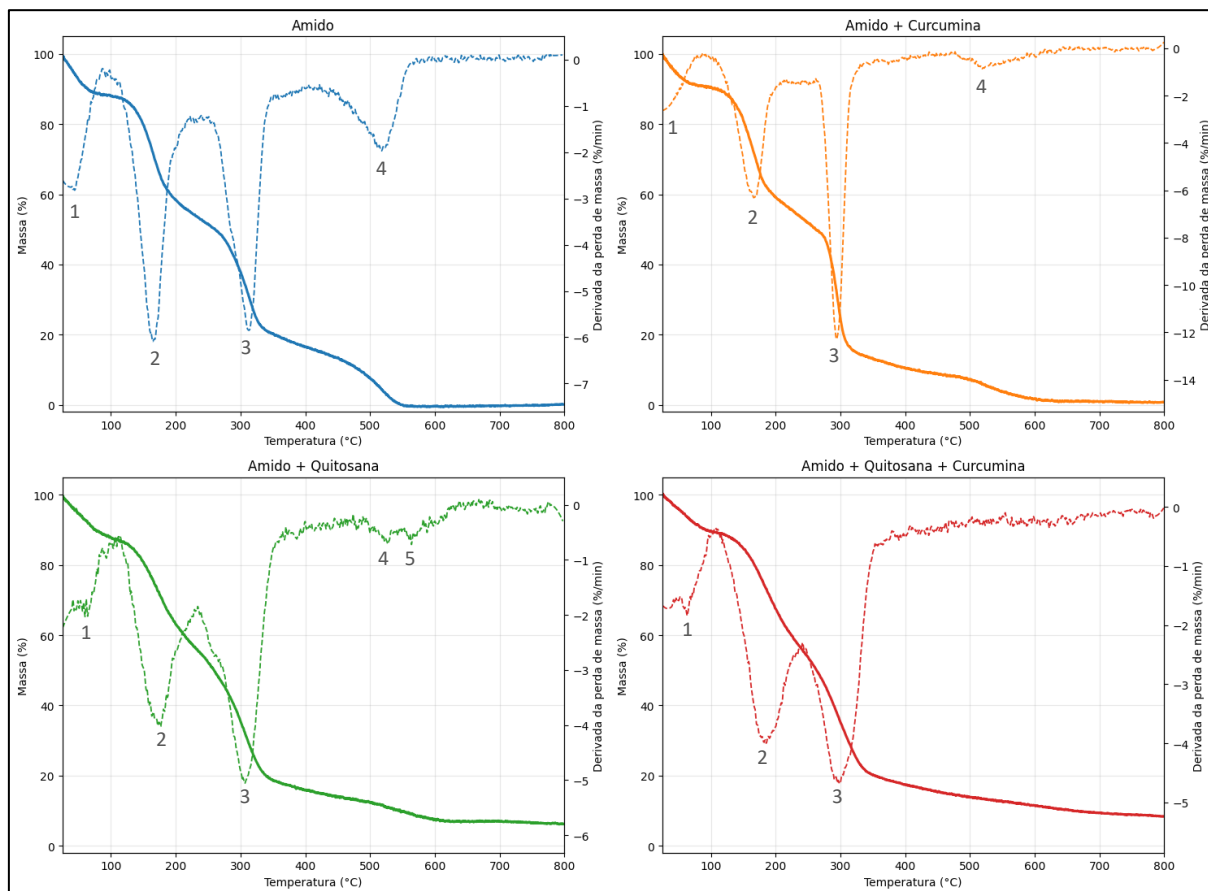
Por fim, observa-se que acima de aproximadamente 250 °C ocorre uma alteração mais intensa no sinal térmico, a qual não deve ser interpretada como fusão cristalina, mas sim como início de processos de degradação térmica da matriz polimérica. Nessa faixa de temperatura, ocorre a quebra de ligações glicosídicas do amido, desacetilação e degradação da quitosana, bem como decomposição da curcumina, processos que consomem energia e podem gerar sinais endotérmicos ou exotérmicos sobrepostos. Assim, quaisquer eventos observados nessa região são atribuídos à degradação térmica, o que inviabiliza a determinação de T_m ou X_c a partir desses dados (NATA *et al.*, 2014).

5.3 Termogravimetria

A Figura 19 apresenta as curvas termogravimétricas (TG) e suas respectivas derivadas (DTG) para os filmes à base de amido puro e para as formulações contendo curcumina, quitosana e a combinação de ambos os aditivos. A análise conjunta das curvas TG e DTG permite avaliar não apenas a estabilidade térmica global dos materiais, mas também identificar com maior precisão os eventos térmicos associados às diferentes etapas de degradação (EL-SAYED *et al.*, 2022).

A partir da análise dos perfis termogravimétricos apresentados na Figura 19, considerando as variações de perda de massa e os picos nas curvas derivadas (DTG), torna-se possível identificar as principais etapas de degradação e as temperaturas características de cada formulação, permitindo uma avaliação qualitativa inicial da estabilidade térmica dos filmes.

Figura 19- Curvas termogravimétricas (TG) e derivadas termogravimétricas (DTG) dos filmes à base de amido



Fonte: O autor (2026)

A Tabela 3 apresenta os valores quantitativos obtidos a partir das curvas TG/DTG, incluindo temperaturas dos picos de degradação térmica, percentuais de perda de massa associados a cada evento e resíduo final obtido após o término do ensaio. Dessa forma, a Tabela 3 complementa a análise gráfica, permitindo a quantificação dos eventos térmicos observados e possibilitando a comparação direta entre as diferentes formulações quanto à estabilidade térmica e ao perfil de degradação.

Tabela 3- Temperaturas dos picos de degradação térmica, perdas de massa associadas e resíduo final obtidos por análise TG/DTG dos filmes à base de amido

Pico	Temperatura do pico (°C)	Perda de massa (%)	Intervalo do evento (°C)
Amido			
1	47,54	8,57	25,00 – 55,30
2	163,08	39,48	55,30 – 245,30
3	309,07	35,64	245,30 – 403,89
4	515,20	16,14	403,89 – 800,00
Resíduo final		0,17%	
Amido e Curcumina			
1	48,76	6,00	25,00 – 50,11
2	159,58	39,22	50,11 – 245,25
3	297,71	41,39	245,25 – 398,77
4	547,68	12,76	398,77 – 800,00
Resíduo final		0,63 %	
Amido e Quitosana			
1	48,10	6,61	25,00 – 55,79
2	167,22	39,29	55,79 – 246,90
3	301,67	37,87	246,90 – 398,58
4	525,55	5,74	398,58 – 602,38
5	677,74	4,33	602,38 – 800,00
Resíduo final		6,16%	
Amido, Quitosana e Curcumina			
1	49,57	10,50	25,39 – 102,88
2	177,14	32,67	102,88 – 236,81
3	298,43	48,48	236,81 – 800,00
Resíduo final		8,35%	

Fonte: O autor (2026)

A análise termogravimétrica dos filmes evidenciou perfis distintos de degradação térmica em função da composição da matriz polimérica, permitindo avaliar o efeito isolado e combinado da curcumina e da quitosana sobre a estabilidade térmica da matriz amilácea. De forma geral, todos os filmes apresentaram múltiplos eventos de perda de massa, característicos de matrizes polissacarídicas plastificadas, associados inicialmente à eliminação de água e compostos voláteis, seguidos pela degradação da estrutura polimérica e, em temperaturas mais elevadas, pela decomposição de estruturas carbonáceas residuais (IBRAHIM *et al.*, 2019). Observou-se ainda um aumento progressivo do resíduo térmico com a incorporação dos aditivos, atingindo o maior valor para a formulação ternária, sugerindo efeito combinado entre os componentes.

Para o filme constituído apenas por amido, foram observados quatro eventos principais de degradação térmica. O primeiro pico, em 47,54 °C, com perda de massa de 8,57%, está associado principalmente à evaporação de água livre, água fracamente ligada e possíveis traços de solventes residuais. O segundo evento em 163,08 °C é responsável por perda de 39,48%, corresponde ao início da degradação térmica do amido, envolvendo ruptura de ligações glicosídicas e liberação de compostos de baixa massa molecular. O terceiro pico, em 309,07 °C, com perda de 35,64%, representa a principal etapa de degradação do esqueleto polimérico, envolvendo fragmentação térmica da matriz e formação inicial de material carbonáceo. O quarto evento, em 515,20 °C, com perda de 16,14%, está relacionado à oxidação e degradação do carbono residual formado nas etapas anteriores. O resíduo final de apenas 0,17% confirma a baixa formação de resíduo carbonáceo no amido puro (DOUMBIA; TRAORÉ, 2023; PINEDA-GOMEZ *et al.*, 2020).

No filme contendo amido e curcumina, observou-se comportamento térmico semelhante ao amido puro, porém com pequenas modificações nos percentuais de perda e na distribuição dos eventos. O primeiro evento ocorreu em 48,76 °C, com perda reduzida para 6,00%, sugerindo menor retenção de água, possivelmente devido ao caráter parcialmente hidrofóbico da curcumina. O segundo evento, em 159,58 °C, apresentou perda de 39,22%, valor muito próximo ao do amido puro, indicando que a presença da curcumina não altera significativamente o início da degradação da matriz. Entretanto, o terceiro evento apresentou aumento da perda de massa para 41,39% em 297,71 °C, sugerindo maior concentração da degradação estrutural nessa etapa. O quarto evento, em 547,68 °C, apresentou perda menor (12,76%), refletindo menor quantidade de carbono residual. O resíduo final de 0,63% indica discreto aumento na formação de material carbonáceo em relação ao amido puro (AMANI *et al.*, 2022; ARAÚJO, 2021).

Para o filme contendo amido e quitosana, observou-se perfil termogravimétrico indicativo de maior resistência à degradação térmica. O primeiro evento ocorreu em 48,10 °C, com perda de 6,61%, sugerindo menor quantidade de água livre em relação ao amido puro. O segundo pico, em 167,22 °C, apresentou perda de 39,29%, semelhante à observada para o amido, indicando que a etapa inicial de degradação permanece predominantemente associada à fração amilácea da matriz. O terceiro evento, em 301,67 °C, com perda de 37,87%, corresponde à principal etapa de decomposição da estrutura polimérica. Em comparação às formulações anteriores, foram observados dois eventos adicionais em altas temperaturas: o primeiro em 525,55 °C, com perda de 5,74%, e o segundo em 677,74 °C, com perda de 4,33%. Esses eventos sugerem maior formação de estruturas carbonáceas residuais, possivelmente favorecida pelas

interações intermoleculares entre amido e quitosana. O resíduo final de 6,16% reforça a maior tendência à carbonização observada nessa formulação (HORN, 2012).

O filme ternário contendo amido, quitosana e curcumina apresentou o maior resíduo térmico entre as formulações avaliadas. O primeiro evento ocorreu em 49,57 °C, com perda de 10,50%, valor superior ao das demais formulações, possivelmente associado à maior retenção de umidade pela rede polimérica. O segundo evento ocorreu em 177,14 °C, com perda de 32,67%, indicando redução da degradação nessa faixa de temperatura em relação aos demais filmes. O terceiro evento, centrado em 298,43 °C, concentrou a maior perda de massa (48,48%) e corresponde à principal etapa de decomposição do material, envolvendo degradação simultânea dos componentes orgânicos e formação de estruturas carbonáceas. Acima de 300 °C, a degradação ocorreu de forma contínua até o final do ensaio, resultando em resíduo final elevado (8,35%), o que indica maior tendência à carbonização e maior estabilidade térmica residual (AMANI *et al.*, 2022; DOUMBIA; TRAORÉ, 2023; HORN, 2012; SCHAEFER, 2018).

Ao comparar os filmes entre si, observa-se que a presença de quitosana promove aumento significativo do resíduo térmico e deslocamento da degradação para temperaturas mais elevadas, indicando maior estabilidade estrutural. A curcumina, quando utilizada isoladamente com o amido, promove alterações mais discretas, principalmente relacionadas à distribuição das perdas de massa. Entretanto, quando combinada com a quitosana, observa-se efeito sinérgico, resultando na maior formação de resíduo carbonáceo e maior resistência à degradação térmica geral. Dessa forma, a tabela demonstra que a estabilidade térmica segue a seguinte ordem decrescente de resistência à degradação térmica: amido, quitosana e curcumina > amido e quitosana > amido e curcumina > amido.

No entanto, esse comportamento contrasta com alguns relatos da literatura, nos quais a adição de quitosana ou de curcumina a filmes de amido resultou na diminuição da estabilidade térmica, com redução da temperatura de máxima degradação (SCHAEFER, 2018). Essa divergência pode estar relacionada a diferenças na composição das formulações, nas condições de processamento e na organização estrutural da matriz polimérica. Em composições como as descritas por Schaefer (2018), a incorporação dos aditivos pode não promover interações intermoleculares suficientemente fortes para compensar a desorganização da rede polimérica, resultando em menor estabilidade térmica.

No presente estudo, por outro lado, os resultados sugerem que a incorporação de quitosana e curcumina pode ter favorecido a formação de uma rede polimérica mais coesa, possivelmente devido ao estabelecimento de interações intermoleculares mais intensas, como

ligações de hidrogênio entre os grupos funcionais dos componentes. Além disso, fatores como a proporção dos constituintes, o grau de dispersão dos aditivos e as condições de secagem podem influenciar a organização estrutural da matriz polimérica e, conseqüentemente, sua estabilidade térmica, uma vez que afetam diretamente a formação de interações intermoleculares e a compactação da rede polimérica (SIRACUSA *et al.*, 2008; SOBRAL, 2000).

De maneira geral, os resultados indicam que a incorporação de quitosana e curcumina modifica significativamente o comportamento térmico da matriz amilácea, promovendo reorganização estrutural, alteração nas rotas de degradação térmica e aumento da formação de estruturas carbonáceas residuais, características desejáveis para aplicações em embalagens ativas com maior estabilidade térmica e estrutural (SIRACUSA *et al.*, 2008).

5.4 Solubilidade em Água

A solubilidade dos filmes biodegradáveis foi avaliada com o objetivo de investigar a influência da composição polimérica na estabilidade da matriz em meio aquoso, parâmetro diretamente relacionado ao potencial de aplicação desses materiais em embalagens ativas (SIRACUSA *et al.*, 2008). Os valores médios de solubilidade estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Solubilidade média dos filmes biodegradáveis

Formulação	Solubilidade (%)
Amido	53,4 ± 2 ^b
Amido e Curcumina	65,8 ± 6 ^a
Amido e Quitosana	54,3 ± 1 ^b
Amido, Curcumina e Quitosana	52,0 ± 1 ^b

Nota: Valores expressos como média ± desvio padrão (n = 3). Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Fonte: O autor (2026)

Os resultados de solubilidade indicam que a composição da matriz polimérica influencia a interação dos filmes com o meio aquoso. As formulações contendo amido, amido e quitosana e amido, quitosana e curcumina apresentaram valores estatisticamente semelhantes, indicando comportamento equivalente em termos de solubilidade. Esse resultado é compatível com o caráter hidrofílico do amido, cujos grupos hidroxila favorecem a interação com água e a solubilização parcial da matriz (WANG *et al.*, 2020).

A incorporação de curcumina promoveu aumento significativo da solubilidade, passando de 53,4 ± 2 para 65,8 ± 6%, correspondendo a um incremento aproximado de 23%. Esse resultado é confirmado pela análise estatística, na qual a formulação contendo amido e

curcumina difere significativamente das demais, indicando que a presença desse composto interfere na organização estrutural da matriz polimérica. Embora a curcumina possua caráter hidrofóbico, sua incorporação pode gerar desorganização estrutural local, reduzindo a densidade de interações intermoleculares entre cadeias de amido. Esse efeito pode favorecer a penetração de água e aumentar a lixiviação de frações solúveis do material (PATSAHAN; PIZIO, 2022; YU *et al.*, 2010).

Por outro lado, a adição de quitosana não promoveu alteração significativa na solubilidade em relação ao filme de amido. Esse resultado pode estar associado à formação de interações intermoleculares entre amido e quitosana, que contribuem para a manutenção da integridade estrutural da matriz (HORN, 2012; VON MÜHLEN *et al.*, 2025).

O filme contendo amido, quitosana e curcumina apresentou o menor valor médio de solubilidade, porém sem diferença estatística em relação às formulações contendo amido e amido e quitosana. Assim, não se pode afirmar redução significativa da solubilidade nessa formulação, embora o comportamento observado sugira possíveis interações entre os componentes capazes de limitar a difusão de água na matriz polimérica (ROY; RHIM, 2020).

A análise estatística por ANOVA indicou efeito significativo da formulação sobre a solubilidade dos filmes ($F = 11,20$; $p = 0,0031$). O teste de Tukey ($p < 0,05$) mostrou que apenas a formulação contendo amido e curcumina difere significativamente das demais, enquanto os filmes contendo amido, amido e quitosana e amido, quitosana e curcumina não apresentam diferenças estatísticas entre si.

De forma geral, os resultados indicam que a curcumina aumenta a solubilidade quando incorporada isoladamente, enquanto a quitosana exerce efeito estabilizador sobre a matriz. No filme ternário, a solubilidade permanece estatisticamente semelhante aos filmes contendo quitosana, indicando que o efeito estruturante da quitosana predomina, limitando possíveis alterações na organização da matriz associadas à presença da curcumina. (DEVI *et al.*, 2025; LI, Han *et al.*, 2023; VÁSCONEZ *et al.*, 2009; TAGHINEJAD *et al.*, 2024).

Considerando a formulação de interesse (amido, quitosana e curcumina), os resultados indicam que essa formulação apresenta comportamento de solubilidade semelhante as formulações mais estáveis, o que é desejável para aplicações em embalagens ativas, nas quais a integridade estrutural do material em meio aquoso é essencial, sem comprometer a funcionalidade dos compostos incorporados (LI, Han *et al.*, 2023).

De modo geral, os valores de solubilidade obtidos estão em concordância com aqueles reportados na literatura para filmes biodegradáveis à base de amido de mandioca produzidos pelo método de *casting*, os quais apresentam solubilidade moderada a elevada em água,

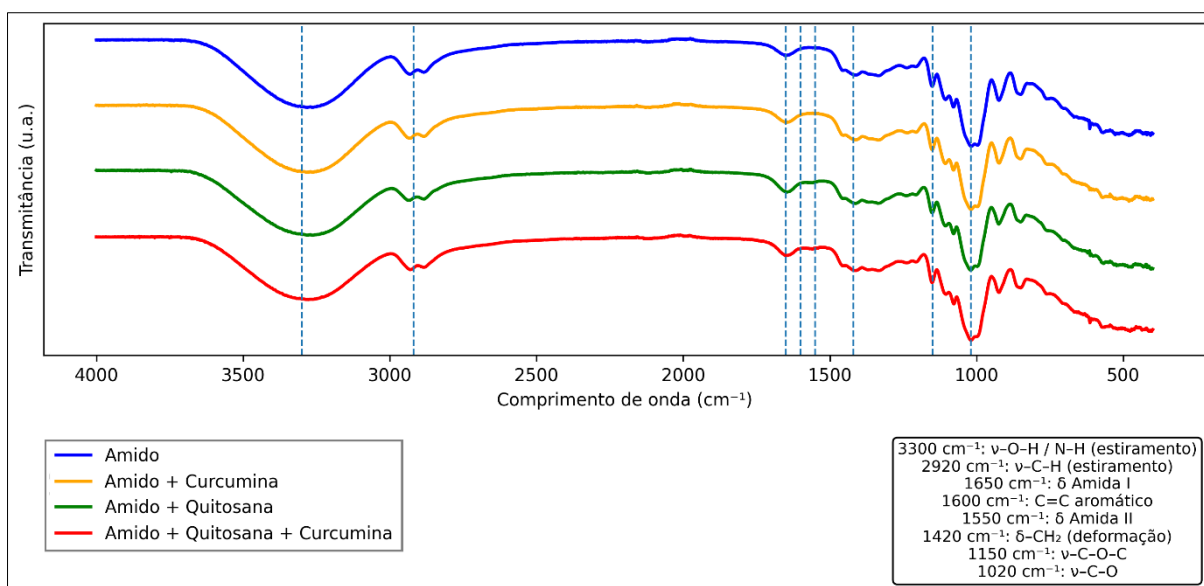
geralmente na faixa de aproximadamente 40% a 70%, em função do caráter hidrofílico do amido e das condições de processamento, conforme descrito em estudos da Embrapa (LIMA *et al.*, 2021).

Nesse contexto, os resultados observados para as diferentes formulações avaliadas neste trabalho situam-se dentro da faixa esperada, confirmando que a solubilidade dos filmes desenvolvidos é compatível com o comportamento típico de matrizes amiláceas. Além disso, os resultados indicam que a modulação da composição polimérica permite ajustar o comportamento de solubilidade dos filmes, possibilitando direcionar suas propriedades conforme a aplicação desejada, uma vez que filmes com maior solubilidade podem ser interessantes para aplicações que demandem rápida degradação ou liberação controlada, enquanto formulações com menor solubilidade e maior estabilidade estrutural mostram-se mais adequadas para embalagens ativas e barreiras protetoras (BISHNOI *et al.*, 2023).

5.5 Espectroscopia na região do infravermelho

As análises espectroscópicas na região do infravermelho (IV) apresentaram bandas características evidenciando interações moleculares entre os constituintes da matriz polimérica (AL-AMIN *et al.*, 2025). A Figura 20 mostra os espectros de FTIR obtidos para os filmes biodegradáveis à base de amido.

Figura 20- Espectros de FTIR para filmes biodegradáveis à base de amido



Fonte: O autor (2026)

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi empregada com o objetivo de investigar a estrutura química dos filmes e avaliar possíveis interações

moleculares entre amido, quitosana e curcumina. De forma geral, os espectros apresentaram elevada similaridade entre as formulações, indicando que a incorporação dos aditivos não promoveu modificações significativas na estrutura química fundamental da matriz polimérica. Esse comportamento sugere que a matriz é predominantemente estabilizada por interações intermoleculares, especialmente ligações de hidrogênio, não sendo observadas alterações significativas nas bandas características, o que pode indicar que eventuais interações químicas não são detectáveis nas condições da técnica empregada (LI, Han *et al.*, 2023).

A banda larga observada na região de aproximadamente 3300 cm^{-1} é atribuída ao estiramento O–H e, em menor contribuição, ao estiramento N–H. Essa banda está associada aos grupos hidroxila do amido e da quitosana, além da presença de água estruturalmente ligada. A largura dessa banda sugere a existência de uma extensa rede de ligações de hidrogênio intermoleculares, característica típica de matrizes poliméricas hidrofílicas. Esse comportamento é consistente com a natureza fortemente hidrofílica da matriz e com a presença de interações físicas dominantes entre os componentes (HASAN *et al.*, 2025; HORN, 2012; LARKIN, 2018; KIZIL; IRUDAYARAJ; SEETHARAMAN, 2002).

A banda próxima a 2920 cm^{-1} é atribuída ao estiramento C–H alifático, associado às cadeias orgânicas dos polímeros naturais. A presença dessa banda em todas as formulações indica que a estrutura principal das cadeias poliméricas foi preservada após o processamento e incorporação dos aditivos (HASAN *et al.*, 2025; HORN, 2012; KIZIL; IRUDAYARAJ; SEETHARAMAN, 2002).

Na região de aproximadamente 1650 cm^{-1} observa-se a banda atribuída à Amida I (estiramento C=O), característica da quitosana, além de possível contribuição da deformação angular da água ligada. A presença dessa banda confirma a incorporação da quitosana na matriz polimérica. Já a banda próxima a 1550 cm^{-1} é atribuída à Amida II, associada às vibrações combinadas de N–H e C–N, também característica da quitosana. A manutenção dessas bandas sem deslocamentos significativos sugere que a quitosana está incorporada principalmente por interações físicas e ligações de hidrogênio com o amido (BRUGNEROTTO *et al.*, 2001; SILVA, Milena Costa *et al.*, 2016; SILVA, Paloma L. da *et al.*, 2016).

A banda característica próxima a 1600 cm^{-1} , atribuída às vibrações de estiramento C=C aromático da curcumina, não foi claramente observada nos espectros obtidos. Esse comportamento pode ser explicado pela baixa intensidade do sinal da curcumina nas formulações, o que dificulta sua detecção nessa região do espectro. Ainda assim, a presença do composto bioativo na matriz polimérica pode ser inferida a partir dos demais resultados e da composição das formulações. A ausência de deslocamentos significativos nessa região sugere

que a curcumina se encontra predominantemente dispersa fisicamente na matriz, sem formação de ligações químicas covalentes com os polímeros (FUGITA *et al.*, 2012).

A banda localizada em aproximadamente 1420 cm^{-1} está associada à deformação angular de grupos CH_2 , relacionada à estrutura das cadeias poliméricas. Essa banda contribui para confirmar a integridade estrutural da matriz orgânica (HORN, 2012).

Na região de aproximadamente 1150 cm^{-1} observa-se a banda atribuída ao estiramento C-O-C , associada às ligações glicosídicas do amido. Essa banda é característica da estrutura do polissacarídeo e indica a preservação da estrutura molecular do amido após o processamento (HORN, 2012).

Por fim, a banda próxima a 1020 cm^{-1} é atribuída ao estiramento C-O , também característico de polissacarídeos. Essa região corresponde à chamada região *fingerprint* do amido e confirma a presença da estrutura base da matriz polimérica em todas as formulações (HORN, 2012).

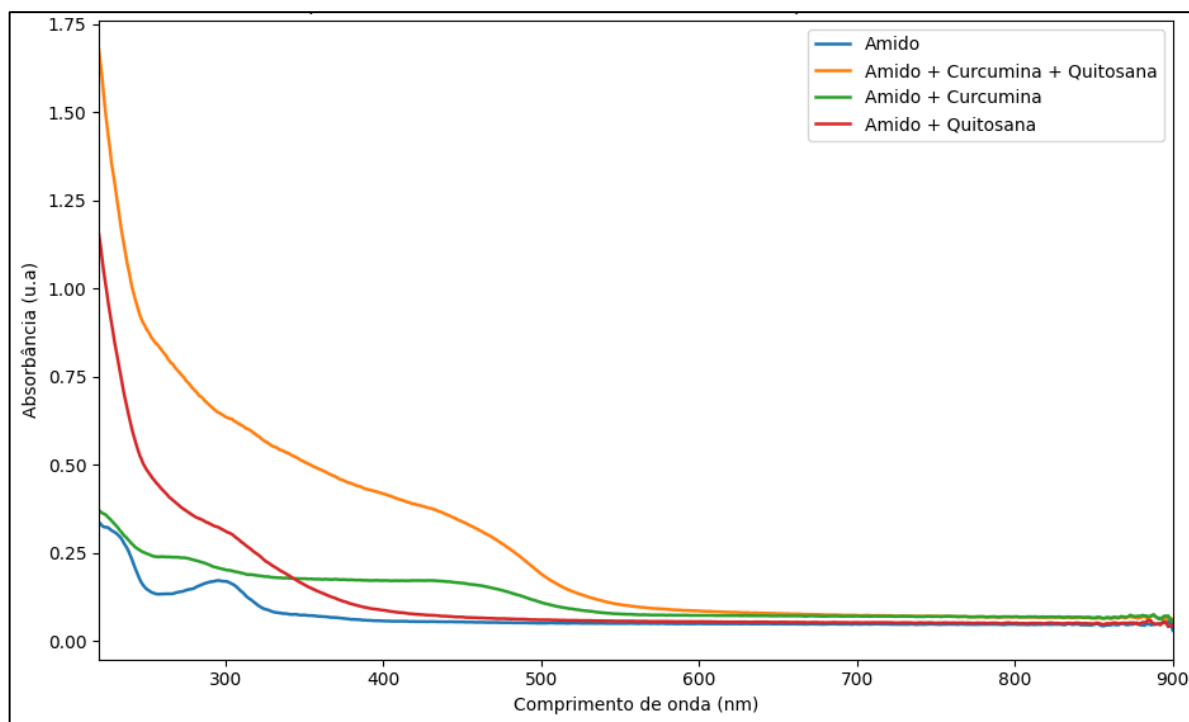
No filme ternário (amido, quitosana e curcumina), o perfil espectral global manteve-se semelhante às demais formulações, sugerindo que a incorporação simultânea dos componentes não resultou em alterações estruturais significativas detectáveis por FTIR (AMANI *et al.*, 2022; LI, Han *et al.*, 2023). Entretanto, pequenas variações observadas principalmente na região entre 1500 e 1700 cm^{-1} sugerem a presença simultânea das contribuições espectrais da quitosana e da curcumina, confirmando a incorporação dos componentes na matriz (RINAUDO, 2006; (NASCIMENTO *et al.*, 2024). Esse comportamento indica que o filme ternário é estabilizado predominantemente por interações intermoleculares, como ligações de hidrogênio e interações físicas de empacotamento molecular (DIAO *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2016; MADIAN; EL-ASHMANTY; ABDEL-RAHIM, 2023).

De forma geral, os resultados de FTIR corroboram os dados obtidos por outras técnicas, indicando que as diferenças observadas nas propriedades térmicas e de solubilidade estão associadas a alterações na organização estrutural da matriz polimérica, relacionadas à redistribuição das interações intermoleculares e ao rearranjo das cadeias poliméricas, sem formação de novos grupos funcionais detectáveis por FTIR. Assim, os espectros confirmam que a síntese do filme de amido, quitosana e curcumina resultou em uma matriz polimérica integrada, na qual ocorre incorporação dos componentes, mantendo as características estruturais fundamentais de cada material.

5.6 Espectroscopia na região do ultravioleta-visível para sólidos

A espectroscopia UV-Vis foi empregada para caracterizar o comportamento óptico dos filmes e verificar a influência da formulação na absorção de radiação eletromagnética na faixa do ultravioleta e do visível (SKOOG, 2014). A Figura 21 mostra os espectros de UV-VIS obtidos para os filmes biodegradáveis à base de amido.

Figura 21 - Espectros UV-Vis dos filmes à base de amido



Fonte: O autor (2026)

De modo geral, os filmes apresentaram comportamento espectral típico de matrizes poliméricas naturais, com baixa absorbância ao longo da região visível, exceto para as formulações contendo curcumina, nos quais foi observado aumento significativo da absorção óptica (SOTHORNVIT; KROCHTA, 2005; VIEIRA *et al.*, 2011).

Segundo a literatura, a curcumina apresenta duas principais bandas de absorção: uma localizada na faixa de 260–280 nm, associada às transições eletrônicas dos anéis fenólicos aromáticos ($\pi \rightarrow \pi^*$), e outra entre 420 e 430 nm, atribuída às transições $\pi \rightarrow \pi^*$ do sistema conjugado dicetoenol, característica da estrutura química da curcumina em sua forma cetoenólica (FIDALGO, 2022; SANTOS *et al.*, 2024; SILVA, Paloma L. da *et al.*, 2016). Nos espectros obtidos experimentalmente, observa-se comportamento compatível com esse padrão espectral, evidenciando aumento expressivo da absorbância na região próxima a 420–450 nm para os filmes contendo curcumina, confirmando a incorporação e a estabilidade estrutural do composto bioativo na matriz polimérica.

O filme constituído apenas por amido apresentou baixa absorbância em toda a região do visível, comportamento esperado devido à ausência de sistemas cromóforos conjugados em sua estrutura química. Esse resultado indica elevada transparência óptica e está relacionado à natureza predominantemente alifática e hidrofílica do polímero (LI, Yu *et al.*, 2023). A incorporação isolada de quitosana não promoveu alterações significativas na absorbância do visível, o que é coerente com sua estrutura química, que não apresenta sistemas conjugados capazes de promover absorção eletrônica intensa nessa região espectral (LOZANO-NAVARRO *et al.*, 2017).

Por outro lado, os filmes contendo curcumina apresentaram aumento representativo da absorbância na região do visível, sendo esse efeito mais pronunciado no filme ternário (amido, quitosana e curcumina). Esse comportamento indica que a curcumina permanece opticamente ativa após incorporação na matriz e que a presença da quitosana não compromete sua capacidade de absorção luminosa. Esse resultado é relevante para aplicações em embalagens ativas, pois sugere potencial aumento da proteção contra processos foto-oxidativos (AMANI *et al.*, 2022; DEVI *et al.*, 2025; LI, Han *et al.*, 2023; ROY; RHIM, 2020).

A opacidade dos filmes foi avaliada a partir da razão entre a absorbância na região do visível (600 nm) e a espessura média dos filmes, permitindo avaliar simultaneamente a absorção óptica e o efeito estrutural do material. A Tabela 5 mostra os valores de opacidade obtidos para cada filme.

Tabela 5- Espessura média, absorbância a 600 nm e opacidade dos filmes à base de amido

Formulação	Espessura média (mm)	A ₆₀₀	Opacidade (Abs/mm)
Amido	0,22 ± 0,02	0,0496	0,23 ± 0,02
Amido e Curcumina	0,25 ± 0,02	0,0731	0,29 ± 0,03
Amido e Quitosana	0,19 ± 0,02	0,0555	0,29 ± 0,02
Amido, Quitosana e Curcumina	0,18 ± 0,01	0,0857	0,47 ± 0,04

Fonte: O autor (2026)

Os valores de opacidade obtidos para os filmes biodegradáveis indicam influência direta da composição da matriz polimérica na capacidade de absorção e bloqueio da radiação luminosa. O filme constituído apenas por amido apresentou opacidade de 0,23 Abs/mm, valor compatível com o esperado para filmes amiláceos plastificados. Na literatura, filmes de amido puro apresentam valores de opacidade tipicamente situados entre aproximadamente 0,20 e 1,40 Abs/mm, podendo variar amplamente em função da origem botânica do amido, do teor e tipo de plastificante, do grau de gelatinização, da cristalinidade residual e da espessura do material. (DOMENE-LÓPEZ *et al.*, 2019; ENGEL, 2019; OSORIO, 2021). Dessa forma, o valor obtido

para o amido indica comportamento óptico típico e confirma a transparência característica desse tipo de matriz polimérica.

A incorporação de curcumina promoveu aumento da opacidade para 0,29 Abs/mm. Esse comportamento é coerente com a presença do sistema cromóforo conjugado da curcumina, responsável pelas bandas de absorção características em 260–280 nm (transições $\pi \rightarrow \pi^*$ dos anéis fenólicos aromáticos) e 420–430 nm (transições $\pi \rightarrow \pi^*$ do sistema dicetoenol conjugado) (FIDALGO, 2022; SANTOS *et al.*, 2024; SILVA, Paloma L. da *et al.*, 2016). Embora a opacidade tenha sido avaliada em 600 nm, a presença da curcumina aumenta a absorção global no visível e também pode aumentar o espalhamento óptico devido à dispersão do composto na matriz (XIE *et al.*, 2021).

O filme contendo amido e quitosana apresentou valor de opacidade semelhante ao filme contendo apenas curcumina, cerca de 0,29 Abs/mm. Esse comportamento sugere que a quitosana contribui principalmente por efeitos estruturais, aumentando a densidade da matriz e o espalhamento de luz, mas sem contribuição significativa de absorção eletrônica direta, uma vez que não possui sistemas cromóforos conjugados extensos (LEANDRO, 2025; LOZANO-NAVARRO *et al.*, 2017).

A formulação constituída por amido, quitosana e curcumina apresentou o maior valor de opacidade (0,47 Abs/mm). Esse comportamento pode ser compreendido como resultado da combinação dos mecanismos observados nas formulações binárias, nas quais a curcumina contribuiu para o aumento da absorção óptica no espectro visível, enquanto a quitosana promoveu modificações estruturais na matriz polimérica, favorecendo o aumento do espalhamento da radiação luminosa. A atuação simultânea desses dois efeitos intensifica a descontinuidade óptica do material, resultando em opacidade significativamente superior àquela observada nos filmes contendo apenas um dos aditivos (LEANDRO, 2025; XIE *et al.*, 2021).

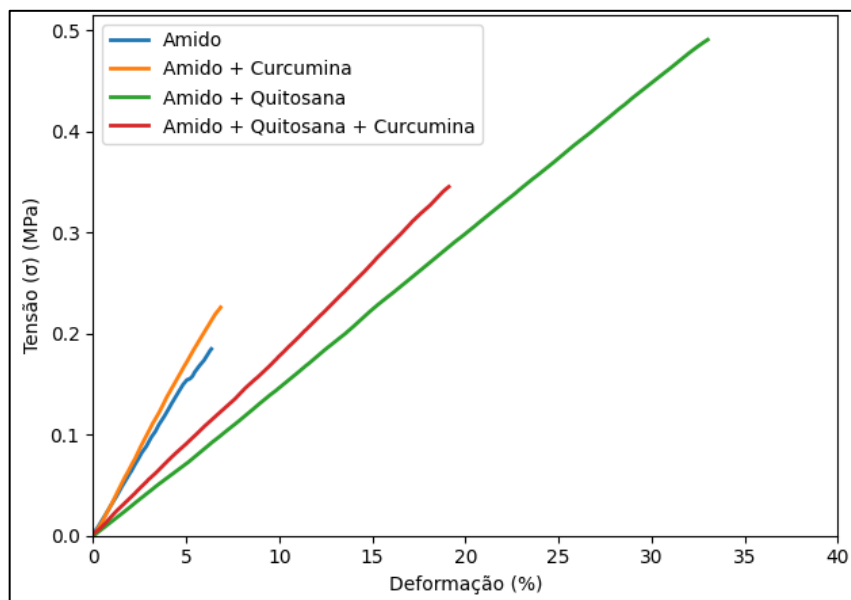
Os resultados apontam que a incorporação simultânea de quitosana e curcumina promove aumento significativo da opacidade do material, indicando potencial melhoria da capacidade de proteção contra radiação luminosa. Esse comportamento é particularmente relevante para aplicações em embalagens alimentícias ativas, pois pode contribuir para redução de processos foto-oxidativos e degradação de compostos sensíveis à luz (SANI *et al.*, 2024).

5.7 Ensaio de Tração

A Figura 22 apresenta as curvas tensão *versus* deformação médias obtidas para os filmes à base de amido puro e para as formulações contendo curcumina, quitosana e a combinação de

ambos os aditivos, permitindo avaliar o comportamento mecânico dos materiais sob esforço de tração.

Figura 22- Curvas tensão *versus* deformação dos filmes à base de amido



Fonte: O autor (2026)

De forma complementar, a Tabela 6 reúne os valores médios de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongação na ruptura, possibilitando a análise quantitativa das diferenças entre as formulações e a correlação direta entre o perfil das curvas e os parâmetros mecânicos obtidos experimentalmente.

Tabela 6- Propriedades mecânicas dos filmes à base de amido: resistência à tração, módulo de elasticidade e alongação na ruptura

Formulação	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Elongação (%)
Amido	$0,22 \pm 0,05^b$	$3,08 \pm 0,08^a$	$7,5 \pm 2^b$
Amido e Curcumina	$0,29 \pm 0,05^b$	$3,5 \pm 0,3^a$	9 ± 2^b
Amido e Quitosana	$0,54 \pm 0,05^a$	$1,43 \pm 0,06^b$	36 ± 6^a
Amido, Quitosana e Curcumina	$0,5 \pm 0,1^a$	$1,85 \pm 0,07^b$	28 ± 8^a

Nota: Valores expressos como média $\pm$ desvio padrão ($n = 3$). Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O autor (2026)

A Figura 22, em conjunto com os valores apresentados na Tabela 6, evidencia a influência da composição da matriz polimérica sobre o comportamento mecânico dos filmes, refletida nos parâmetros de resistência à tração (σ), módulo de elasticidade (E) e alongação na ruptura (ϵ). As diferenças observadas entre as formulações podem estar associadas à natureza das interações intermoleculares e à mobilidade das cadeias poliméricas promovidas pela

incorporação de quitosana e curcumina (MADIAN; EL-ASHMANTY; ABDEL-RAHIM, 2023).

O filme constituído apenas por amido apresentou $\sigma = 0,22 \pm 0,05$ MPa, $E = 3,08 \pm 0,08$ MPa e $\varepsilon = 7,5 \pm 2\%$. Entre as formulações avaliadas, esse filme apresentou o maior módulo de elasticidade e a menor elongação, indicando comportamento mais rígido e frágil quando comparado aos filmes contendo quitosana. Esse desempenho pode estar relacionado ao predomínio de interações intermoleculares entre cadeias de amido, especialmente ligações de hidrogênio entre grupos hidroxila, que tendem a reduzir a mobilidade das cadeias poliméricas. Em conjunto com fatores como plastificação e umidade residual, esse arranjo pode contribuir para o comportamento mais rígido e para a menor elongação observados no filme de amido (MALI; GROSSMANN; YAMASHITA, 2010; SALEH, 2025; SINGH *et al.*, 2022; TAN *et al.*, 2022b).

Ao comparar esses resultados com os reportados na literatura para filmes de amido plastificados, observa-se que os valores absolutos das propriedades mecânicas se situam em uma faixa distinta daquela comumente descrita. Estudos com filmes de amido obtidos por *casting* e plastificados com glicerol reportam valores de resistência à tração entre 2 e 40 MPa e módulos de elasticidade entre 50 e 700 MPa, indicando que, embora o filme de amido tenha apresentado o maior módulo de elasticidade e a menor elongação no conjunto de formulações avaliadas, seus valores absolutos permanecem inferiores aos observados em filmes plastificados descritos na literatura (LIMA, 2021; LUCHESE *et al.*, 2018; SCHAEFER, 2018).

Em concordância com a literatura, a elongação na ruptura encontra-se dentro da faixa reportada (5–80%), porém próxima ao limite inferior, indicando um comportamento mecânico mais rígido. Esse resultado pode estar relacionado à limitada mobilidade das cadeias poliméricas, às características da matriz e do processamento por *casting* (SIRBU *et al.*, 2024; TAN *et al.*, 2022b; SCHAEFER, 2018).

A incorporação de curcumina ao amido resultou em $\sigma = 0,29 \pm 0,05$ MPa, $E = 3,5 \pm 0,3$ MPa e $\varepsilon = 9 \pm 2\%$, valores próximos aos do amido puro, conforme observado em matrizes poliméricas nas quais a curcumina não promove alterações mecânicas relevantes quando incorporada apenas por mistura física à matriz polimérica, sem modificações químicas significativas do material (LIU *et al.*, 2022; XIE *et al.*, 2021).

Ao comparar com as demais formulações do presente trabalho, esse filme manteve módulo de elasticidade elevado e elongação reduzida, indicando que a curcumina, quando utilizada isoladamente, não altera de forma significativa a rigidez inicial nem a capacidade de deformação da matriz amilácea, resultado amplamente reportado para filmes polissacarídicos

contendo compostos fenólicos dispersos fisicamente (DOMENE-LÓPEZ *et al.*, 2019; XIE *et al.*, 2021). Essa resposta do material é consistente com a hipótese de que o composto bioativo se encontra predominantemente disperso de forma física na matriz, sem promover reorganização estrutural relevante da rede polimérica responsável pelo desempenho mecânico (XIE *et al.*, 2021).

Na literatura, filmes de amido ou gelatina incorporados com curcumina apresentam valores de resistência à tração geralmente entre 0,2 e 1,0 MPa, módulo de elasticidade entre 1 e 10 MPa e alongação na ruptura tipicamente inferior a 15% (SCHAEFER, 2018; XIE *et al.*, 2021). Os resultados obtidos neste trabalho situam-se dentro dessas faixas, evidenciando concordância com a literatura. Essa correspondência pode estar relacionada à incorporação da curcumina por mistura física à matriz polimérica, de modo que as propriedades mecânicas permanecem controladas pelas interações intermoleculares da matriz, bem como pelo teor de plastificante e pela umidade residual (ROY; RHIM, 2021; XIE *et al.*, 2021).

Em contraste com as formulações sem quitosana, a incorporação desse biopolímero promoveu alterações significativas nas propriedades mecânicas dos filmes. O filme de amido e quitosana apresentou $\sigma = 0,54 \pm 0,05$ MPa, $E = 1,43 \pm 0,06$ MPa e $\varepsilon = 36 \pm 6\%$, evidenciando redução do módulo de elasticidade e aumento expressivo da alongação na ruptura em relação aos filmes constituídos apenas por amido ou amido e curcumina. Entre as formulações avaliadas, esse filme apresentou módulo de elasticidade significativamente inferior e alongação significativamente superior em relação às matrizes sem quitosana, indicando maior capacidade de deformação sob carregamento mecânico (CHILLO *et al.*, 2008; LUCHESE *et al.*, 2018).

Na literatura, filmes de amido e quitosana apresentam valores de resistência à tração entre 2,2 e 5,3 MPa, módulo de elasticidade entre 3 e 90 MPa e alongação na ruptura entre 43 e 146% (LUCHESE *et al.*, 2018; REN *et al.*, 2017). Embora os valores de resistência à tração e módulo de elasticidade obtidos neste estudo sejam inferiores aos reportados, a alongação na ruptura apresenta aumento pronunciado em relação às formulações sem quitosana, posicionando-se na mesma direção da tendência descrita na literatura. Essa tendência está associada ao aumento da ductilidade com a incorporação de quitosana, o que pode estar relacionado à maior mobilidade das cadeias poliméricas e à capacidade do material de acomodar deformações sob carregamento mecânico (CHILLO *et al.*, 2008; LUCHESE *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2005).

A redução do módulo de elasticidade e o aumento da capacidade de deformação observados com a incorporação de quitosana podem estar associados a interações intermoleculares entre amido e quitosana, que contribuem para a formação de uma matriz mais

flexível. Adicionalmente, fatores associados à matriz plastificada, como o elevado grau de plastificação e a presença de umidade residual, contribuem para a redução do módulo de elasticidade e para o aumento da capacidade de deformação do material (LUCHESE *et al.*, 2018; REN *et al.*, 2017).

No filme ternário de amido, quitosana e curcumina, formulação foco deste trabalho, foram obtidos $\sigma = 0,5 \pm 0,1$ MPa, $E = 1,85 \pm 0,07$ MPa e $\varepsilon = 28 \pm 8\%$. Em comparação com a formulação de amido e quitosana, observa-se redução da elongação e aumento discreto do módulo de elasticidade, o que pode indicar que a presença da curcumina restringe parcialmente a mobilidade das cadeias poliméricas. (ROY; RHIM, 2021; XIE *et al.*, 2021). Ainda assim, os valores de elongação permanecem significativamente superior em relação aos observados nos filmes sem quitosana, indicando que o efeito estruturante desse biopolímero é mantido mesmo na presença do bioativo (CHILLO *et al.*, 2008; XU *et al.*, 2005).

Os filmes ternários à base de amido/quitosana incorporados com curcumina apresentam propriedades mecânicas fortemente dependentes da formulação adotada. No estudo conduzido por Schaefer (2018), o filme quitosana/amido/curcumina apresentou tensão de ruptura de $1,5 \pm 0,6$ MPa, módulo elástico de 6 ± 2 MPa e alongamento de $83,0 \pm 0,3\%$. Nesse contexto, os valores de resistência à tração, módulo de elasticidade e elongação na ruptura obtidos no presente trabalho situam-se abaixo daqueles reportados nesse estudo específico. Essa diferença pode ser atribuída a variações na composição e na organização estrutural da matriz polimérica, particularmente no teor de plastificante, na eficiência de plastificação e na organização microestrutural do filme (CABELLO *et al.*, 2015; LANGER *et al.*, 2020; SUN *et al.*, 2020).

De forma mais abrangente, a literatura reporta que filmes ternários à base de amido/quitosana incorporados com compostos bioativos podem apresentar ampla variação de propriedades mecânicas, com resistência à tração entre 0,56 e 7,47 MPa, módulo de elasticidade entre 0,14 e 40 MPa e elongação na ruptura entre 4,80 e 34,50% (PRAMITASARI; GUNAWICAHYA; ANUGRAH, 2022; PECH-COHUO *et al.*, 2022). Considerando essas faixas, os resultados obtidos neste trabalho situam-se dentro dos intervalos reportados para formulações similares. Em particular, a elongação na ruptura apresenta valores compatíveis com a literatura, enquanto a resistência à tração se posiciona próxima ao limite inferior desses intervalos. Esse perfil é coerente com matrizes plastificadas, nas quais o teor de plastificante e a umidade residual influenciam a redução do módulo de elasticidade e o aumento da deformabilidade do material (ESLAMI *et al.*, 2023; MAHARDIKA *et al.*, 2025).

Em síntese, a análise conjunta dos parâmetros resistência à tração (σ), módulo de elasticidade (E) e elongação na ruptura (ε) indica que a quitosana exerce papel relevante na

resposta mecânica dos filmes, estando associada à redução do módulo de elasticidade e ao aumento da capacidade de deformação do material. A curcumina, por sua vez, atua predominantemente como componente funcional, cuja incorporação por mistura física à matriz polimérica resulta em impacto mecânico secundário. Como consequência, a formulação ternária desenvolvida apresenta equilíbrio entre resistência mecânica, flexibilidade e funcionalidade, compatível com a proposta de obtenção de filmes biodegradáveis ativos. Embora os valores obtidos sejam inferiores aos reportados em alguns estudos específicos, o filme ternário situa-se dentro das faixas descritas na literatura para formulações ternárias à base de amido e quitosana incorporadas com compostos bioativos, evidenciando coerência com o comportamento mecânico esperado para essas matrizes.

A análise estatística foi realizada inicialmente por meio de análise de variância (ANOVA) de um fator, a qual indicou efeito significativo da formulação sobre as propriedades mecânicas avaliadas: resistência à tração ($F = 10,62$; $p = 0,0037$), módulo de elasticidade ($F = 83,62$; $p = 0,000002$) e alongação na ruptura ($F = 23,98$; $p = 0,000237$). Em seguida, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey ($p < 0,05$), permitindo identificar os grupos estatisticamente distintos entre as formulações.

Os resultados da ANOVA indicaram efeito significativo da formulação sobre as propriedades mecânicas avaliadas ($p < 0,05$), confirmando que a composição da matriz polimérica exerce influência direta sobre σ , E e ϵ . A aplicação do teste de comparações múltiplas de Tukey permitiu identificar os grupos estatisticamente distintos, evidenciando que os filmes contendo quitosana diferem significativamente dos filmes sem quitosana quanto à resistência à tração e à alongação na ruptura. Por outro lado, a incorporação de curcumina, quando avaliada isoladamente, não promoveu diferenças estatisticamente significativas em relação às matrizes correspondentes sem o bioativo ($p > 0,05$), indicando que a curcumina não compromete nem altera substancialmente o desempenho mecânico da matriz polimérica.

Esses resultados estatísticos corroboram as tendências observadas na Figura 22 e nos valores médios apresentados na Tabela 6, reforçando que a quitosana atua como principal agente na modulação do comportamento mecânico dos filmes, enquanto a curcumina atua predominantemente como componente funcional, mantendo a integridade estrutural da matriz polimérica (CHILLO *et al.*, 2008; ROY; RHIM, 2021; XIE *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2005).

De modo geral, para aplicações em embalagens flexíveis do tipo plástico filme, especialmente aquelas com função ativa e inteligente, a alongação na ruptura (ϵ) constitui a propriedade mecânica predominante, seguida pela resistência à tração (σ), enquanto o módulo de elasticidade (E) assume papel secundário, desde que não comprometa a integridade estrutural

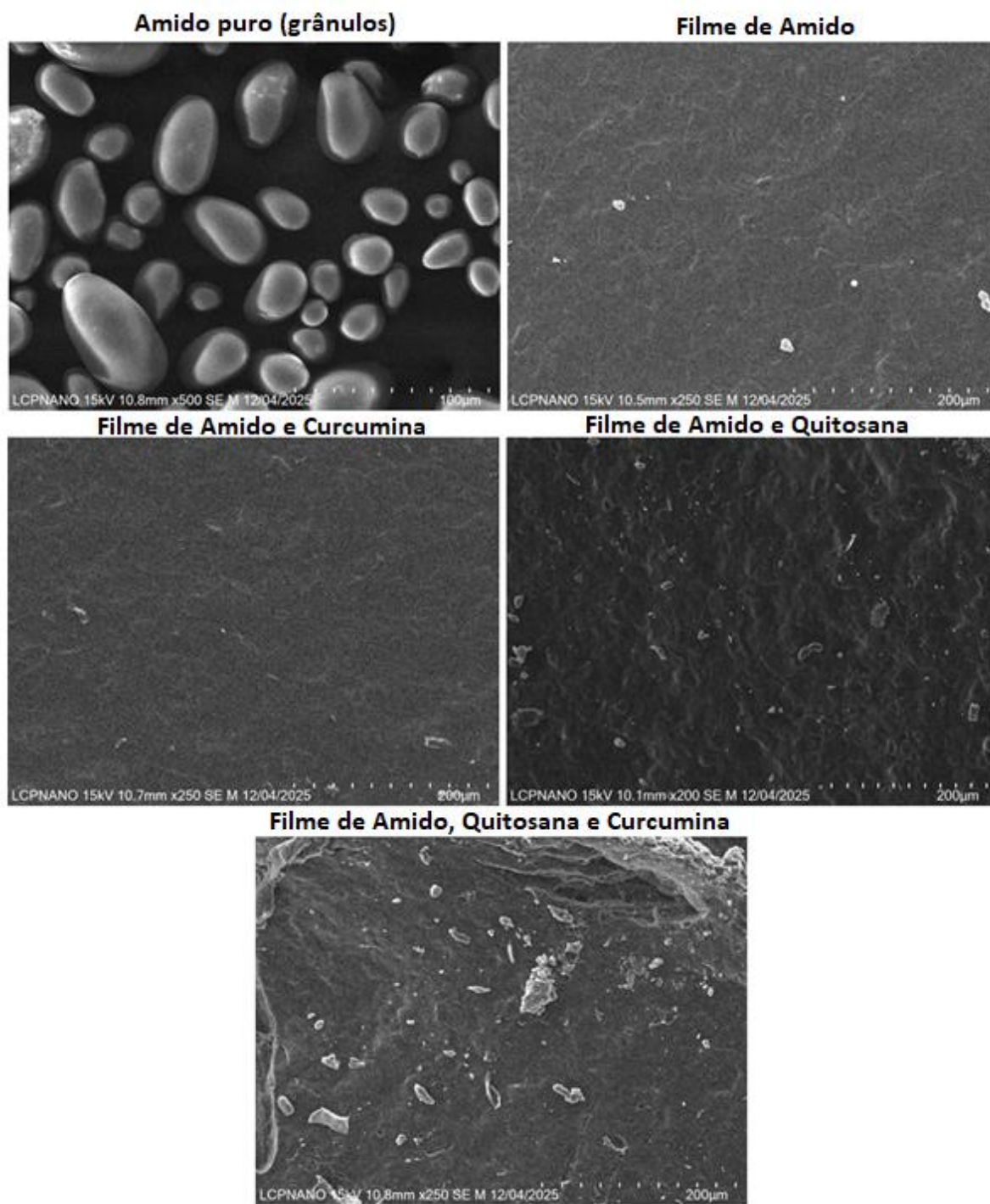
do material (GONZÁLEZ; SOLER; GUERRERO, 2023). Filmes destinados a esse tipo de aplicação devem apresentar elevada capacidade de deformação para suportar manuseio, dobramento e tensões mecânicas sem ruptura, associada à resistência suficiente para evitar rasgos durante o uso, ao mesmo tempo em que mantêm baixa rigidez inicial, característica típica de materiais flexíveis semelhantes ao PVC plastificado (BALABAN; PULKA, 2022).

Nesse contexto, a formulação foco deste trabalho, composta por amido, quitosana e curcumina, apresentou um conjunto de propriedades coerente com esses requisitos, exibindo elevada elongação ($\varepsilon = 28 \pm 8\%$), resistência à tração superior às matrizes sem quitosana ($\sigma = 0,5 \pm 0,1$ MPa) e módulo de elasticidade reduzido ($E = 1,85 \pm 0,07$ MPa), indicando um material mais flexível e com maior capacidade de deformação sob carregamento mecânico. Embora os valores absolutos ainda sejam inferiores aos observados em filmes comerciais de PVC, o equilíbrio entre flexibilidade, resistência mecânica e incorporação de funcionalidade ativa confere à formulação ternária potencial promissor para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis ativas e inteligentes (BALABAN; PULKA, 2022; GONZÁLEZ; SOLER; GUERRERO, 2023).

5.8 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 23 apresenta micrografias obtidas por MEV da superfície dos filmes biodegradáveis à base de amido, bem como do amido utilizado como matéria-prima. As imagens permitiram avaliar a homogeneidade superficial, a presença de defeitos e características morfológicas associadas à matriz polimérica e à fonte botânica do amido (NASCIMENTO, 2023).

Figura 23- Micrografias dos filmes e grânulos de amido



Fonte: O autor (2026)

O filme constituído apenas por amido apresentou superfície relativamente homogênea, contínua e com baixa rugosidade, sem evidência de poros, fissuras ou descontinuidades pronunciadas. Essa morfologia sugere a formação de uma matriz polimérica contínua ao longo do processo de *casting*. O aspecto compacto e pouco irregular pode estar associado a uma organização mais uniforme da matriz, o que é consistente com o comportamento mecânico mais

rígido e a menor capacidade de deformação observados nos ensaios de tração (MALI; GROSSMANN; YAMASHITA, 2010).

A incorporação de curcumina ao amido não promoveu alterações morfológicas significativas quando comparada ao filme de amido puro. A superfície permaneceu majoritariamente contínua, com discretas irregularidades. Não foram observadas evidências claras de separação de fases ou de formação de estruturas heterogêneas em escala superficial. Esses resultados indicam que a incorporação da curcumina não promoveu alterações expressivas na morfologia da matriz polimérica (PERERA *et al.*, 2025).

Por outro lado, o filme contendo quitosana apresentou aumento da rugosidade superficial em relação ao filme de amido puro, com presença de irregularidades e regiões heterogêneas ao longo da superfície. A morfologia observada sugere alterações na organização da matriz polimérica decorrentes da incorporação da quitosana. Esse arranjo estrutural menos compacto pode estar associado a maior mobilidade molecular, o que está em consonância com o aumento significativo da elongação na ruptura e a redução do módulo de elasticidade observados nos ensaios mecânicos (REN *et al.*, 2017; XIE *et al.*, 2021).

O filme ternário apresentou superfície mais heterogênea, com maior rugosidade e presença de estruturas irregulares, em comparação ao filme de amido puro e ao filme com curcumina. Não foram observadas fissuras ou separação macroscópica de fases. O material apresentou comportamento mecânico intermediário e solubilidade semelhante aos filmes contendo quitosana, indicando preservação da integridade estrutural. (SCHAEFER, 2018).

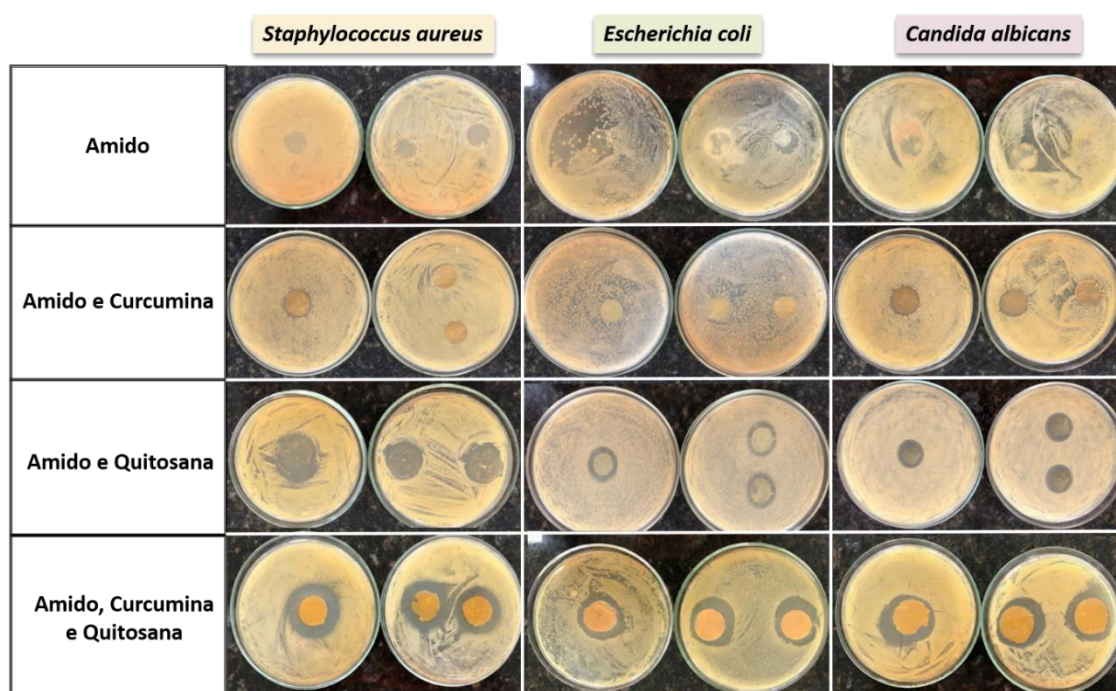
A análise morfológica do amido utilizado como matéria-prima revelou grânulos predominantemente ovais a elipsoidais, com superfícies lisas e tamanhos relativamente uniformes, sem predominância de formas poligonais. Essas características são típicas de amido de origem tuberosa, especialmente amido de mandioca, distinguindo-se de amidos de cereais, como milho ou trigo, que apresentam grânulos mais angulares. A morfologia observada é consistente com a elevada capacidade de gelatinização e a boa formação de filmes verificadas experimentalmente (HOOVER, 2001; SINGH *et al.*, 2003; TESTER; KARKALAS; QI, 2004).

Observa-se que os filmes com morfologia mais compacta e homogênea, como os de amido puro e amido com curcumina, apresentam maior rigidez inicial e menor elongação. Em contraste, a incorporação de quitosana está associada a superfícies mais heterogêneas, comportamento mecânico mais deformável e menor solubilidade. Esse conjunto de características sugere que a formulação ternária reúne propriedades estruturais e funcionais compatíveis com aplicações em embalagens biodegradáveis ativas e inteligentes.

5.9 Ensaio de difusão em ágar

A Figura 24 apresenta os resultados do ensaio de difusão em ágar realizado após 24 h de incubação, evidenciando o efeito antimicrobiano dos diferentes filmes biodegradáveis frente a *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Candida albicans*. As imagens estão organizadas de forma comparativa permitindo a análise visual direta da formação e da extensão dos halos de inibição. Observa-se comportamento distinto entre as formulações avaliadas, bem como variações na sensibilidade dos microrganismos, refletindo a influência da composição do filme, especialmente a presença de quitosana e curcumina, sobre a atividade antimicrobiana. A presença de zonas claras ao redor das amostras indica inibição do crescimento microbiano, enquanto a ausência ou redução dessas zonas sugere atividade limitada ou não detectável nas condições experimentais adotadas.

Figura 24- Avaliação da atividade antimicrobiana dos filmes à base de amido

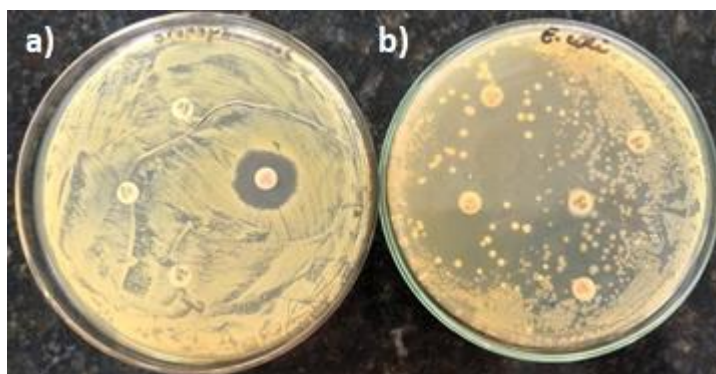


Fonte: O autor (2026)

Para validação do ensaio de difusão em ágar e verificação da sensibilidade das cepas bacterianas, foram utilizados controles positivos constituídos por discos comerciais de antibióticos aplicados nas mesmas condições experimentais das amostras de filme, conforme ilustrado na Figura 25. Para *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, empregaram-se ampicilina (AMP 02), bacitracina (BAC, 0,04 UI), ceftriaxona (CRO 30), optoquina (OPT 5 µg) e piperacilina/tazobactam (PIT 30/6). A formação de halos de inibição bem definidos ao redor desses discos, observada na Figura 25, confirmou a viabilidade do método, a adequada

difusão dos agentes antimicrobianos no meio Mueller–Hinton e a sensibilidade dos microrganismos testados, permitindo a comparação confiável com os halos formados pelas amostras dos filmes biodegradáveis.

Figura 25- Ensaio de difusão em ágar com controles positivos para *S. aureus* (a) e *E. coli* (b)



Fonte: O autor (2026)

A resposta observada para os controles positivos, caracterizada pela formação de halos de inibição bem definidos, confirma a sensibilidade das cepas testadas e a eficiência do método de difusão em ágar nas condições experimentais adotadas. Essa resposta assegura que o meio Mueller–Hinton, a padronização do inóculo e o tempo de incubação foram adequados para permitir a difusão de agentes antimicrobianos no ágar. Dessa forma, os halos formados ao redor das amostras de filmes biodegradáveis podem ser interpretados de maneira confiável, uma vez que a ausência ou presença de inibição do crescimento microbiano está associada à atividade intrínseca das formulações e não a limitações metodológicas do ensaio (BALOUIRI; SADIKI; IBNSOUDA, 2016; CLSI, 2012).

A Tabela 7 apresenta os valores dos diâmetros dos halos de inibição formados ao redor das amostras dos filmes biodegradáveis frente a *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Candida albicans*. Os resultados referem-se às leituras obtidas após 24 h de incubação pelo método de difusão em ágar, considerando discos de filme com diâmetro de 15 mm.

Tabela 7- Halos de inibição (mm) dos filmes frente aos microrganismos testados

Formulação	<i>Staphylococcus aureus</i> (mm)	<i>Escherichia coli</i> (mm)	<i>Candida albicans</i> (mm)
Amido	0 ± 0 ^a	0 ± 0 ^a	0 ± 0 ^a
Amido e Curcumina	0 ± 0 ^a	0 ± 0 ^a	0 ± 0 ^a
Amido e Quitosana	21,0 ± 1,0 ^b	19,3 ± 0,6 ^b	17,3 ± 0,6 ^b
Amido, Quitosana e Curcumina	30,0 ± 1,0 ^c	24,7 ± 0,6 ^c	22,3 ± 0,6 ^c

Nota: Valores expressos como média ± desvio padrão (n = 3). Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Fonte: O autor (2026)

As diferenças entre as formulações foram avaliadas inicialmente por análise de variância (ANOVA) de um fator, que indicou efeito significativo da formulação sobre o diâmetro dos halos de inibição para *Staphylococcus aureus* ($F = 121,50$; $p = 0,000385$), *Escherichia coli* ($F = 128,00$; $p = 0,000348$) e *Candida albicans* ($F = 112,50$; $p = 0,000447$). Em seguida, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Os resultados do ensaio de difusão em ágar demonstraram que o comportamento dos filmes biodegradáveis variou em função da composição da matriz polimérica e do microrganismo avaliado. Os filmes constituídos exclusivamente por amido, bem como aqueles contendo amido e curcumina, não apresentaram formação de halo de inibição frente a *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Candida albicans*. Esse resultado pode ser atribuído, no caso do amido, à ausência de componentes com ação antimicrobiana (PELLISSARI *et al.*, 2009) e, no caso da curcumina incorporada isoladamente, à sua baixa solubilidade em meio aquoso, que restringe sua liberação e difusão no ágar. A literatura indica que, apesar do potencial antimicrobiano da curcumina, sua ação em matrizes poliméricas está diretamente relacionada à disponibilidade do composto ativo e à sua capacidade de difusão no meio, sendo frequente a ausência ou a redução de halo em ensaios de difusão quando essas condições não são atendidas (LI, Han *et al.*, 2023; PRIYADARSHI; RHIM, 2020; ROY *et al.*, 2022).

A incorporação de quitosana à matriz de amido promoveu atividade antimicrobiana significativa para todos os microrganismos avaliados. Para *Staphylococcus aureus*, o filme de amido e quitosana apresentou halo médio de $21,0 \pm 1,0$ mm, enquanto a associação de quitosana e curcumina resultou em aumento expressivo para $30,0 \pm 1,0$ mm. Considerando que os discos de filme utilizados neste estudo apresentaram diâmetro de 15 mm, os halos efetivos (diâmetro total – diâmetro do disco) corresponderam a aproximadamente 6 mm para o filme de amido e quitosana e 15 mm para o filme ternário.

Ao comparar esses resultados com a literatura, é essencial considerar o diâmetro dos discos utilizados nos diferentes estudos, uma vez que muitos trabalhos empregam discos padrão de antibióticos ou amostras poliméricas com diâmetros entre 6 e 10 mm. A interpretação dos halos deve levar em conta essa contribuição geométrica, uma vez que o diâmetro da zona de inibição é reportado como valor total, incluindo o disco (BALOUIRI; SADIKI; IBNSOUDA, 2016; CLSI, 2012).

A literatura descreve que filmes de amido-quitosana apresentam atividade antimicrobiana frente a *Staphylococcus aureus*, com zonas de inibição cuja extensão está diretamente relacionada à concentração de quitosana, à microestrutura da matriz polimérica e

às condições experimentais do ensaio. Estudos experimentais reportam halos totais variando entre 12,0 mm e 18,1 mm, conforme observado por Apriliyani *et al.* (2020). Considerando o diâmetro dos discos padrão (6 mm), esses valores correspondem a halos efetivos situados aproximadamente entre 6 mm e 12 mm.

Em matrizes poliméricas contendo curcumina, Han Li *et al.* (2023) relataram halo total de 19,9 mm frente a *Staphylococcus aureus*, o que corresponde a halo efetivo de aproximadamente 13,9 mm, considerando discos de 6 mm. Revisões recentes destacam que a resposta antimicrobiana dessas matrizes apresenta elevada variabilidade, sendo fortemente condicionada à disponibilidade, difusão e liberação do composto bioativo na matriz polimérica (Devi *et al.*, 2025).

Sob essa perspectiva, os halos efetivos observados no presente estudo mostram-se compatíveis com aqueles descritos na literatura para matrizes de amido e quitosana e formulações poliméricas contendo curcumina, particularmente quando consideradas as diferenças inerentes às formulações e aos parâmetros metodológicos adotados.

Para *Escherichia coli*, os halos observados foram menores, passando de $19,3 \pm 0,6$ mm para o filme de amido e quitosana para $24,7 \pm 0,6$ mm no filme ternário, correspondendo a halos efetivos de aproximadamente 4 mm e 10 mm, respectivamente. Esse comportamento é consistente com a literatura, uma vez que bactérias Gram-negativas apresentam uma membrana externa adicional, que atua como barreira estrutural à ação de agentes antimicrobianos (MACHADO, 2025).

Estudos experimentais relatam zonas de inibição frente a *Escherichia coli* com diâmetros comparáveis aos observados neste trabalho. Franco *et al.* (2020) reportaram halos totais variando entre 12,5 mm e 14,5 mm para filmes contendo quitosana. Considerando o diâmetro das amostras (~10 mm), esses valores correspondem a halos efetivos de aproximadamente 2,5 mm a 4,5 mm.

Em matrizes poliméricas contendo curcumina, Han Li *et al.* (2023) observaram halo total de 21,4 mm frente a *Escherichia coli*. Considerando o diâmetro dos discos padrão (6 mm), esse resultado corresponde a halo efetivo de aproximadamente 15,4 mm. (LI, Han *et al.*, 2023).

Nesse sentido, os halos efetivos obtidos no presente estudo mostram-se plenamente compatíveis com aqueles descritos na literatura para matrizes de amido e quitosana e formulações poliméricas contendo curcumina, particularmente considerando as diferenças inerentes às formulações, aos mecanismos de difusão e às condições experimentais adotadas.

Para *Candida albicans*, observou-se halo médio de $17,3 \pm 0,6$ mm para o filme de amido e quitosana e $22,3 \pm 0,6$ mm para o filme de amido, quitosana e curcumina. Considerando os

discos de difusão com diâmetro de 15 mm, esses valores correspondem a halos efetivos de aproximadamente 1,15 e 3,65, respectivamente. Esses resultados indicam a formação de zonas de inibição mensuráveis, com aumento da largura efetiva da região inibida na presença da curcumina.

A literatura reporta que a atividade antifúngica de filmes poliméricos frente a *Candida albicans* tende a ser menos pronunciada quando comparada à atividade antibacteriana (KE *et al.*, 2021; KONG *et al.*, 2010). As matrizes poliméricas contendo compostos bioativos, como curcumina, compostos fenólicos ou óleos essenciais, têm sido associadas à formação de zonas de inibição contra *Candida albicans*, frequentemente descritas na faixa aproximada de ~11–20 mm. Esses valores refletem a contribuição dos agentes antifúngicos incorporados à matriz, bem como limitações relacionadas à difusão, à solubilidade e à interação polímero-bioativo. (BALOUIRI *et al.*, 2016; KE *et al.*, 2021; MUÑOZ-TEBAR *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o desempenho do filme ternário mostra-se coerente com matrizes descritas como ativas frente a leveduras. A interpretação dos resultados deve considerar as diferenças metodológicas entre estudos, particularmente no que se refere ao diâmetro dos discos, à concentração dos agentes ativos e às condições experimentais de difusão.

A análise estatística reforçou essas observações, com a ANOVA de um fator indicando efeito significativo da formulação do filme sobre o diâmetro dos halos para todos os microrganismos ($p < 0,05$). O teste de Tukey confirmou que o filme de amido, quitosana e curcumina apresentou halos estatisticamente superiores ao filme contendo apenas quitosana, enquanto as formulações sem quitosana permaneceram estatisticamente equivalentes.

Do ponto de vista microbiológico, a maior sensibilidade de *Staphylococcus aureus* (Gram-positiva) em relação a *Escherichia coli* (Gram-negativa) e *Candida albicans* (levedura) está diretamente relacionada às diferenças estruturais entre bactérias Gram-positivas, Gram-negativas e leveduras (GOW *et al.*, 2017; LEITE, 2011; SILHAVY *et al.*, 2010).

As bactérias Gram-positivas apresentam uma parede celular espessa composta predominantemente por peptidoglicano, porém não possuem membrana externa, o que favorece a interação direta entre a superfície celular e polímeros catiônicos como a quitosana (BREIJEYH *et al.*, 2020; NASAJ *et al.*, 2024). Em meio ácido, a quitosana encontra-se protonada, possibilitando interações eletrostáticas com grupos aniônicos da parede celular bacteriana, promovendo alterações na permeabilidade da membrana, desorganização estrutural e consequente inibição do crescimento microbiano (KE *et al.*, 2021; KONG *et al.*, 2010; NASAJ *et al.*, 2024).

Em contraste, bactérias Gram-negativas, como *E. coli*, apresentam uma membrana externa adicional rica em lipopolissacarídeos, que atua como barreira física e eletrostática à penetração de agentes antimicrobianos, reduzindo a eficiência da interação com polímeros catiônicos (BREIJYEH *et al.*, 2020; KE *et al.*, 2021; KONG *et al.*, 2010; NASAJ *et al.*, 2024). No caso de *Candida albicans*, a presença de uma parede celular mais complexa, constituída por quitina, β -glucanos e manoproteínas, confere maior resistência à ação de compostos antimicrobianos, o que explica a menor extensão dos halos observados quando comparada às bactérias. Essa diferença estrutural entre os microrganismos justifica a hierarquia de sensibilidade observada nos ensaios de difusão em ágar (BANDA-FLORES *et al.*, 2025; BOWMAN *et al.*, 2006; GOW *et al.*, 2017; KONG *et al.*, 2010).

Considerando o caráter do ensaio de difusão em ágar, que favorece formulações com maior capacidade de liberação e difusão do agente ativo (BALOUIRI *et al.*, 2016), os resultados indicam que a associação entre quitosana e curcumina em matriz de amido potencializa significativamente a atividade antimicrobiana, superando as limitações observadas para a curcumina isolada (KONG *et al.*, 2010; MUÑOZ-TEBAR *et al.*, 2023; PRIYADARSINI *et al.*, 2014). Assim, mesmo após a normalização pelos diferentes diâmetros de disco utilizados na literatura, os halos observados posicionam o filme composto por amido, quitosana e curcumina entre os filmes biodegradáveis com desempenho antimicrobiano mais elevado, reforçando seu potencial para aplicações em embalagens ativas.

5.10 Ensaio de degradação em solo

A degradação em solo dos filmes foi avaliada ao longo de 60 dias, tendo a massa remanescente (%) como variável-resposta, de modo a permitir a comparação direta entre as diferentes formulações. A Tabela 8 apresenta as massas iniciais médias e a massa remanescente (%) dos filmes biodegradáveis após 15, 30 e 60 dias de degradação em solo, bem como as diferenças estatísticas entre as formulações avaliadas, permitindo uma análise quantitativa do efeito da composição polimérica sobre a cinética de degradação.

Tabela 8- Massa inicial e massa remanescente dos filmes durante a degradação em solo

Formulação	Massa Inicial (g)	Massa Remanescente (%)		
		15 dias	30 dias	60 dias
Amido	0,26 $\pm$ 0,05	20,8 $\pm$ 0,4 ^d	0 $\pm$ 0 ^c	0 $\pm$ 0 ^c
Amido e Curcumina	0,26 $\pm$ 0,06	40 $\pm$ 2 ^c	38 $\pm$ 2 ^b	0 $\pm$ 0 ^c
Amido e Quitosana	0,28 $\pm$ 0,05	59,6 $\pm$ 0,6 ^b	50 $\pm$ 3 ^a	20,4 $\pm$ 0,8 ^b
Amido, Curcumina e Quitosana	0,27 $\pm$ 0,04	70 $\pm$ 4 ^a	59,4 $\pm$ 0,3 ^a	28 $\pm$ 1 ^a

Nota: Valores expressos como média $\pm$ desvio padrão (n = 3). Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Fonte: O autor (2026)

De forma complementar, a Tabela 9 apresenta os valores de biodegradação (%), calculados a partir da perda de massa dos filmes conforme a Equação 3, permitindo uma interpretação direta do grau de degradação ao longo do tempo.

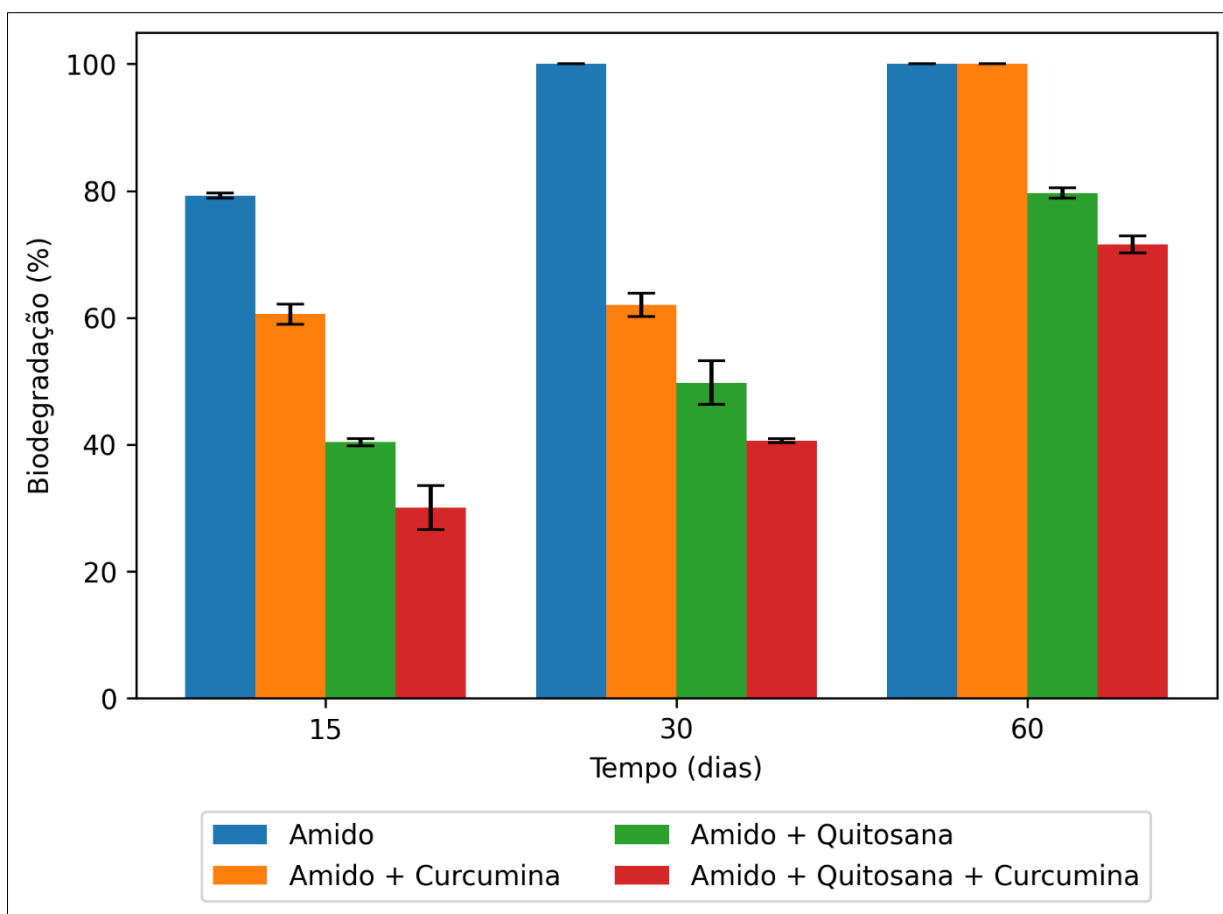
Tabela 9 - Percentual de biodegradação dos filmes ao longo do ensaio de degradação em solo

Biodegradação (%)		
15 dias	30 dias	60 dias
79,24 ± 0,42	100,00 ± 0,00	100,00 ± 0,00
60,54 ± 1,60	62,03 ± 1,83	100,00 ± 0,00
40,36 ± 0,57	49,75 ± 3,42	79,63 ± 0,82
30,05 ± 3,49	40,62 ± 0,27	71,57 ± 1,35

Fonte: O autor (2026)

A representação gráfica desses resultados, apresentada na Figura 26, evidencia a cinética de degradação dos filmes em termos de biodegradação (%), permitindo uma comparação mais clara entre as formulações ao longo do período estudado.

Figura 26- Percentual de biodegradação em solo dos filmes ao longo de 60 dias



Fonte: O autor (2026)

As diferenças observadas entre as formulações ao longo do período de degradação indicam que a composição da matriz polimérica exerce influência significativa sobre a massa

remanescente dos filmes. Para avaliar esse comportamento, realizou-se análise de variância (ANOVA) de um fator, considerando o tipo de filme como fator experimental, sendo a análise conduzida separadamente para 15, 30 e 60 dias.

Os resultados indicaram efeito significativo da formulação em todos os tempos avaliados: 15 dias ($F = 376,10$; $p = 6,03 \times 10^{-9}$), 30 dias ($F = 541,05$; $p = 1,42 \times 10^{-9}$) e 60 dias ($F = 1006,31$; $p = 1,20 \times 10^{-10}$). Em seguida, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey ($p < 0,05$), confirmando as diferenças estatísticas entre as formulações em cada tempo avaliado.

Os resultados corroboram a influência significativa da composição da matriz polimérica sobre a estabilidade dos filmes ao longo do tempo, conforme evidenciado pelos valores de massa remanescente (%) apresentados na Tabela 8 e pelos valores de biodegradação (%) apresentados na Tabela 9 e na Figura 26.

O filme constituído exclusivamente por amido apresentou o comportamento mais suscetível à biodegradação em solo, com massa remanescente de apenas $20,8 \pm 0,4\%$ aos 15 dias e degradação completa aos 30 dias, o que corresponde a valores de biodegradação superiores a 79% já nos primeiros 15 dias e 100% a partir de 30 dias. Esse resultado é consistente com o comportamento esperado para matrizes amiláceas, cuja elevada suscetibilidade à degradação está associada à natureza hidrofílica do polímero, à presença de ligações glicosídicas facilmente hidrolisáveis e à rápida assimilação por microrganismos do solo (CAJADO *et al.*, 2016; FARIAS *et al.*, 2016). Na literatura, estudos prévios reportam perdas de massa expressivas para filmes à base de amido plastificados com glicerol, com reduções de aproximadamente 65% após 12 dias de exposição ao solo, evidenciando a rápida desintegração desses materiais em condições ambientais (LIMA *et al.*, 2021).

A incorporação de curcumina ao filme de amido promoveu um retardo parcial da degradação, resultando em massa remanescente de $40 \pm 2\%$ aos 15 dias e $38 \pm 2\%$ aos 30 dias, correspondendo a biodegradações de aproximadamente 60% e 62%, respectivamente. Embora a degradação tenha sido completa ao final de 60 dias, esses resultados indicam alteração significativa na cinética de degradação ($p < 0,05$). Esse comportamento pode estar relacionado a alterações na organização da matriz polimérica decorrentes da incorporação da curcumina, que podem influenciar temporariamente a acessibilidade da matriz aos microrganismos e enzimas envolvidas na degradação, sem impedir sua degradação completa ao longo do tempo (DEVI *et al.*, 2025; LI, Xiquan *et al.*, 2024; ROY; RHIM, 2020).

Ainda que diferentes parâmetros tenham sido empregados para descrever o processo de degradação, os resultados observados são coerentes com as tendências relatadas na literatura.

A maior fração de massa remanescente verificada nos filmes contendo curcumina reflete comportamento cinético compatível com a redução do índice de biodegradabilidade previamente reportada para matrizes amiláceas modificadas com esse composto. A incorporação de 3% de curcumina reduziu o parâmetro de biodegradabilidade de $2,31 \pm 0,55$ (controle) para $1,45 \pm 0,06$, correspondendo a uma diminuição relativa de aproximadamente 37%, efeito atribuído ao fortalecimento das interações intermoleculares e à redução da difusão de água na matriz polimérica (ERNA *et al.*, 2022).

Os filmes contendo quitosana, isoladamente ou em combinação com a curcumina, apresentaram os menores valores de biodegradação ao longo de todo o ensaio, evidenciando maior resistência à biodegradação em solo. O filme de amido e quitosana apresentou biodegradação de aproximadamente 40%, 50% e 79% aos 15, 30 e 60 dias, respectivamente, enquanto o filme ternário apresentou os menores valores, com cerca de 30%, 41% e 72% nos mesmos tempos. Esse comportamento é amplamente atribuído à estrutura semicristalina da quitosana, à maior densidade de ligações intermoleculares e à sua menor suscetibilidade à hidrólise rápida, o que dificulta a ação microbiana direta sobre a matriz (KUMAR *et al.*, 2020; RINAUDO *et al.*, 2006).

Ainda que diferentes parâmetros tenham sido empregados para descrever o processo de degradação, os resultados observados são coerentes com as tendências relatadas na literatura. Estudos demonstram que a incorporação de quitosana em filmes amiláceos promove retardo significativo da degradação em solo, sendo reportadas reduções na taxa de degradação de até 46% em solo compostado e 44% em solo de cultivo para filmes compósitos de amido contendo nanopartículas de quitosana, o que evidencia a maior estabilidade estrutural dessas matrizes em comparação às matrizes de amido puro. Sob a perspectiva cinética, a redução da taxa de degradação implica, necessariamente, maior fração de massa remanescente em tempos intermediários, comportamento compatível com os resultados obtidos neste estudo (OTHMAN *et al.*, 2023).

O filme de amido, quitosana e curcumina apresentou o comportamento mais estável frente à degradação em solo, sendo estatisticamente superior às demais formulações em todos os tempos avaliados ($p < 0,05$). Esse resultado indica um efeito sinérgico entre a quitosana e a curcumina, no qual a quitosana contribui para o aumento da resistência estrutural da matriz, enquanto a curcumina reduz a permeabilidade à água e a atividade microbiana, retardando o processo de degradação (LI, Han *et al.*, 2023; RACHTANAPUN *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2021).

Em estudos de degradação em solo, tem sido observado que filmes de quitosana incorporados com curcumina apresentam comportamento dependente da concentração do composto bioativo. A incorporação de curcumina em baixa concentração ($2,5 \mu\text{M}$) promoveu redução expressiva dos parâmetros de degradação, com valores decrescendo de $15,3 \pm 2,1$ (controle – QTS) para $6,1 \pm 0,7$, evidenciando efeito estabilizante significativo. Contudo, com o aumento da concentração de curcumina, o comportamento dos filmes tornou-se estatisticamente semelhante ao material controle, indicando que o efeito da curcumina é fortemente influenciado por sua distribuição e interação com a matriz polimérica (SILVA; BARBOSA; PEDRO, 2025).

A maior estabilidade observada nos filmes contendo quitosana pode estar associada à combinação de fatores estruturais, físico-químicos e microbiológicos. Embora a atividade antimicrobiana possa contribuir para a redução da colonização microbiana inicial, o comportamento frente à degradação em solo parece estar relacionado, em maior medida, às modificações na matriz polimérica. A presença de quitosana e curcumina pode influenciar propriedades como difusão de água, acessibilidade enzimática e coesão estrutural. De forma complementar, os resultados de FTIR, ensaios mecânicos e análises térmicas (TGA/DSC) sugerem a formação de uma rede polimérica mais coesa e energeticamente estável, o que pode contribuir para o retardo da degradação observado.

Do ponto de vista ambiental, os resultados obtidos demonstram que as formulações desenvolvidas apresentam potencial para substituir os plásticos sintéticos de origem fóssil, os quais podem persistir no ambiente por centenas de anos (ANDRADY *et al.*, 2015; GEYER *et al.*, 2017). A degradação controlada observada, especialmente nas formulações contendo quitosana e curcumina, representa uma característica estratégica, uma vez que permite ajustar a vida útil do material conforme a aplicação desejada. Esse aspecto é considerado essencial no desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes, nas quais a estabilidade funcional deve ser mantida durante o período de uso, seguida por uma degradação ambientalmente adequada após o descarte (PRIYADARSHI *et al.*, 2020; RHIM *et al.*, 2013).

Nesse contexto, o desenvolvimento desses filmes está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), particularmente ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e o ODS 14 (Vida na Água), uma vez que materiais biodegradáveis contribuem para a mitigação da geração de resíduos plásticos persistentes e para a redução dos impactos ambientais associados aos polímeros sintéticos convencionais (UNITED NATIONS, 2015; GEYER *et al.*, 2017). Além disso, a utilização de polímeros naturais renováveis, aditivos de origem vegetal e processos de

síntese em meio aquoso atende diretamente aos princípios da Química Verde, como o uso de matérias-primas renováveis, redução da toxicidade e promoção da degradação ambientalmente segura (ANASTAS; WARNER, 2025; CLARK; DESWARTE, 2008).

Assim, as formulações propostas não apenas apresentam desempenho funcional adequado, mas também se configuram como alternativas sustentáveis e tecnologicamente viáveis para mitigar os impactos associados aos plásticos convencionais.

5.11 Avaliação qualitativa da resposta colorimétrica ao pH e da atividade antimicrobiana de filmes biodegradáveis

A Figura 27 apresenta a resposta colorimétrica dos filmes biodegradáveis submetidos a diferentes condições de pH, com valores variando de 1 a 14, permitindo avaliar o comportamento visual das formulações em função da acidez e alcalinidade do meio, evidenciando o papel da curcumina como agente sensível ao pH.

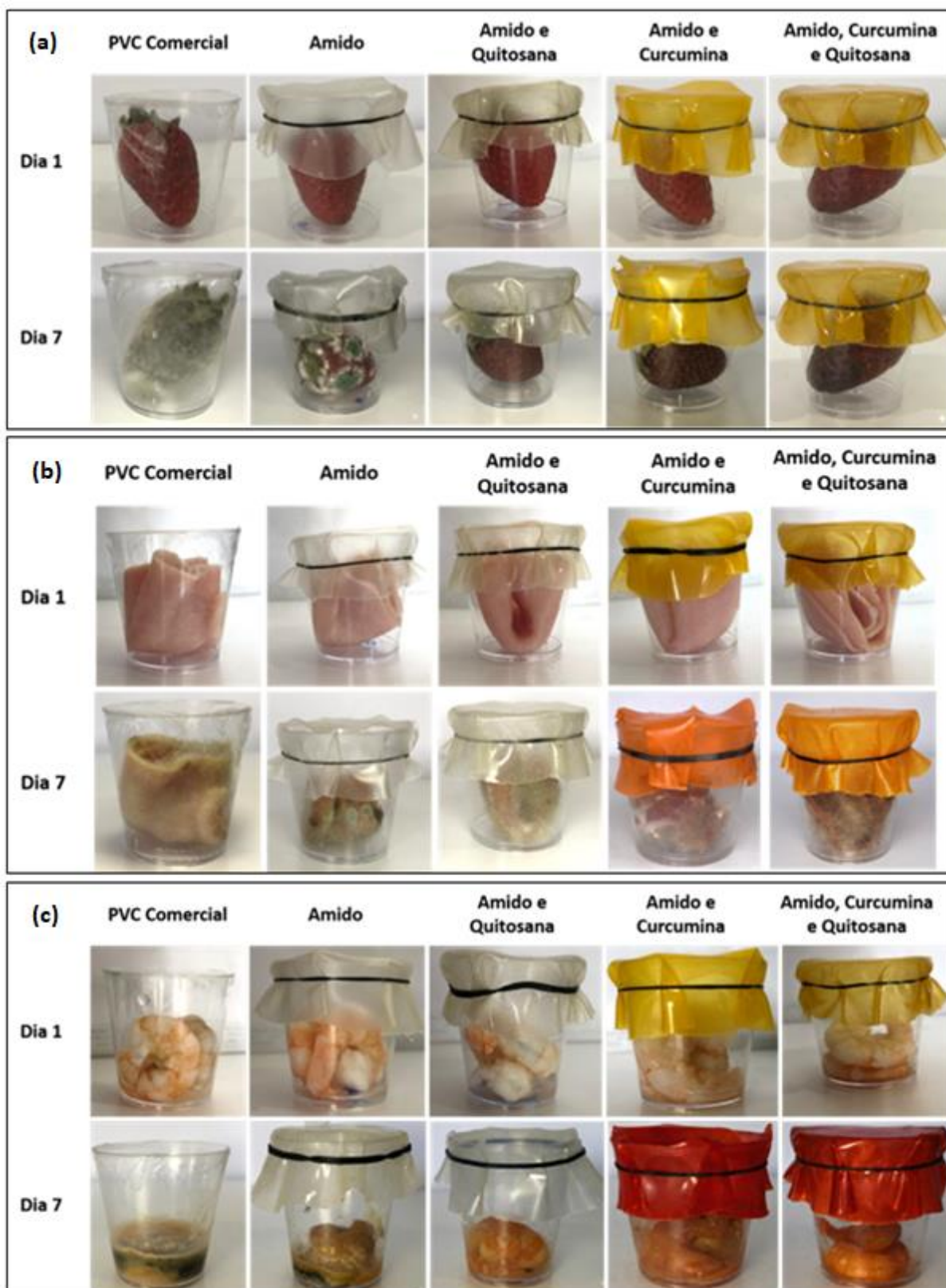
Figura 27- Resposta colorimétrica dos filmes biodegradáveis em função do pH

	pH													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Amido														
Amido e Quitosana														
Amido e Curcumina														
Amido, Quitosana e Curcumina														

Fonte: O autor (2026)

A Figura 28 mostra o desempenho dos filmes biodegradáveis sintetizados neste trabalho durante o armazenamento de alimentos perecíveis, especificamente camarão, morango e presunto, mantidos à temperatura ambiente por um período de sete dias. Os filmes desenvolvidos foram comparados ao plástico filme de PVC comercial, utilizado como controle. As imagens registram as alterações progressivas no aspecto dos alimentos, incluindo exsudação, escurecimento, mudanças de textura e aparecimento de sinais visuais de deterioração, bem como as variações de coloração observadas nos filmes contendo curcumina. Essa análise visual possibilita avaliar, de forma comparativa, a aplicabilidade dos filmes como embalagens ativas e inteligentes, além de sua capacidade de indicar alterações associadas ao processo de deterioração dos alimentos.

Figura 28- Desempenho dos filmes na conservação de (a) morango, (b) presunto e (c) camarão



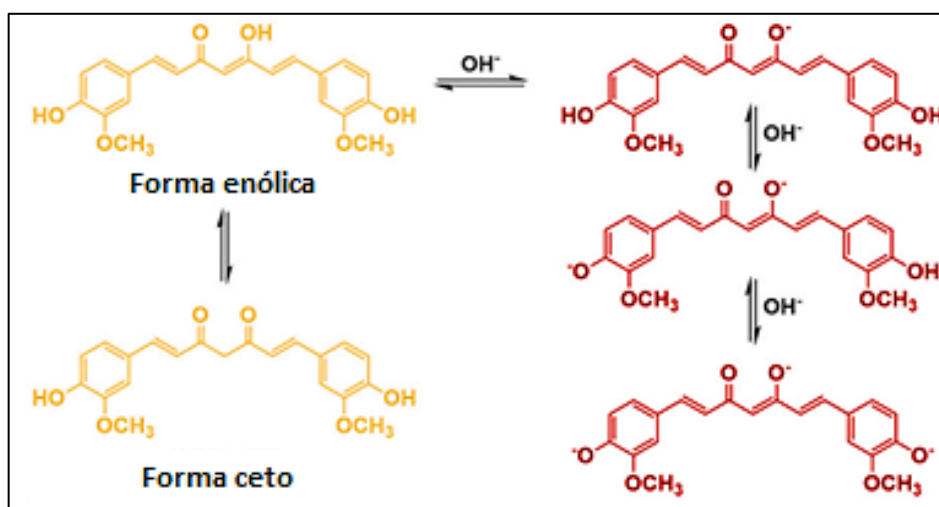
Fonte: O autor (2026)

A comparação entre a Figura 27 e a Figura 28 indica que os filmes contendo curcumina responderam de forma sensível às alterações químicas do meio interno das embalagens ao longo

do tempo. Inicialmente, a coloração amarela dos filmes é compatível com condições levemente ácidas ($\text{pH} \approx 5\text{--}7$), típicas de alimentos frescos como morango, presunto e camarão (PRIYADARSHI *et al.*, 2020; ROY; RHIM, 2020). No entanto, com o avanço do processo de deterioração, especialmente a partir do quarto dia de armazenamento, observa-se uma mudança abrupta da coloração para tons alaranjados e avermelhados, semelhantes aos registrados na escala de pH em meios alcalinos, sugerindo que o ambiente interno das embalagens atingiu valores de pH estimados entre 10 e 12. Essa elevação do pH está associada à liberação de metabólitos voláteis alcalinos, como aminas e amônia, resultantes da degradação proteica e da atividade microbiana (KUSWANDI *et al.*, 2011; LIN *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2025; WANG *et al.*, 2024).

O mecanismo de mudança de cor está diretamente relacionado às transformações estruturais da curcumina em função do pH, como mostra a Figura 29. Em meio ácido ou neutro, a curcumina permanece predominantemente na forma enólica, apresentando coloração amarela. À medida que o pH se eleva, ocorre a desprotonação dos grupos fenólicos e a formação de espécies ionizadas, promovendo rearranjos eletrônicos na molécula que resultam em um deslocamento do máximo de absorção para comprimentos de onda maiores, manifestando-se visualmente como colorações alaranjadas a vermelhas. Esse comportamento explica a resposta rápida e intensa observada nos filmes contendo curcumina, especialmente na presença de compostos alcalinos liberados durante a deterioração dos alimentos (TONNESEN *et al.*, 1985; WANG *et al.*, 2024).

Figura 29- Mecanismo de mudança de cor da curcumina em função do pH



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

A escolha do camarão, do presunto e do morango como matrizes alimentares para este ensaio baseou-se tanto em seu elevado valor agregado quanto em sua alta suscetibilidade à

deterioração. O camarão e o presunto são ricos em proteínas, favorecendo processos de degradação microbiana que resultam na produção de compostos nitrogenados voláteis alcalinos (TEMDEE *et al.*, 2021; VANIN, 2010), enquanto o morango apresenta elevada atividade de água e conteúdo de açúcares, o que o torna altamente perecível e propenso ao desenvolvimento de microrganismos deteriorantes (GIFFONI *et al.*, 2024). Dessa forma, esses alimentos constituem modelos representativos para avaliar a eficiência de embalagens ativas e inteligentes.

Durante o experimento, observou-se que, a partir do segundo dia de armazenamento, já havia liberação de odor desagradável no camarão, acompanhada da formação de líquido no interior do copo, fenômeno também verificado para o presunto, indicando exsudação e início de degradação. A partir do terceiro dia, tornou-se evidente a presença de bolor em algumas amostras, especialmente naquelas acondicionadas com o plástico filme convencional e com filmes sem agentes ativos. A resposta colorimétrica dos filmes contendo curcumina foi rápida e marcante a partir do quarto dia, coincidindo com o agravamento dos sinais de deterioração. Em nenhuma amostra foram observadas cores intermediárias entre a coloração inicial e a final, sugerindo que a transição de pH no ambiente interno ocorreu de forma brusca, ultrapassando rapidamente a faixa de estabilidade da curcumina em meio neutro e levando diretamente à formação das espécies alcalinas responsáveis pela coloração vermelha. Esses resultados reforçam o potencial dos filmes desenvolvidos como indicadores visuais eficientes do estado de deterioração de alimentos perecíveis.

6 CONCLUSÃO

Diante da crescente demanda por materiais sustentáveis e funcionais para embalagens alimentícias, este estudo concentrou-se no desenvolvimento e na caracterização de filmes biodegradáveis à base de amido incorporados com curcumina e quitosana, avaliando seu potencial para aplicação em embalagens ativas e inteligentes. A partir da adaptação do método de *casting*, foi possível obter filmes contínuos, homogêneos e visualmente estáveis, adequados às diferentes etapas de caracterização físico-química, térmica, mecânica, morfológica, microbiológica e funcional. Os resultados obtidos permitiram analisar de forma integrada a influência da composição da matriz polimérica e das condições de processamento sobre as propriedades dos filmes, bem como sua aplicabilidade no contexto da conservação e do monitoramento da qualidade de alimentos perecíveis.

As análises espectroscópicas por FTIR e UV-Vis confirmaram a presença dos componentes na matriz polimérica e indicaram interações intermoleculares entre o amido, a quitosana e a curcumina, sem evidências de degradação química dos constituintes durante o processamento. Os ensaios térmicos (TG e DSC) demonstraram que os filmes apresentam comportamento térmico compatível com materiais poliméricos biodegradáveis à base de polissacarídeos, com estabilidade suficiente para aplicações em embalagens de alimentos.

A avaliação das propriedades físicas evidenciou variações significativas na espessura dos filmes, confirmadas estatisticamente por ANOVA de um fator e teste de Tukey, sendo essas diferenças atribuídas principalmente à etapa de espalhamento da solução filmogênica sobre as placas de vidro. Ainda assim, os valores obtidos encontram-se em concordância com faixas reportadas na literatura para filmes de amido produzidos por *casting*, considerando variações de formulação e condições de processamento.

As propriedades mecânicas e a solubilidade em água indicaram desempenho compatível com aplicações em embalagens flexíveis, especialmente quando consideradas as limitações inerentes a materiais hidrofílicos. A solubilidade variou de $53,4 \pm 2\%$ (amido) para $65,8 \pm 6\%$ (amido + curcumina), apresentando aumento estatisticamente significativo, enquanto o filme ternário apresentou $52,0 \pm 1\%$, sem diferença significativa em relação ao amido puro. Em termos mecânicos, a incorporação de quitosana promoveu aumento da elongação na ruptura, atingindo $28 \pm 8\%$ no filme ternário, em comparação aos filmes sem quitosana, além de redução do módulo de elasticidade para $1,85 \pm 0,07$ MPa, indicando maior deformabilidade e menor rigidez.

A análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura revelou superfícies relativamente homogêneas, sem descontinuidades significativas, corroborando a boa miscibilidade entre os componentes da matriz polimérica. O teste de biodegradabilidade em solo confirmou a capacidade de degradação dos filmes, com redução da massa remanescente para $70 \pm 4\%$ em 15 dias, $59,4 \pm 0,3\%$ em 30 dias e $28 \pm 1\%$ em 60 dias para o filme ternário, enquanto os filmes de amido e amido e curcumina apresentaram degradação completa ao final do período, evidenciando diferenças na cinética de degradação entre as formulações e reforçando o potencial desses materiais como alternativa ambientalmente sustentável aos polímeros sintéticos convencionais.

Os ensaios microbiológicos demonstraram que os filmes contendo quitosana apresentaram atividade antimicrobiana frente aos microrganismos avaliados, com halos de inibição de até $30,0 \pm 1,0$ mm para *Staphylococcus aureus*, $24,7 \pm 0,6$ mm para *Escherichia coli* e $22,3 \pm 0,6$ mm para *Candida albicans*, enquanto as formulações contendo curcumina contribuíram para a funcionalidade adicional do material. Os testes qualitativos de armazenamento de alimentos evidenciaram a resposta colorimétrica dos filmes contendo curcumina em resposta às alterações de pH decorrentes da deterioração, indicando sua aplicabilidade como indicadores visuais de frescor em embalagens inteligentes. A mudança de cor observada mostrou-se clara e facilmente perceptível, associada à liberação de metabólitos voláteis durante a degradação dos alimentos, especialmente em alimentos ricos em proteínas.

De forma integrada, os resultados obtidos demonstram que os filmes desenvolvidos reúnem características fundamentais para aplicação em embalagens ativas e inteligentes, aliando biodegradabilidade, funcionalidade antimicrobiana e capacidade de monitoramento visual do estado de conservação dos alimentos. O trabalho contribui diretamente para o desenvolvimento de materiais sustentáveis alinhados aos princípios da Química Verde, ao empregar matérias-primas renováveis, solventes predominantemente aquosos, condições brandas de processamento e materiais com capacidade de degradação ambiental. Além disso, os resultados dialogam com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao propor alternativas tecnológicas viáveis para a redução do uso de plásticos sintéticos e do desperdício de alimentos.

Como perspectivas futuras, recomenda-se aprofundar os estudos relacionados à otimização do processo de formação dos filmes, especialmente no controle da etapa de espalhamento da solução filmogênica, visando reduzir a variabilidade de espessura e melhorar a reprodutibilidade do material. Avaliações quantitativas da atividade antimicrobiana e da

resposta colorimétrica, associadas a análises cinéticas e instrumentais, podem fornecer informações adicionais sobre a eficiência e o tempo de resposta dos filmes em condições reais de armazenamento.

Estudos de vida de prateleira com alimentos embalados sob condições controladas, bem como a avaliação da migração de componentes e da segurança alimentar conforme legislações vigentes, também se mostram relevantes para viabilizar a aplicação industrial dos filmes. Além disso, investigações sobre a incorporação de outros compostos bioativos naturais ou o uso de estratégias de encapsulação da curcumina podem contribuir para ampliar a estabilidade e a funcionalidade das formulações desenvolvidas.

Por fim, a análise do desempenho dos filmes em escala piloto e a avaliação de seu impacto ambiental por meio de ferramentas como análise do ciclo de vida (ACV) representam etapas fundamentais para consolidar esses materiais como alternativas sustentáveis aos polímeros sintéticos convencionais no contexto de embalagens alimentícias.

REFERÊNCIAS

ADISSON, E. *et al.* Evaluation of the heterogeneity in linear low-density polyethylene comonomer unit distribution by differential scanning calorimetry characterization of thermally treated samples. **Polymer**, [S.L.], v. 33, n. 20, p. 4337-4342, jan. 1992. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0032-3861\(92\)90276-3](http://dx.doi.org/10.1016/0032-3861(92)90276-3).

AFZAL, Ali *et al.* Development and characterization of biodegradable composite film. **Environmental Technology & Innovation**, [S.L.], v. 23, p. 101664, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2021.101664>.

AL-AMIN, Kazi *et al.* Fourier transform infrared spectroscopic technique for analysis of inorganic materials: a review. **Nanoscale Advances**, [S.L.], v. 7, n. 21, p. 6677-6702, 2025. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d5na00522a>.

ALVARADO, Nancy *et al.* Two Fascinating Polysaccharides: chitosan and starch. some prominent characterizations for applying as eco-friendly food packaging and pollutant remover in aqueous medium. progress in recent years. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 11, p. 1737, 26 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13111737>.

AMANI, Fateme *et al.* **Active packaging films made by complex coacervation of tragacanth gum and gelatin loaded with curcumin: characterization and antioxidant activity.** *Foods*, [S.L.], v. 11, n. 20, p. 3168, 11 out. 2022. MDPI. <http://dx.doi.org/10.3390/foods11203168>.

ANASTAS, Paul T.; WARNER, John C.. **Química Verde: teoria e prática.** Tradução de: Cintia de Freitas Duarte Milagres, Dulce Helena Siqueira Silva, Juliana Vidal. São Paulo: Unesp, 2025. 160 p.

ANDRADY, Anthony L. *et al.* Persistence of Plastic Litter in the Oceans. **Marine Anthropogenic Litter**, [S.L.], p. 57-72, 2015. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_3.

APRILIYANI, M W *et al.* Physico-chemical and antimicrobial properties of caseinchitosan edible films as food quality and food safety. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 443, n. 1, p. 012018, 1 fev. 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/443/1/012018>.

ARAÚJO, Ana Claudia de Lima. **Síntese de líquidos iônicos baseados em biomoléculas e sua aplicação na formulação de filmes de amido.** 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) — Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/11084/1/ACLA01082018.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2025.

ARAÚJO, Francisca *et al.* Effect of Chitosan Properties and Dissolution State on Solution Rheology and Film Performance in Triboelectric Nanogenerators. **Gels**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 523, 5 jul. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/gels11070523>.

ARAÚJO, Maria Nicheilly Pontes. **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES ATIVOS DE AMIDO DE MILHO ADITIVADOS COM ÓLEO ESSENCIAL DE CÚRCUMA (Cúrcuma Longa L.)**. 2021. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência de Materiais, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

ARIAS, Luna Valentina Angulo *et al.* Plant-Based Films for Food Packaging as a Plastic Waste Management Alternative: potato and cassava starch case. **Polymers**, [S.L.], v. 16, n. 17, p. 2390, 23 ago. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym16172390>.

ASSIS, Letícia Marques de *et al.* Revisão: características de nanopartículas e potenciais aplicações em alimentos. **Brazilian Journal Of Food Technology**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 99 109, abr. 2012. 67232012005000004.

ASTM D638-14. (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA.

AVÉROUS, Luc. Biodegradable Multiphase Systems Based on Plasticized Starch: a review. **Journal Of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews**, [S.L.], v. 44, n. 3, p. 231-274, 30 dez. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1081/mc-200029326>.

AVÉROUS, Luc; HALLEY, Peter J.. Biocomposites based on plasticized starch. **Biofuels, Bioproducts And Biorefining**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 329-343, abr. 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.135>.

AYYUBI, Shalahudin Nur *et al.* The effect of composition on mechanical properties of biodegradable plastic based on chitosan/cassava starch/PVA/crude glycerol: optimization of the composition using box behnken design. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 63, p. 78-83, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.294>.

BAGHI, Fatemeh *et al.* Advancements in Biodegradable Active Films for Food Packaging: effects of nano/microcapsule incorporation. **Foods**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 760, 6 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/foods11050760>.

BALABAN, Petra; PULKA, Adis. INFLUENCE OF PACKAGING PROCESS ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE FLEXIBLE PACKAGING MATERIALS. **Advanced Engineering Letters**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 65-70, jul. 2022. University Library in Kragujevac. <http://dx.doi.org/10.46793/adeletters.2022.1.2.5>.

BALLESTEROS-MÁRTINEZ, Lucio *et al.* Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film. **Nfs Journal**, [S.L.], v. 20, p. 1-9, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nfs.2020.06.002>.

BALOUIRI, Mounyr; SADIKI, Moulay; IBNSOUDA, Saad Koraichi. Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: a review. **Journal Of Pharmaceutical Analysis**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 71-79, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpha.2015.11.005>.

BANDA-FLORES, Iván A. *et al.* Resilience in Resistance: the role of cell wall integrity in multidrug-resistant candida. **Journal Of Fungi**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 271, 1 abr. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/jof11040271>.

BARBOSA, Cesar; ZANIN, Iriana. *Antibiograma: método de difusão em ágar (método de Kirby–Bauer): roteiro de aula prática*. Sobral: Universidade Federal do Ceará, 2010. Material didático da disciplina **Módulo de Processos Infecciosos**, Curso de Odontologia – Campus Sobral.

BARNABÉ, Bárbara Piacesi *et al.* Produção de bioplástico a partir de casca de batata. In: Congresso Nacional Universidade, EAD e Software Livre, 11., 2020. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2020. p. 1-6.

BARUFALDI, Mauricio. Gelatinização do amido (*starch gelatinization*): processo que quebra as ligações intermoleculares. *LinkedIn*, 2023. Disponível em: <https://acesse.one/imc6nbw>. Acesso em: 1 abr. 2026.

BAUER, A. W. *et al.* Antibiotic Susceptibility Testing by a Standardized Single Disk Method. **American Journal Of Clinical Pathology**, [S.L.], v. 45, n. 4, p. 493-496, 1 abr. 1966. Oxford University Press (OUP). http://dx.doi.org/10.1093/ajcp/45.4_ts.493.

BEZERRA, Anderson Campos. **FILMES DE QUITOSANA ADITIVADOS COM EXTRATO DE HORTELÃ- PIMENTA (Mentha Piperita L.) PARA APLICAÇÃO EM MASSA BRISEÉ**. 2018. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

BILIADERIS, Costas G.. Structural Transitions and Related Physical Properties of Starch. **Starch**, [S.L.], p. 293-372, 2009. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-746275-2.00008-2>.

BISHNOI, Ankit *et al.* Mechanical Strength, Solubility, and Functional Studies of Developed Composite Biopolymeric Film. **Journal Of Food Processing And Preservation**, [S.L.], v. 2023, p. 1-19, 8 nov. 2023. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1155/2023/5108490>.

BISPO, Brenda dos Santos. **DESENVOLVIMENTO DE FILME ATIVO INCORPORADO COM EXTRATOS DE LÚPULO**. 2024. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Alimentos, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Bambuí, 2024.

BOURTOOM, Thawien *et al.* Preparation and properties of rice starch–chitosan blend biodegradable film. **Lwt - Food Science And Technology**, [S.L.], v. 41, n. 9, p. 1633-1641, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2007.10.014>.

BOWMAN, Shaun M. *et al.* The structure and synthesis of the fungal cell wall. **Bioessays**, [S.L.], v. 28, n. 8, p. 799-808, ago. 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/bies.20441>.

BREIJYEH, Zeinab *et al.* Resistance of Gram-Negative Bacteria to Current Antibacterial Agents and Approaches to Resolve It. **Molecules**, [S.L.], v. 25, n. 6, p. 1340, 16 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules25061340>.

BRUGNEROTTO, J *et al.* An infrared investigation in relation with chitin and chitosan characterization. **Polymer**, [S.L.], v. 42, n. 8, p. 3569-3580, abr. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0032-3861\(00\)00713-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0032-3861(00)00713-8).

BULÉON, A. *et al.* Starch granules: structure and biosynthesis. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 85-112, ago. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0141-8130\(98\)00040-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0141-8130(98)00040-3).

CABELLO, S.D. Pasini *et al.* Influence of plasticizers in pectin films: microstructural changes. **Materials Chemistry And Physics**, [S.L.], v. 162, p. 491-497, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.019>.

CAJADO, Luís Felipe B. *et al.* **Produção de biofilmes poliméricos a partir de amido de milho industrial com aplicação de quitosana**. 2016. Disponível em: <https://acesse.one/nv00a>. Acesso em: 14 fev. 2026.

CARRERA, Cecilio *et al.* Effect of deacetylation degree and molecular weight on surface properties of chitosan obtained from biowastes. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 137, p. 108383, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108383>.

CARVALHO, Larissa Andreani *et al.* **As contribuições dos materiais biodegradáveis para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2022. 22 p. (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 21774439 ; 50). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1150131/1/DOC50-final.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2024.

CHAGAS, Ketnen Rieffel das *et al.* BIODEGRADAÇÃO EM SOLO SIMULADO DE POLI(3-HIDROXIBUTIRATO) [P(3HB)] COLORIDO POR DUAS METODOLOGIAS DE INSERÇÃO DE CORANTE. **Revista Contemporânea**, [S.L.], v. 4, n. 7, p. 1-19, 9 jul. 2024. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.56083/rcv4n7-064>.

CHAUHAN, Urvashi *et al.* Role of Active Packaging in the Food Industry: a review. **Journal Of Pharmaceutical Research International**, [S.L.], p. 20-32, 20 set. 2022. Sciencedomain International. <http://dx.doi.org/10.9734/jpri/2022/v34i50b36439>.

CHILLO, S. *et al.* Influence of glycerol and chitosan on tapioca starch-based edible film properties. **Journal Of Food Engineering**, [S.L.], v. 88, n. 2, p. 159-168, set. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.002>.

CLARK, James H.; DESWARTE, Fabien. *Introduction to Chemicals from Biomass*. Chichester: Wiley, 2008.

CLINICAL AND LABORATORY STANDARDS INSTITUTE (CLSI). **Performance Standards for Antimicrobial Disk Susceptibility Tests**. Wayne, PA: CLSI, 2012.

CONFEDERAT, Luminita Georgeta *et al.* Preparation and Antimicrobial Activity of Chitosan and Its Derivatives: a concise review. **Molecules**, [S.L.], v. 26, n. 12, p. 3694, 17 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules26123694>.

CUI, Congli *et al.* Bioactive and intelligent starch-based films: a review. **Trends In Food Science & Technology**, [S.L.], v. 116, p. 854-869, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.024>.

DASH, M. *et al.* Chitosan—A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. **Progress In Polymer Science**, [S.L.], v. 36, n. 8, p. 981-1014, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.02.001>.

DEVI, L. Susmita *et al.* Curcumin as Bioactive Agent in Active and Intelligent Food Packaging Systems: a comprehensive review. **Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety**, [S.L.], v. 24, n. 4, jul. 2025. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.70228>.

DIAO, Yongjia *et al.* Effect of interactions between starch and chitosan on waxy maize starch physicochemical and digestion properties. **Cyta - Journal Of Food**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 327-335, 5 jan. 2017. Informa UK Limited.

DIAS, Arthur V. *et al.* **Influência de diferentes tipos de amido nas propriedades mecânicas de filmes biodegradáveis incorporados com glicerol**. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA**, 63., 2024, Salvador. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Química, 2024. p. 1-8. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/trabalhos/8/A8T25958-1727371657.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

DÍAZ-MONTES, Elsa *et al.* Polysaccharide-Based Biodegradable Films: an alternative in food packaging. **Polysaccharides**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 761-775, 25 nov. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polysaccharides3040044>.

DINCULESCU, Daniel Dumitru *et al.* Simultaneous Optimization of Deacetylation Degree and Molar Mass of Chitosan from Shrimp Waste. **Polymers**, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 170, 6 jan. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym16020170>.

DIRPAN, Andi *et al.* A Review on Biopolymer-Based Biodegradable Film for Food Packaging: trends over the last decade and future research. **Polymers**, [S.L.], v. 15, n. 13, p. 2781, 22 jun. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym15132781>.

DOUAKI, Ali *et al.* Battery-Free, Stretchable, and Autonomous Smart Packaging. **Advanced Science**, [S.L.], v. 12, n. 22, 12 maio 2025. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/advs.202417539>.

DOMENE-LÓPEZ, D. *et al.* Comparative study on properties of starch films obtained from potato, corn and wheat using 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate as plasticizer. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 135, p. 845-854, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.004>.

DOUMBIA, Ahmed; TRAORÉ, Seydou. **Analysis of thermal degradation of biofilms made of cassava starch reinforced with coconut fibers**. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, [S.L.], v. 17, n. 9, p. 1-6, set. 2023. AENSI Publications. DOI: <https://doi.org/10.22587/ajbas.2023.17.9.1>.

DUTTA, Ditimoni; SIT, Nandan. Comprehensive review on developments in starch-based films along with active ingredients for sustainable food packaging. **Sustainable Chemistry And Pharmacy**, [S.L.], v. 39, p. 101534, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scp.2024.101534>.

EICKELPASCH, Katharina *et al.* A bioactivity matrix for antimicrobial activities of chitosans: a review. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 299, p. 140740, abr. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140740>.

EL-SAYED, Saad A. *et al.* Review of thermal decomposition, kinetics parameters and evolved gases during pyrolysis of energetic materials using different techniques. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, [S.L.], v. 161, p. 105364, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105364>.

ENGEL, Kirstin Milbradt. Desenvolvimento de filmes de amido incorporados com película de amendoim preparados por *casting* e termocompressão. 2019. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ERNA, Kana Husna *et al.* Development of curcumin/rice starch films for sensitive detection of hypoxanthine in chicken and fish meat. **Carbohydrate Polymer Technologies And Applications**, [S.L.], v. 3, p. 100189, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100189>.

ESLAMI, Zahra *et al.* A Review of the Effect of Plasticizers on the Physical and Mechanical Properties of Alginate-Based Films. **Molecules**, [S.L.], v. 28, n. 18, p. 6637, 15 set. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules28186637>.

ETEMADI, S. *et al.* The synergistic effect of turmeric aqueous extract and chitosan against multidrug-resistant bacteria. **New Microbes And New Infections**, [S.L.], v. 41, p. 100861, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nmni.2021.100861>.

FARIAS, Viviane de Paula *et al.* **Biodegradabilidade de filmes à base de amido de diferentes origens: influência de fatores edáficos.** *Revista Mirante*, Anápolis, v. 16, n. 1, p. 324–344, 2016.

FATIMA, Saeeda *et al.* Recent advances in modified starch based biodegradable food packaging: a review. **Heliyon**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 27453, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27453>.

FERREIRA, Natália Rodrigues. **Filmes de amido termoplástico com nanocelulose bacteriana: influência na propriedade de barreira a gases.** 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

FIDALGO, Ana Carolina Domingues. Material Polimérico Nanoestruturado para a liberação pH-responsiva da curcumina. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

FORSYTH, Jenna E. *et al.* Turmeric means “yellow” in Bengali: lead chromate pigments added to turmeric threaten public health across bangladesh. **Environmental Research**, [S.L.], v. 179, p. 108722, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2019.108722>.

FRANCO, Paula Consoli Ireno *et al.* Atividade antimicrobiana e caracterização de filmes de amido de mandioca/quitosana, reforçados com fibras de cana-de-açúcar. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 8766-8779, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n2-257>.

FRIEDRICHSEN, Jéssica Souza Alves *et al.* O uso de amido como proposta para embalagens biodegradáveis – Uma revisão. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 11, n. 14, p. 1-7, 27 out. 2022. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36449>.

FUGITA, R. A. *et al.* **Thermal behaviour of curcumin**. *Brazilian Journal of Thermal Analysis*, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 19–23, dez. 2012.

GALINDO, Marcella Vitoria *et al.* Atividade antimicrobiana e antioxidante de filmes comestíveis de gelatina e quitosana adicionados de óleos essenciais. **Segurança Alimentar e Nutricional**, [S.L.], v. 26, p. 1-9, 20 mar. 2019. Universidade Estadual de Campinas. <http://dx.doi.org/10.20396/san.v26i0.8653865>.

GARUTI, Giovana Ladislau *et al.* Nanocellulose reinforced starch biocomposite films via tape casting technique. **Polímeros**, [S.L.], v. 34, n. 1, 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.20230084>.

GEYER, Roland *et al.* Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, [S.L.], v. 3, n. 7, p. 1-5, 7 jul. 2017. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

GHAANI, Masoud *et al.* An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. **Trends In Food Science & Technology**, [S.L.], v. 51, p. 1-11, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.008>.

GHANBARZADEH, Babak *et al.* Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 697-702, out. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2010.06.001>.

GIFFONI, Gabriella F. P. *et al.* **Revestimento de morango à base de amido de milho com bicarbonato de sódio**. In: **16ª JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DO IFSULDEMINAS, 2024**. *Livro de resumos*. IFSULDEMINAS, 2024.

GONZÁLEZ, César Augusto Bacca; SOLER, Diana Edith Molina; GUERRERO, Beatriz Guevara. Propriedades mecânicas de filmes à base de polissacarídeos para embalagens de alimentos: uma revisão. **Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 68-84, 23 jun. 2023. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. <http://dx.doi.org/10.23850/24220582.5589>.

GOW, Neil A. R. *et al.* The Fungal Cell Wall: structure, biosynthesis, and function. **Microbiology Spectrum**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 1-25, 19 maio 2017. American Society for Microbiology. <http://dx.doi.org/10.1128/microbiolspec.funk-0035-2016>.

GOY, Rejane C.; BRITTO, Douglas de; ASSIS, Odilio B. G.. A review of the antimicrobial activity of chitosan. **Polímeros**, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 241-247, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282009000300013>.

GROSSMANN, Maria Victória Eiras *et al.* **Filmes biodegradáveis de amido**. Embrapa Agroindústria Alimentos. Documentos, n. 30, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/30796/1/DOC302007.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

GUN'KO, Vladimir *et al.* Properties of Water Bound in Hydrogels. **Gels**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 37, 19 out. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/gels3040037>.

HASAN, Muhammad *et al.* Thermal, structural and mechanical characterization of bio-nanocomposite films from purple sweet potato starch/chitosan nanoparticles integrated with anthocyanin extract. **Results In Engineering**, [S.L.], v. 25, p. 104448, mar. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104448>.

HE, Beibei *et al.* Biodegradable food packaging films: material source, mechanical and water vapor barrier properties, and improvement strategies.:a comprehensive review. **Food Research International**, [S.L.], v. 211, p. 116431, jun. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116431>.

HOOVER, R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 45, n. 3, p. 253-267, jul. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0144-8617\(00\)00260-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0144-8617(00)00260-5).

HORN, Marilia M. *et al.* Effect of Amylopectin Content on Mechanical, Barrier and Thermal Properties of Plasticized Starch/Chitosan Films. **Polysaccharides**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 208-218, 24 jul. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polysaccharides4030015>.

HORN, Marilia Marta. **Blendas e Filmes de Quitosana/Amido de milho: Estudo da Influência da Adição de Polióis, Oxidação do Amido e Razão de Amilose/Amilopectina nas suas Propriedades**. 2012. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

HUANG, Kehao *et al.* Advances in bio-based smart food packaging for enhanced food safety. **Trends In Food Science & Technology**, [S.L.], v. 159, p. 104960, maio 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104960>.

HUDZICKI, J. *Kirby-Bauer disk diffusion susceptibility test protocol*. Washington, DC: **American Society for Microbiology**, 2009. Disponível em: <https://asm.org/getattachment/2594ce26-bd44-47f6-8287-0657aa9185ad/kirby-bauer-disk-diffusion-susceptibility-test-protocol-pdf.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2026.

IAHNKE, A. O. S. *et al.* Resíduos da indústria nutracêutica e de minimamente processados na produção de filmes biodegradáveis e antioxidantes. In: **SIMPÓSIO DE SEGURANÇA ALIMENTAR**, 5., 2015, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p. 1-4.

IBRAHIM, M.I.J. *et al.* Physical, thermal, morphological, and tensile properties of cornstarch-based films as affected by different plasticizers. **International Journal Of Food Properties**, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 925-941, jan. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2019.1618324>.

KE, Cai-Ling *et al.* Antimicrobial Actions and Applications of Chitosan. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 904, 15 mar. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13060904>.

KIZIL, Ramazan; IRUDAYARAJ, Joseph; SEETHARAMAN, Koushik. Characterization of Irradiated Starches by Using FT-Raman and FTIR Spectroscopy. **Journal Of Agricultural And Food Chemistry**, [S.L.], v. 50, n. 14, p. 3912-3918, 7 jun. 2002. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/jf011652p>.

KONG, Ming *et al.* Antimicrobial properties of chitosan and mode of action: a state of the art review. **International Journal Of Food Microbiology**, [S.L.], v. 144, n. 1, p. 51-63, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.09.012>.

KUMAR, Santosh *et al.* Chitosan based nanocomposite films and coatings: emerging antimicrobial food packaging alternatives. **Trends In Food Science & Technology**, [S.L.], v. 97, p. 196-209, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.002>.

KURITA, Osamu *et al.* Evaluation of water on latex surface by using differential scanning calorimetry. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [S.L.], v. 153, n. 1-3, p. 471-476, ago. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0927-7757\(98\)00469-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0927-7757(98)00469-5).

KUSWANDI, Bambang *et al.* Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety. **Sensing And Instrumentation For Food Quality And Safety**, [S.L.], v. 5, n. 3-4, p. 137-146, 30 nov. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11694-011-9120-x>.

LANGER, Ewa *et al.* Assessment of Traditional Plasticizers. **Plasticizers Derived From Post-Consumer Pet**, [S.L.], p. 1-11, 2020. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-46200-6.00001-5>.

LARKIN, Peter J.. General Outline for IR and Raman Spectral Interpretation. **Infrared And Raman Spectroscopy**, [S.L.], p. 135-151, 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-804162-8.00007-0>.

LEANDRO, Júlio Mancini. **Caracterização de filmes biopoliméricos de quitosana e amido**. 2025. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) — Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Rio Claro, 2025.

LEITE, Inácio Ramos. **Avaliação da Ação de Antibiótico Natural na Fermentação Alcoólica Contaminada por Cultura Mista**. 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

LI, Han *et al.* Preparation of curcumin-chitosan composite film with high antioxidant and antibacterial capacity: improving the solubility of curcumin by encapsulation of biopolymers. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 145, p. 109150, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109150>.

LI, Rou *et al.* Exploring the Sustainable Utilization of Deep Eutectic Solvents for Chitin Isolation from Diverse Sources. **Polymers**, [S.L.], v. 16, n. 22, p. 3187, 16 nov. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym16223187>.

LI, Xin *et al.* Interaction mechanisms of edible film ingredients and their effects on food quality. **Current Research In Food Science**, [S.L.], v. 8, p. 100696, 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100696>.

LI, Xiquan *et al.* Development of starch-based films reinforced with curcumin-loaded nanocomplexes: characterization and application in the preservation of blueberries. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 264, p. 130464, abr. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130464>.

LI, Yu *et al.* Improvement in the optical properties of starch coatings via chemical-physical combination strategy for fruits preservation. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 137, p. 108405, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108405>.

LIMA, Lara Saldanha Neves Horta *et al.* **Produção e caracterização dos filmes biodegradáveis à base de amido de mandioca: influência da temperatura de secagem.** In: MELLO, R. G.; FREITAS, P. G. de (org.). *Variantes do meio ambiente: atuação, interdisciplinaridade e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: e-Publicar, 2021. p. 387–405. <http://dx.doi.org/10.47402/ed.ep.c202153726097>.

LIN, Wanmei *et al.* PH-responsive double-layer film based on chitosan/curcumin- β -cyclodextrin complex/cinnamaldehyde and zein/alizarin for pork freshness monitoring and maintaining. **Food Research International**, [S.L.], v. 173, p. 113460, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113460>.

LIU, Yanhong *et al.* Preparation and properties of biodegradable films made of cationic potato-peel starch and loaded with curcumin. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 130, p. 107690, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107690>.

LIU, Yujia *et al.* Molecular interactions, characterization and antimicrobial activity of curcumin–chitosan blend films. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 52, p. 564–572, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.005>.

LOZANO-NAVARRO, Jessica *et al.* Antimicrobial, Optical and Mechanical Properties of Chitosan–Starch Films with Natural Extracts. **International Journal Of Molecular Sciences**, [S.L.], v. 18, n. 5, p. 997, 5 maio 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms18050997>.

LUCENA, Camilla Aquino Azevedo de *et al.* Desenvolvimento de biofilmes à base de xilana e xilana/gelatina para produção de embalagens biodegradáveis. **Polímeros**, [S.L.], v. 27, n., p. 35–41, 16 jan. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2223>.

LUCHESI, Cláudia Leites *et al.* Effect of chitosan addition on the properties of films prepared with corn and cassava starches. **Journal Of Food Science And Technology**, [S.L.], v. 55, n. 8, p. 2963–2973, 10 jul. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13197-018-3214-y>.

LV, Yawen *et al.* Development of active packaging films utilized natural colorants derived from plants and their diverse applications in protein-rich food products. **Food Innovation And Advances**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 203–216, 2023. Maximum Academic Press. <http://dx.doi.org/10.48130/fia-2023-0022>.

MA, Lulu *et al.* Synergistic effect of glycyrrhizic acid and cellulose nanocrystals for oil-water interfacial stabilization. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 120, p. 106888, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106888>.

MACHADO, Andressa Maiara de Almeida. **PRESENÇA DE ENTEROBACTÉRIAS RESISTENTES A ANTIBIÓTICOS E RESÍDUOS FARMACÊUTICOS EM ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA DO RIO FORTALEZA NO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL**. 2025. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2025.

MADIAN, Noha G.; EL-ASHMANTY, Basant A.; ABDEL-RAHIM, Hadeel K.. Improvement of Chitosan Films Properties by Blending with Cellulose, Honey and Curcumin. **Polymers**, [S.L.], v. 15, n. 12, p. 2587, 6 jun. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym15122587>.

MAHARDIKA, Melbi *et al.* Effect of plasticizer on biodegradability, physical, and morphological properties of κ -carrageenan biopolymer films. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 201, p. 108096, out. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108096>.

MALAFATTI, João Otávio Donizette *et al.* Antifungal and ultraviolet–visible barrier properties in starch films reinforced with CuO nanoparticles. **Journal Of Applied Polymer Science**, [S.L.], v. 140, n. 33, p. 1-14, 16 jun. 2023. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/app.54290>.

MALI, Suraj N.; PANDEY, Anima. Development of curcumin integrated smart pH indicator, antibacterial, and antioxidant waste derived Artocarpus lakoocha starch-based packaging film. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 275, p. 133827, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133827>.

MALI, Suzana; GROSSMANN, Maria Victória Eiras; YAMASHITA, Fábio. Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. **Semina: Ciências Agrárias**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 137, 30 abr. 2010. Universidade Estadual de Londrina. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n1p137>.

MANIGLIA, Bianca Chieregato. Desenvolvimento de filmes comestíveis à base de gelatina e diferentes polissacarídeos para aplicação em frutas frescas minimamente processadas. 2017. 323 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2017.

MARAN, J. Prakash *et al.* Degradation behavior of biocomposites based on cassava starch buried under indoor soil conditions. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 101, p. 20-28, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.080>.

MARTINS, Talita *et al.* Comparative Analysis of Analytical Methods for Quantifying the Deacetylation Degree in Chitosan Polymer Chains. **Materials Research**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 1-9, 2025. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2025-0108>

MAZZARINO, Letícia. **SISTEMAS NANOESTRUTURADOS DECORADOS COM QUITOSANA PARA LIBERAÇÃO BUCAL DA CURCUMINA**. 2013. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Farmácia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MENA, Fernanda. MAIS PLÁSTICO VAI PARA O OCEANO DO QUE PARA A RECICLAGEM. **Folha de São Paulo**. São Paulo. 03 jul. 2024. Disponível em: <http://surl.li/sietub>. Acesso em: 17 nov. 2024.

MERSMANN, Lisa *et al.* Green Processes for Chitin and Chitosan Production from Insects: current state, challenges, and opportunities. **Polymers**, [S.L.], v. 17, n. 9, p. 1185, 26 abr. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym17091185>.

MIRANDA, M. L. D.; SOUSA, J. L. O.. A IMPORTÂNCIA DAS EMBALAGENS ATIVAS E INTELIGENTES PARA UM PLANETA SUSTENTÁVEL. **Engenharia de Alimentos: tópicos físicos, químicos e biológicos - Volume 1**, [S.L.], p. 10-20, 2024. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/240315940>.

MIRBAGHERI, Vasishe Sadat *et al.* Toward understanding the antibacterial mechanism of chitosan: experimental approach and in silico analysis. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 147, p. 109382, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109382>.

MOHAMMED, Abdulrahman A. B. A. *et al.* Effect of Various Plasticizers in Different Concentrations on Physical, Thermal, Mechanical, and Structural Properties of Wheat Starch-Based Films. **Polymers**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 63, 23 dez. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym15010063>.

MOLAVI, Hooman *et al.* A REVIEW ON BIODEGRADABLE STARCH BASED FILM. **Journal Of Microbiology, Biotechnology And Food Sciences**, [S.L.], v. 4, n. 5, p. 456-461, 1 abr. 2015. Slovak University of Agriculture in Nitra. <http://dx.doi.org/10.15414/jmbfs.2015.4.5.456-461>.

MUÑOZ-TEBAR, Nuria *et al.* Chitosan Edible Films and Coatings with Added Bioactive Compounds: antibacterial and antioxidant properties and their application to food products. **Polymers**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 396, 12 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym15020396>.

MURATKHAN, Marat *et al.* Comparable Analysis of Natural and Modified Starches from Kazakhstan: physicochemical properties, applications, and insights on biodegradable films. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 3938, 3 abr. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app15073938>.

NASAJ, Mona *et al.* Factors influencing the antimicrobial mechanism of chitosan action and its derivatives: a review. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 277, p. 134321, out. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134321>.

NASCIMENTO, Erissandro P. *et al.* **OBTENÇÃO DE DERIVADOS DA CURCUMINA COMO PARTIDA PARA A SÍNTESE DE SUAS OXIMAS: CARACTERIZAÇÃO POR FTIR E PONTO DE FUSÃO**. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA (CBQ)**, 63., 2024, Salvador. *Anais...* Salvador: Associação Brasileira de Química (ABQ), 2024.

NASCIMENTO, José Augusto de Almeida. **NANOCOMPÓSITOS BIODEGRADÁVEIS À BASE DE AMIDO DE ARARUTA E POLI(ÁLCOOL VINÍLICO) PARA APLICAÇÃO EM EMBALAGENS ATIVAS**. 2023. 102 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência de Materiais, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

NATA, Iryanti Fatyasari *et al.* Facile microencapsulation of curcumin in acetylated starch microparticles. **Journal Of Microencapsulation**, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 344-349, 3 abr. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.3109/02652048.2013.858789>.

NOVIKOV, Vitaly Yu. *et al.* Mechanism of Heterogeneous Alkaline Deacetylation of Chitin: a review. **Polymers**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 1729, 30 mar. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym15071729>.

O., Felipe Lorena *et al.* Quitosana: da química básica à bioengenharia. **Química Nova na Escola**, [S.L.], v. 39, n. 4, p. 312-320, nov. 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0104-8899.20160089>.

OHNO, Hiroyuki *et al.* DSC analyses of bound water in the microdomains of interpolymer complexes. **Die Makromolekulare Chemie**, [S.L.], v. 184, n. 5, p. 1017-1024, maio 1983. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/macp.1983.021840513>.

OLIVEIRA, Drielly de *et al.* CURCUMINA COMO INDICADOR NATURAL DE PH: uma abordagem teórica-experimental para o ensino de química. **Química Nova**, [S.L.], v. 44, n. 2, p. 217-223, 2020. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/01004042.20170625>.

ONGARATTO, Gabriela Cavalca *et al.* Embalagens ativas e inteligentes para proteção da carne e seus derivados: revisão. **Pubvet**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 1-11, abr. 2022. Editora MV Valero. <http://dx.doi.org/10.31533/pubvet.v16n04a1091.1-11>.

OSORIO, Samara Dias. **BLENDAS POLIMÉRICAS BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DE GELATINA E AMIDO EXTRAÍDO DE CASCAS DE BATATAS (*Solanum tuberosum*)**. 2021. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

OTHMAN, Siti Hajar *et al.* Biodegradability of Starch Nanocomposite Films Containing Different Concentrations of Chitosan Nanoparticles in Compost and Planting Soils. **Coatings**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 777, 17 abr. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings13040777>.

OYEKUNLE, Daniel T. *et al.* Recent Progress on the Application of Chitosan, Starch and Chitosan–Starch Composites for Meat Preservation—A Mini Review. **Journal Of Composites Science**, [S.L.], v. 8, n. 8, p. 302, 5 ago. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/jcs8080302>.

PANDA, Pradeep Kumar; SADEGHI, Kambiz; SEO, Jongchul. Recent advances in poly (vinyl alcohol) /natural polymer based films for food packaging applications: a review. **Food Packaging And Shelf Life**, [S.L.], v. 33, p. 100904, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100904>.

PATSAHAN, T.; PIZIO, O.. Structural aspects of the clustering of curcumin molecules in water. Molecular dynamics computer simulation study. **Condensed Matter Physics**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 23201, 2022. Yukhnovskii Institute for Condensed Matter Physics. <http://dx.doi.org/10.5488/cmp.25.23201>.

PAVONI, Julia Menegotto Frick *et al.* Development of biodegradable chitosan packaging and evaluation of the effect of crosslinking and alkaline treatment in its properties. **Brazilian Journal Of Animal And Environmental Research**, Curitiba, v. 2, n. 2, p. 793-801, abr. 2019. Trimestral.

PECH-COHUO, Soledad Cecilia *et al.* Physicochemical, Mechanical, and Structural Properties of Bio-Active Films Based on Biological-Chemical Chitosan, a Novel Ramon (Brosimum alicastrum) Starch, and Quercetin. **Polymers**, [S.L.], v. 14, n. 7, p. 1346, 26 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14071346>.

PEI, Jinjin *et al.* A comprehensive review on starch-based sustainable edible films loaded with bioactive components for food packaging. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 274, p. 133332, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133332>.

PELLISSARI, Franciele M. *et al.* Antimicrobial, Mechanical, and Barrier Properties of Cassava Starch–Chitosan Films Incorporated with Oregano Essential Oil. **Journal Of Agricultural And Food Chemistry**, [S.L.], v. 57, n. 16, p. 7499-7504, 23 jul. 2009. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/jf9002363>.

PENA, Igor Colares *et al.* PRODUÇÃO E ANÁLISE DE QUITOSANA ADVINDA DE CASCAS DE CAMARÃO REGIONAL (*Macrobrachium amazonicum*) DA CIDADE DE MACAPÁ-AP, BRASIL. In: I SIMPÓSIO ONLINE SULAMERICANO DE TECNOLOGIA, ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS ONLINE, 1., 2021, [S. L.]. **Anais [...]**. [S. L.]: I Simpósio Online Sulamericano de Tecnologia, Engenharia e Ciência de Alimentos Online, 2021. p. 1-6.

PERDOMO, J. *et al.* Glass transition temperatures and water sorption isotherms of cassava starch. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 76, n. 2, p. 305-313, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.10.023>.

PEREIRA, Luciano Bertaco. **Avaliação da influência da esterilização por radiação gama nas propriedades mecânicas, estruturais e na biocompatibilidade de matrizes híbridas orgânico – inorgânicas**. 2011. 44 f. Monografia (Especialização) - Curso de Farmácia-Bioquímica, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2011.

PERERA, Kalpani Y. *et al.* Biodegradable curcumin-nanoclay films for extending shrimp shelf-life and freshness. **Current Research In Food Science**, [S.L.], v. 10, p. 101102, 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101102>.

PÉREZ-VERGARA, Luis D. *et al.* Development and characterization of edible films based on native cassava starch, beeswax, and propolis. **Nfs Journal**, [S.L.], v. 21, p. 39-49, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nfs.2020.09.002>.

PILAPITIYA, P.G.C. Nayanathara Thathsarani; RATNAYAKE, Amila Sandaruwan. The world of plastic waste: a review. **Cleaner Materials**, [S.L.], v. 11, p. 100220, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>.

PINEDA-GOMEZ, Posidia *et al.* Physicochemical Characterisation of Starches from Six Potato Cultivars Native to the Colombian Andean Region. **Potato Research**, [S.L.], v. 64, n. 1, p. 21-39, 3 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11540-020-09462-0>.

PRAMITASARI, Rianita; GUNAWICAHYA, Levina Natasha; ANUGRAH, Daru Seto Bagus. Development of an Indicator Film Based on Cassava Starch–Chitosan Incorporated with Red Dragon Fruit Peel Anthocyanin Extract. **Polymers**, [S.L.], v. 14, n. 19, p. 4142, 3 out. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14194142>.

PRIYADARSHI, Ruchir; RHIM, Jong-Whan. Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [S.L.], v. 62, p. 102346, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102346>.

PRIYADARSINI, Kavirayani *et al.* The Chemistry of Curcumin: from extraction to therapeutic agent. **Molecules**, [S.L.], v. 19, n. 12, p. 20091-20112, 1 dez. 2014. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules191220091>.

QIAO, Congde *et al.* Effect of water on the thermal transition in chitosan films. **Polymer Crystallization**, [S.L.], v. 2, n. 6, dez. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pcr2.10092>.

RACHTANAPUN, Pornchai *et al.* Characterization of Chitosan Film Incorporated with Curcumin Extract. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 963, 21 mar. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13060963>.

RANADE, Tanvi *et al.* Curcumin-integrated biopolymer films for active packaging: current trends and future directions. **Chemical Papers**, [S.L.], v. 79, n. 3, p. 1303-1334, 20 jan. 2025. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11696-025-03892-1>.

REMEDIIO, Leandro Neodini. **Desenvolvimento e caracterização de filmes ativos de quitosana como veículo dos agentes antimicrobianos sorbato de potássio e nisina**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências da Engenharia de Alimentos, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

REN, Lili *et al.* Influence of chitosan concentration on mechanical and barrier properties of corn starch/chitosan films. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 105, p. 1636-1643, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.008>.

RHIM, Jong-Whan *et al.* Bio-nanocomposites for food packaging applications. **Progress In Polymer Science**, [S.L.], v. 38, n. 10-11, p. 1629-1652, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>.

RINAUDO, Marguerite *et al.* Chitin and chitosan: properties and applications. **Progress In Polymer Science**, [S.L.], v. 31, n. 7, p. 603-632, jul. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>.

ROCHA, Meritaine da *et al.* Biodegradable Films: an alternative food packaging. **Food Packaging And Preservation**, [S.L.], p. 307-342, 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-811516-9.00009-9>.

ROY, Swarup *et al.* Curcumin and its uses in active and smart food packaging applications - a comprehensive review. **Food Chemistry**, [S.L.], v. 375, p. 131885, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131885>.

ROY, Swarup; RHIM, Jong-Whan. Preparation of carbohydrate-based functional composite films incorporated with curcumin. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 98, p. 105302, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105302>.

SALEH, Hind M.. Preparation and characterization of chitosan/starch/Ag@TiO₂-NPs bio-nanocomposite. **Journal Of The Indian Chemical Society**, [S.L.], v. 102, n. 10, p. 102022, out. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jics.2025.102022>.

SALES, Priscila Ferreira de *et al.* Caracterização e aplicação de filmes biodegradáveis de amido de incorporados de extrato de própolis-verde. **ForScience**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 1-18, 20 ago. 2021. ForScience: Revista Científica do IFMG. <http://dx.doi.org/10.29069/forscience.2021v9n2.e958>.

SANI, Mahmood Alizadeh *et al.* Development of sustainable UV-screening food packaging materials: a review of recent advances. **Trends In Food Science & Technology**, [S.L.], v. 145, p. 104366, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104366>.

SANTHOSH, Ravichandran *et al.* Starch-based edible packaging: rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties ∴ a review. **Sustainable Food Technology**, [S.L.], n. 2, p. 307-330, 2024. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d3fb00211j>.

SANTOS, Bruna dos *et al.* Biodegradabilidade de filmes baseados em biopolímero e óleo essencial de erva-doce. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 1-18, 3 ago. 2022. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32257>.

SANTOS, Diogo Monteiro Leite dos *et al.* O EFEITO DO PH DO MEIO NO ESPECTRO DE EMISSÃO/EXCITAÇÃO DA CURCUMINA. In: XXVIII ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, XXIV ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO E XIV ENCONTRO DE INICIAÇÃO À DOCÊNCIA - UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA – 2024, Vale do Paraíba. Anais [...]. Vale do Paraíba: 2024. p. 1-6.

SANTOS, Vanessa Souza *et al.* Avaliação e caracterização de biofilme comestível de carboximetilcelulose contendo nanopartículas de quitosana e Cúrcuma longa. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 1-12, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1226>.

SANYANG, Muhammed *et al.* Effect of Plasticizer Type and Concentration on Tensile, Thermal and Barrier Properties of Biodegradable Films Based on Sugar Palm (*Arenga pinnata*) Starch. **Polymers**, [S.L.], v. 7, n. 6, p. 1106-1124, 18 jun. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym7061106>.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L. *et al.* Caracterização dimensional, física e química. In: SARANTÓPOULOS, C. I. G. L. *et al.* *Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades*. Campinas: CETEA/ITAL, 2002. p. 70.

SCHAEFER, Emille Wittmann. **Desenvolvimento de filmes à base de quitosana e amido de milho incorporados com cúrcuma**. 2018. 54 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SILHAVY, T. J. *et al.* The Bacterial Cell Envelope. **Cold Spring Harbor Perspectives In Biology**, [S.L.], v. 2, n. 5, p. 1-16, 14 abr. 2010. Cold Spring Harbor Laboratory. <http://dx.doi.org/10.1101/cshperspect.a000414>.

SILVA, Henrique S.; BARBOSA, Hellen F. G.; PEDRO, Rafael de O. **Análise físico-química de filmes fotossensíveis de quitosana e curcumina**. In: **37º ENCONTRO REGIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA – SBQ-MG**, 2025, Ituiutaba, MG. *Livro de resumos*. Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Química, 2025.

SILVA, Milena Costa *et al.* Avaliação do método de obtenção de scaffolds quitosana/curcumina sobre a estrutura, morfologia e propriedades térmicas. *Matéria* (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 21, n. 3, p. 560-568, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160003.0054>.

SILVA, Paloma L. da. *et al.* PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF PHOSPHORYLATED STARCH BLENDS WITH CHITOSAN AND POLYVINYL ALCOHOL. **Química Nova**, [S.L.], v. 39, n. 4, p. 450-455, 2016. GN1 Sistemas e Publicacoes Ltd.. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20160043>.

SILVA, Yago Ribeiro de Oliveira; LAPA, Leonardo Silva Santos; SALES, Priscila Ferreira de. **Efeitos das variáveis na análise de espessura e solubilidade de filmes biodegradáveis de baixo custo**. In: Seminário de Iniciação Científica do IFMG. Ribeirão das Neves, 2019.

SINGH, Gurvendra *et al.* Effect on the Properties of Edible Starch-Based Films by the Incorporation of Additives: a review. **Polymers**, [S.L.], v. 14, n. 10, p. 1987, 13 maio 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14101987>.

SINGH, Narpinder *et al.* Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chemistry**, [S.L.], v. 81, n. 2, p. 219-231, maio 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0308-8146\(02\)00416-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0308-8146(02)00416-8).

SINGH, Suman *et al.* Temperature-regulating materials for advanced food packaging applications: a review. **Journal Of Food Measurement And Characterization**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 588-601, 24 out. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11694-017-9672-5>.

SIRACUSA, Valentina *et al.* Biodegradable polymers for food packaging: a review. **Trends In Food Science & Technology**, [S.L.], v. 19, n. 12, p. 634-643, dez. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>.

SIRBU, Elena-Emilia *et al.* Influence of Plasticizers Concentration on Thermal, Mechanical, and Physicochemical Properties on Starch Films. **Processes**, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 2021, 19 set. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/pr12092021>.

SKOOG, Douglas A. et al. *Fundamentos de química analítica*. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

SOBRAL, Paulo José do Amaral. Influência da espessura de biofilmes feitos à base de proteínas miofibrilares sobre suas propriedades funcionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 35, n. 6, p. 1251-1259, jun. 2000. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2000000600022>.

SONG, Wei *et al.* Properties enhancement of poly(β -hydroxybutyrate) biocomposites by incorporating surface-modified wheat straw flour: effect of pretreatment methods. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 232, p. 123456, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123456>.

SOTHORNVIT, Rungsinee; KROCHTA, John M.. Plasticizers in edible films and coatings. **Innovations In Food Packaging**, [S.L.], p. 403-433, 2005. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-012311632-1/50055-3>.

SOUZA, Ana Cristina de. **Desenvolvimento de embalagem biodegradável ativa a base de fécula de mandioca e agentes antimicrobianos naturais**. 2011. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SOUZA, Priscila Talita Fernandes. **ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES DE AMIDO DE SORGO E QUITOSANA**. 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência de Alimentos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

STEINER., Alexandra Duprates. **Aditivos Naturais Encapsulados em sílicas híbridas: aplicação em conservação de alimentos**. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SUKHIJA, Sakshi *et al.* Analyzing the effect of whey protein concentrate and psyllium husk on various characteristics of biodegradable film from lotus (*Nelumbo nucifera*) rhizome starch. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 60, p. 128-137, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.03.023>.

SUN, Yang *et al.* Effects of plasticizer type and concentration on rheological, physico-mechanical and structural properties of chitosan/zein film. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 143, p. 334-340, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.035>.

TA INSTRUMENTS. *Thermal analysis to determine various forms of water present in hydrogels by differential scanning calorimetry*. [S.L.], 2012.

TAGHINEJAD, Farzaneh *et al.* Curcumin-thymol loaded hydrolyzed zein-ethyl cellulose as active packaging film for extended minced mutton shelf-life. **Journal Of Food Measurement And Characterization**, [S.L.], v. 18, n. 7, p. 6342-6355, 8 jun. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11694-024-02652-1>.

TAMBAWALA, Hetvi *et al.* Curcumin- A Bio-based Precursor for Smart and Active Food Packaging Systems: a review. **Journal Of Polymers And The Environment**, [S.L.], v. 30, n. 6, 2177-2208, 11 jan. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-022-02372-x>.

TAN, Shiou Xuan *et al.* A Comprehensive Review on the Emerging Roles of Nanofillers and Plasticizers towards Sustainable Starch-Based Bioplastic Fabrication. **Polymers**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 664, 10 fev. 2022a. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14040664>.

TAN, Shiou Xuan *et al.* Characterization and Parametric Study on Mechanical Properties Enhancement in Biodegradable Chitosan-Reinforced Starch-Based Bioplastic Film. **Polymers**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 278, 11 jan. 2022b. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14020278>.

TEMDEE, Wattana *et al.* Rapid quality deterioration of harpiosquillid mantis shrimp (*Harpiosquilla raphidea*) during iced storage. **Journal Of Food Science And Technology**, [S.L.], v. 59, n. 5, p. 1812-1822, 9 jul. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13197-021-05192-4>.

TESTER, Richard F.; KARKALAS, John; QI, Xin. Starch—composition, fine structure and architecture. **Journal Of Cereal Science**, [S.L.], v. 39, n. 2, p. 151-165, mar. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001>.

THAMER, Issam *et al.* Sustainable biopolymer design: extraction of chitin and chitosan using natural deep eutectic solvents with improved antibacterial features. **Materials & Design**, [S.L.], v. 259, p. 114775, nov. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114775>.

TONNESEN, Hanne Hjorth *et al.* Studies on curcumin and curcuminoids. **Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung**, [S.L.], v. 180, n. 5, p. 402-404, maio 1985. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01027775>.

UNITED NATIONS. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 11 fev. 2026.

VALENTI, Sofia *et al.* Amorphous solid dispersions of curcumin in a poly(ester amide): antiplasticizing effect on the glass transition and macromolecular relaxation dynamics, and controlled release. **International Journal Of Pharmaceutics**, [S.L.], v. 644, p. 123333, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123333>.

VANIN, Natália Ghinzelli. **Aplicação de Alta Pressão Hidrostática em Presuntos Fatiados Embalados a Vácuo: Uma revisão**. 2010. 64 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Alimentos, Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

VARGAS, Victória Hermes de. **Aplicação de diferentes estratégias para o aprimoramento das propriedades de filmes biodegradáveis à base de gelatina**. 2022. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

VÁSCONEZ, María B. *et al.* Antimicrobial activity and physical properties of chitosan–tapioca starch based edible films and coatings. **Food Research International**, [S.L.], v. 42, n. 7, p. 762-769, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2009.02.026>.

VIEIRA, Melissa Gurgel Adeodato *et al.* Natural-based plasticizers and biopolymer films: a review. **European Polymer Journal**, [S.L.], v. 47, n. 3, p. 254-263, mar. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011>.

VON MÜHLEN, Milena *et al.* Evaluating the properties of starch/chitosan films with the incorporation of various nanoclays for use in food packaging. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 298, p. 140054, abr. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140054>.

VAN SOEST, Jeroen J.G.; Vliegenthart, Johannes F.G.. Crystallinity in starch plastics: consequences for material properties. **Trends In Biotechnology**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 208-213, jun. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-7799\(97\)01021-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-7799(97)01021-4).

WAHAB, Abdul *et al.* Application of nanotechnology in the packaging of edible materials. **Preparation Of Phytopharmaceuticals For The Management Of Disorders**, [S.L.], p. 215-225, 2021. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-820284-5.00004-6>.

WANG, Di *et al.* Curcumin: a magical small molecule with a large role in active-intelligent degradable food packaging. **International Journal Of Molecular Sciences**, [S.L.], v. 26, n. 8, p. 3917, 21 abr. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms26083917>.

WANG, Weiquan *et al.* Biodegradable cellulose/curcumin films with Janus structure for food packaging and freshness monitoring. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 324, p. 121516, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121516>.

WANG, Xiang *et al.* Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: a review. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 240, p. 116292, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116292>.

WESTLAKE, Jessica R. *et al.* Biodegradable biopolymers for active packaging: demand, development and directions. **Sustainable Food Technology**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 50-72, 2023. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d2fb00004k>.

WHISTLER, Roy L.; DANIEL, James R.. MOLECULAR STRUCTURE OF STARCH. **Starch: Chemistry and Technology**, [S.L.], p. 153-182, 1984. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-746270-7.50012-4>.

WUNDERLICH, Bernhard. *Thermal Analysis of Polymeric Materials*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. ISBN 978-3-540-21526-8.

XIE, Qingtong *et al.* Effect of Curcumin Addition on the Properties of Biodegradable Pectin/Chitosan Films. **Molecules**, [S.L.], v. 26, n. 8, p. 2152, 8 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules26082152>.

XU, Y.X. *et al.* Chitosan–starch composite film: preparation and characterization. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 185-192, mar. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.03.002>.

YI, Kexin *et al.* Harnessing the Potential of Chitosan and Its Derivatives for Enhanced Functionalities in Food Applications. **Foods**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 439, 29 jan. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/foods13030439>.

YU, Hailong *et al.* Enhanced in vitro anti-cancer activity of curcumin encapsulated in hydrophobically modified starch. **Food Chemistry**, [S.L.], v. 119, n. 2, p. 669-674, 15 mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.018>.

YUSOF, Wan Roslina Wan *et al.* Starch-chitosan blends: a comprehensive review on the preparation, physicochemical properties and applications. **Biopolymers**, [S.L.], v. 115, n. 5, 30 maio 2024. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/bip.23602>.

ZHANG, Yachuan *et al.* Thermoplastic Starch Processing and Characteristics—A Review. **Critical Reviews In Food Science And Nutrition**, [S.L.], v. 54, n. 10, p. 1353-1370, jan. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2011.636156>.

ŻOLEK-TRYZNOWSKA, Zuzanna *et al.* The Influence of Starch Origin on the Properties of Starch Films: packaging performance. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 5, p. 1146, 28 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14051146>.