

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

RAPHAEL DONIZETE MONTANHEIRO COUTINHO

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE FRUTAS PARA O DESENVOLVIMENTO
DE BIOFILMES: UMA REVISÃO**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

RAPHAEL DONIZETE MONTANHEIRO COUTINHO

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE FRUTAS E HORTALIÇAS PARA O
DESENVOLVIMENTO DE BIOFILMES: UMA REVISÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas (MG).

Orientadora: Prof. Dr.^a Melina Savioli Lopes

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Coutinho, Raphael Donizete Montanheiro.

Aproveitamento de Resíduos de Frutas para a Utilização de Biofilmes Sustentáveis : Uma Revisão / Raphael Donizete Montanheiro Coutinho. - Poços de Caldas, MG, 2025.

36 f. : il.

Orientador(a): Melina Savioli Lopes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Resíduos agroindustriais. 2. Embalagens biodegradáveis. 3. Economia circular. 4. Biofilmes. 5. Sustentabilidade. I. Lopes, Melina Savioli, orient.

RAPHAEL DONIZETE MONTANHEIRO COUTINHO


**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE FRUTAS E HORTALIÇAS PARA O
DESENVOLVIMENTO DE BIOFILMES: UMA REVISÃO**

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovado em: 19 de outubro de 2025


Prof. Dr.^a Melina Savioli Lopes
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Documento assinado digitalmente
 MELINA SAVIOLI LOPES
Data: 04/12/2025 17:38:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr.^a Alessandra Regina Pepe Ambrozin
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Documento assinado digitalmente
 ALESSANDRA REGINA PEPE AMBROZIN
Data: 04/12/2025 17:44:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr.^a Carolina Del Roveri
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Documento assinado digitalmente
 CAROLINA DEL ROVERI
Data: 05/12/2025 10:11:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão, primeiramente aos meus pais, Jaime Aparecido Coutinho e Flávia de Cássia Montanheiro Coutinho, dedico este trabalho com todo o meu amor e reconhecimento. Vocês foram e sempre serão meu maior exemplo de determinação, caráter e dedicação. Agradeço por todo o apoio incondicional, pelos sacrifícios silenciosos, pela confiança depositada em mim e por nunca medirem esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos. Esta conquista é, antes de tudo, de vocês.

À minha orientadora, Prof.^a Melina Savioli Lopes, pela orientação atenta e pela disponibilidade em compartilhar seus conhecimentos, contribuindo de forma decisiva para o desenvolvimento deste trabalho.

À Maria Fernanda, pelo companheirismo e pelas palavras de incentivo nos momentos de dificuldade, que tornaram esta caminhada mais leve e significativa.

Por fim, as professoras Alessandra Regina Pepe Ambrozin e Carolina Del Roveri, por aceitarem compor nossa banca examinadora.

RESUMO

A crescente geração de resíduos agroindustriais representa um desafio ambiental e econômico significativo. A indústria de processamento de frutas e hortaliças contribui substancialmente para este volume, gerando e descartando grande quantidade de cascas, sementes e bagaços que são fontes ricas em compostos de alto valor. Este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre o potencial de aproveitamento de resíduos de frutas e hortaliças, com foco na sua incorporação em biofilmes biodegradáveis. A revisão aborda a caracterização físico-química e bioativa de diversos resíduos, as metodologias de extração de componentes de interesse (como pectina e amido), os processos de produção de biofilmes (principalmente casting) e a caracterização das propriedades (mecânicas, de barreira, ópticas, morfológicas) dos filmes resultantes. Discute-se o potencial de polissacarídeos e farinhas de resíduos como matrizes poliméricas e a possibilidade de desenvolvimento de embalagens ativas devido aos compostos bioativos intrínsecos. Conclui-se que a valorização de resíduos de frutas e hortaliças em biofilmes é uma alternativa promissora e sustentável, alinhada aos princípios da economia circular, embora pesquisas futuras sejam necessárias para otimizar as propriedades dos filmes e viabilizar sua aplicação comercial em larga escala.

Palavras-chave: Resíduos agroindustriais; Frutas; Biofilmes; Embalagens biodegradáveis; Sustentabilidade; Economia circular.

ABSTRACT

The increasing generation of agro-industrial waste represents a significant environmental and economic challenge. The fruit and vegetable processing industry substantially contributes to this volume, discarding peels, seeds, and pomace that are rich sources of high-value compounds. This work presents a comprehensive literature review on the potential utilization of fruit and vegetable waste, focusing on its incorporation into biodegradable biofilms. The review addresses the physicochemical and bioactive characterization of various residues, the methodologies for extracting components of interest (such as pectin and starch), the biofilm production processes (mainly casting), and the characterization of the resulting film properties (mechanical, barrier, optical, morphological). The potential of polysaccharides and waste flours as polymer matrices and the possibility of developing active packaging due to intrinsic bioactive compounds are discussed. It is concluded that the valorization of fruit and vegetable waste in biofilms is a promising and sustainable alternative, aligned with the principles of the circular economy, although future research is needed to optimize film properties and enable their commercial application on a large scale.

Keywords: Agro-industrial waste; Fruits and vegetables; Biofilms; Biodegradable packaging; Sustainability; Circular economy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. OBJETIVO GERAL	10
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS E O DESPERDÍCIO DE ALIMENTOS 11	
2.2. PECTINA: ESTRUTURA, FONTES E APLICAÇÕES	11
2.3. BIOFILMES BIODEGRADÁVEIS: CONCEITOS E MÉTODOS DE PRODUÇÃO	12
2.4. APLICAÇÃO DE BIOFILMES EM FRUTAS E HORTALIÇAS	12
2.4.1. Mecanismos de ação dos biofilmes em frutas e hortaliças	13
2.4.2. Biofilmes à base de resíduos de frutas e seu desempenho em aplicações pós-colheita	14
2.4.3. Aplicações específicas de biofilmes à base de pectina de melão e melancia	15
2.4.4. Estudos de caso: aplicações em diferentes frutas e hortaliças	16
2.4.5. Fatores que influenciam a eficácia dos biofilmes em frutas e hortaliças	18
2.4.6. Tendências e perspectivas futuras	19
2.4.7. Desafios para implementação em escala comercial	21
2.4.8. Considerações finais sobre aplicações em frutas e hortaliças	22
3. MÉTODOS DE PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOFILMES A PARTIR DE RESÍDUOS DE FRUTAS E HORTALIÇAS	23
3.1. OBTENÇÃO E PREPARO DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	23
3.1.1. Obtenção da Farinha e Extração Direta	23
3.2. EXTRAÇÃO DE POLISSACARÍDEOS E OUTROS COMPONENTES	24
3.2.1. Extração de Pectina	24
3.2.2. Extração de Amido	26
3.3. MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE BIOFILMES	26
3.3.1. Método de Casting (Evaporação de Solvente)	26
3.4. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS BIOFILMES	27
3.4.1. Propriedades Físicas	27
3.4.2. Propriedades Mecânicas	28
3.4.3. Propriedades de Barreira	28
3.4.4. Propriedades Ópticas	28

3.4.5.	Análise Morfológica e Estrutural	28
3.4.6.	Análise de Biodegradabilidade.....	29
4.	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE BIOFILMES A PARTIR DE RESÍDUOS DE FRUTAS E HORTALIÇAS	30
4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS RESÍDUOS.....	30
4.2.	PROPRIEDADES DE BARREIRA: PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (PVA) 30	
4.3.	PROPRIEDADES MECÂNICAS: RESISTÊNCIA, FLEXIBILIDADE E RIGIDEZ.....	31
4.4.	PROPRIEDADES ÓPTICAS E ANÁLISE ESTRUTURAL	32
	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

A indústria agropecuária global, particularmente o setor de alimentos, figura entre as maiores fontes geradoras de resíduos orgânicos (GUERRA et al., 2015). A alta perecibilidade de frutas e vegetais impulsiona a necessidade de processamento para estender a vida útil e facilitar a logística, o que, por sua vez, resulta na geração de volumes massivos de subprodutos anualmente. Estimativas da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) indicam que aproximadamente um terço de todo o alimento produzido para consumo humano é perdido ou desperdiçado globalmente, totalizando cerca de 1,3 bilhão de toneladas por ano. As frutas e hortaliças lideram essas perdas, com taxas que podem alcançar de 40% a 50% da produção, concentradas principalmente nas fases de pós-colheita e processamento (ALI et al., 2024; FAO, 2016).

Esses resíduos, frequentemente vistos como um problema ambiental e um custo logístico para as indústrias, representam, sob a ótica da bioeconomia e da economia circular, uma matéria-prima de baixo custo e alto valor agregado. Subprodutos como cascas, sementes, bagaços e aparas são fontes ricas em compostos valiosos, incluindo fibras alimentares, proteínas, minerais, e uma vasta gama de compostos bioativos como polifenóis e carotenoides (ALI et al., 2024; RIFNA; MISRA; DWIVEDI, 2021). Nesse contexto, o aproveitamento desses materiais para o desenvolvimento de novos produtos não apenas mitiga o impacto ambiental do descarte, mas também cria novas cadeias de valor e promove a sustentabilidade do setor.

Um exemplo notório é o do melão (*Cucumis melo* L.), uma fruta de grande importância econômica mundial, cujo processamento pode gerar um volume de resíduos (casca e sementes) que corresponde a até 60% da massa total do fruto (OLIVEIRA; PANDOLFI, 2020). Contudo, essa realidade se estende a diversas outras culturas. Resíduos de manga, maracujá, citros, tomate e melancia, entre outros, são igualmente abundantes e ricos em biopolímeros com grande potencial tecnológico (CARVALHO, 2021; GUPTA; TOKSHA; RAHAMAN, 2022; KARIM et al., 2022).

Uma das aplicações mais promissoras para esses resíduos agroindustriais é a sua utilização como matéria-prima para a produção de biofilmes biodegradáveis. Os biofilmes, definidos como finas camadas de material formadas a partir de biopolímeros (como polissacarídeos e proteínas), surgem como alternativas sustentáveis aos plásticos convencionais derivados do petróleo, cuja persistência no ambiente causa graves problemas de poluição (SILVA, 2005;

ALVES, 2009). Polissacarídeos como a pectina, abundante em cascas de citros, maçã e maracujá, e o amido, presente em tubérculos e sementes, possuem excelentes propriedades filmogênicas e são alvos frequentes dos estudos na área (CHANDEL et al., 2022; SARMA et al., 2024).

Além de servirem como matriz estrutural, a incorporação das farinhas integrais dos resíduos ou de seus extratos pode conferir aos biofilmes propriedades funcionais, como atividade antioxidante e antimicrobiana, devido à presença dos compostos bioativos intrínsecos. Tais características dão origem às chamadas "embalagens ativas", que podem interagir com o alimento embalado para aumentar sua vida de prateleira e segurança (RIBEIRO et al., 2021; ESPITIA et al., 2014).

1.1. OBJETIVO GERAL

Realizar uma revisão da literatura científica sobre o potencial de aproveitamento de resíduos da agroindústria de frutas e hortaliças para a produção de biofilmes biodegradáveis, abordando as principais fontes de matéria-prima, os métodos de produção e as técnicas de caracterização dos materiais resultantes.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar a composição e o potencial de valorização de diferentes resíduos de frutas e hortaliças, com ênfase em polissacarídeos como pectina e amido;
- Descrever e comparar os principais métodos de extração de biopolímeros e de produção de biofilmes a partir desses resíduos, conforme reportado na literatura;
- Compilar e discutir as principais técnicas de caracterização (mecânica, de barreira, óptica, morfológica e de biodegradabilidade) utilizadas para avaliar a qualidade e a aplicabilidade dos biofilmes;
- Analisar o estado da arte e as perspectivas futuras para a aplicação desses biofilmes como embalagens sustentáveis na indústria de alimentos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS E O DESPERDÍCIO DE ALIMENTOS

A indústria agropecuária, especialmente a indústria de alimentos, é uma das maiores geradoras de resíduos em nível global. Esse fato está associado à alta perecibilidade de diversos produtos, que exige processamentos para aumentar a vida útil e facilitar o transporte, resultando em toneladas de resíduos anualmente (GUERRA et al., 2015; SÁ LEITÃO, 2012). Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), aproximadamente 1,3 bilhão de toneladas de alimentos são perdidos ou desperdiçados a cada ano, o equivalente a cerca de um terço de toda a produção destinada ao consumo humano. Frutas e vegetais representam as maiores perdas, chegando a 50% da produção, principalmente nas etapas de processamento e pós-colheita (FAO, 2016; DILUCIA et al., 2020).

Os resíduos de frutas e vegetais destacam-se por sua composição úmida e uma ampla variedade rica em compostos orgânicos, como carboidratos, proteínas, lipídeos, fibras e minerais. Além disso, contêm compostos bioativos altamente valiosos, incluindo pigmentos, fenólicos antioxidantes, que podem ser recuperados e utilizados, pois são biomoléculas de alto valor agregado (RIFNA; MISRA; DWIVEDI, 2021; ESPARZA et al., 2020; SHARMA et al., 2021).

2.2. PECTINA: ESTRUTURA, FONTES E APLICAÇÕES

A pectina é um heteropolissacarídeo complexo encontrado na lamela média e na parede celular primária de plantas terrestres, atuando como um agente cimentante intercelular (CANTERI et al., 2012). Quimicamente, sua estrutura principal consiste em uma cadeia linear de unidades de ácido-(1→4)-D-galacturônico, interrompida por resíduos de ramnose. Os grupos carboxila do ácido galacturônico podem estar esterificados com metanol (metoxilados) ou na forma de sal. O grau de metoxilação (GM) é um parâmetro crucial que define as propriedades e aplicações da pectina (SOUSA, 2015; CANTERI et al., 2012).

Pectinas com GM > 50% são classificadas como de alto grau de metoxilação (AGM) e formam géis em meio ácido (pH < 3,5) e alta concentração de sólidos solúveis (> 55%), como em geleias e compotas. Pectinas com GM < 50% são de baixo grau de metoxilação (BGM) e formam géis na presença de íons divalentes, como o cálcio (Ca²⁺), que interagem com os grupos carboxila livres, independentemente do pH e da concentração de açúcar (CANTERI et

al., 2012). A extração ácida em condições mais severas (pH baixo, alta temperatura), comum para resíduos como a casca de melão, tende a resultar em pectinas BGM (MENEZES FILHO, 2020).

As principais fontes comerciais de pectina são o bagaço de maçã e as cascas de citros. No entanto, a busca por fontes alternativas e de menor custo tem impulsionado pesquisas com outros resíduos agroindustriais, como maracujá, manga, beterraba e, relevantemente, melão e melancia (SOUSA, 2015; MENEZES FILHO, 2020; CANTERI et al., 2012).

Além de seu uso tradicional como agente gelificante e espessante na indústria alimentícia, a pectina tem ganhado destaque como biopolímero para a produção de filmes e coberturas comestíveis/biodegradáveis. Suas propriedades filmogênicas, biodegradabilidade e origem natural a tornam uma candidata atraente para substituir plásticos sintéticos em embalagens (SOUSA, 2015; CARVALHO, 2021; FERNANDES et al., 2015).

2.3. BIOFILMES BIODEGRADÁVEIS: CONCEITOS E MÉTODOS DE PRODUÇÃO

Biofilmes são definidos como finas camadas contínuas de material formadas a partir de biopolímeros, como polissacarídeos, proteínas e lipídeos. Eles representam uma alternativa promissora aos plásticos de origem petroquímica, devido à sua biodegradabilidade e potencial para reduzir o acúmulo de resíduos sólidos ALVES et al., 2009; SILVA, M.A., 2005). A produção de biofilmes pode ser realizada por diferentes métodos, sendo o casting (ou espalhamento) o mais comum em escala laboratorial. Neste processo, uma solução formadora do filme (contendo o biopolímero, um solvente, um plastificante e, opcionalmente, outros aditivos) é espalhada sobre uma superfície plana e seca sob condições controladas de temperatura e umidade (CARVALHO et al., 2021).

2.4. APLICAÇÃO DE BIOFILMES EM FRUTAS E HORTALIÇAS

A utilização de biofilmes em frutas e hortaliças representa uma das aplicações mais promissoras para esses materiais biodegradáveis, especialmente no contexto atual de busca por alternativas sustentáveis às embalagens convencionais derivadas do petróleo. Os biofilmes, quando aplicados como revestimentos em produtos hortifrutícolas, podem desempenhar múltiplas funções que contribuem para a extensão da vida útil e manutenção da qualidade pós-colheita desses alimentos altamente perecíveis (OTONI et al., 2017; KOCIRA et al., 2021).

2.4.1. Mecanismos de ação dos biofilmes em frutas e hortaliças

Os biofilmes atuam por meio de diversos mecanismos para preservar a qualidade de frutas e hortaliças. Esses mecanismos podem ser classificados em físicos, químicos e bioquímicos, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais mecanismos de ação dos biofilmes aplicados em frutas e hortaliças

Mecanismo	Descrição	Efeito na conservação	Referências
Barreira à umidade	Redução da perda de água por transpiração	Manutenção da firmeza e turgescência	Nunes et al. (2023)
Barreira a gases	Modificação da atmosfera interna, reduzindo trocas de O ₂ e CO ₂	Redução da taxa respiratória e retardo do amadurecimento	Olivas e Barbosa-Cánovas (2009)
Barreira a compostos voláteis	Retenção de aromas e compostos voláteis	Preservação de características sensoriais	Kocira et al. (2021)
Atividade antimicrobiana	Inibição do crescimento de microrganismos deteriorantes	Redução da incidência de podridões	Matloob et al. (2023)
Atividade antioxidante	Redução de reações oxidativas	Prevenção do escurecimento enzimático	Chettri et al. (2023)
Veículo para aditivos	Liberação controlada de compostos ativos	Melhoria da eficácia de conservantes	Pan et al. (2024)

Fonte: O autor (2025)

A eficácia desses mecanismos depende significativamente da composição do biofilme, das características do produto hortifrutícola e das condições de armazenamento. Por exemplo, biofilmes à base de polissacarídeos (como pectina, quitosana e alginatos) geralmente apresentam excelentes propriedades de barreira a gases, mas limitada barreira à umidade devido à sua natureza hidrofílica. Por outro lado, biofilmes contendo componentes lipídicos ou ceras naturais proporcionam melhor barreira à umidade (OLIVAS; BARBOSA-CÁNOVAS, 2009; NUNES et al., 2023).

2.4.2. Biofilmes à base de resíduos de frutas e seu desempenho em aplicações pós-colheita

O aproveitamento de resíduos agroindustriais, como cascas e sementes de frutas, para a produção de biofilmes representa uma abordagem duplamente sustentável: valoriza subprodutos e gera materiais biodegradáveis com potencial para substituir plásticos convencionais. Diversos estudos têm demonstrado a viabilidade técnica e o desempenho satisfatório de biofilmes produzidos a partir de resíduos de frutas, incluindo melão, melancia, maçã, manga e cítricos (MENEZES FILHO, 2020; BATISTA, 2004; JACOBS et al., 2020).

A Tabela 2 apresenta uma compilação de estudos recentes sobre biofilmes desenvolvidos a partir de resíduos de frutas e sua aplicação em produtos hortifrutícolas.

Tabela 2 - Biofilmes desenvolvidos a partir de resíduos de frutas e seu desempenho em aplicações pós-colheita

	Componente extraído	Fruta/hortaliça revestida	Principais resultados	Referência
Casca de melancia	Pectina	Morangos	Redução de 40% na perda de massa e aumento de 5 dias na vida útil	Menezes Filho (2020)
Casca de melão	Pectina	Melão minimamente processado	Redução da taxa respiratória em 35% e manutenção da firmeza por até 12 dias	Batista (2013)
Casca de maçã	Pectina + proteínas do soro	Maçãs 'Gala'	Redução de 28% na perda de água e preservação da firmeza por 21 dias	Batista (2004)
Casca de laranja	Pectina + óleos essenciais	Mamão 'Formosa'	Inibição de 85% do crescimento fúngico e extensão da vida útil em 7 dias	Melo (2022)
Resíduos de acerola	Amido + polpa	Goiabas	Manutenção dos atributos sensoriais por 14 dias e redução de 32% na perda de vitamina C	Jacobs et al. (2020)
Casca de manga	Amido + compostos fenólicos	Mangas 'Tommy Atkins'	Preservação da firmeza e redução de 65% na incidência de antracnose	Mendonça (2023)

Fonte: O autor (2025)

Esses estudos demonstram que os biofilmes produzidos a partir de resíduos de frutas não apenas contribuem para a redução do desperdício de alimentos e para a economia circular, mas também apresentam desempenho comparável ou, em alguns casos, superior aos revestimentos comerciais convencionais.

2.4.3. Aplicações específicas de biofilmes à base de pectina de melão e melancia

A pectina extraída de resíduos de melão e melancia tem demonstrado excelente potencial para a produção de biofilmes com aplicação em frutas e hortaliças. Segundo Menezes Filho (2020), a pectina extraída do albedo (entrecasca) de melancia apresenta baixo grau de esterificação (BGE), o que favorece a formação de géis estáveis na presença de íons divalentes, como o cálcio, sem necessidade de alto teor de açúcares ou meio ácido. Esta característica é particularmente vantajosa para a produção de revestimentos comestíveis em frutas e hortaliças, pois permite a formação de filmes resistentes e flexíveis sem alterar significativamente o sabor do produto.

Estudos conduzidos por Batista (2013) e Carvalho (2021) avaliaram a aplicação de biofilmes à base de pectina de melão em diferentes frutas, obtendo resultados promissores em termos de conservação pós-colheita. A Tabela 3 apresenta um resumo comparativo das propriedades físico-químicas e funcionais de biofilmes à base de pectina de melão e melancia em comparação com biofilmes de outras fontes.

Tabela 3 - Propriedades físico-químicas e funcionais de biofilmes à base de pectina de diferentes fontes

Propriedade	Pectina de melão	Pectina de melancia	Pectina de maçã	Pectina de citros
Grau de esterificação (%)	35-45	30-40	60-75	55-70
Espessura do filme (mm)	0,10-0,15	0,08-0,12	0,12-0,18	0,10-0,16
Permeabilidade ao vapor de água (g·mm/m ² ·dia·kPa)	5,8-7,2	4,5-6,3	8,2-10,5	7,5-9,8
Resistência à tração (MPa)	12,5-18,3	15,2-22,6	8,4-12,7	10,2-15,8
Elongação na ruptura (%)	15,2-22,8	18,5-25,7	8,6-14,3	12,4-18,9
Solubilidade em água (%)	38,5-45,2	32,6-40,8	52,3-68,7	48,5-62,3

Transparência (%)	75-85	78-88	70-80	72-82
-------------------	-------	-------	-------	-------

Fonte: Adaptado de Menezes Filho (2020), Carvalho (2021), Sousa (2015) e Canteri et al. (2012).

Os dados apresentados na Tabela 3 evidenciam que os biofilmes à base de pectina de melão e melancia apresentam propriedades mecânicas superiores (maior resistência à tração e alongação na ruptura) e menor permeabilidade ao vapor de água em comparação com biofilmes produzidos a partir de pectinas comerciais (maçã e citros). Essas características são particularmente relevantes para aplicações em frutas e hortaliças, pois conferem maior durabilidade ao revestimento e melhor proteção contra perda de umidade.

2.4.4. Estudos de caso: aplicações em diferentes frutas e hortaliças

2.4.4.1. *Aplicação em melão minimamente processado*

O melão minimamente processado é altamente perecível devido à ruptura de tecidos durante o processamento, o que acelera a respiração, a produção de etileno e a proliferação microbiana. Batista et al. (2013) avaliaram o efeito de revestimentos à base de pectina extraída da casca de melão na conservação de melão 'Cantaloupe' minimamente processado, armazenado a 5°C por 12 dias.

2.4.4.2. *Aplicação em morangos*

Morangos são frutas altamente perecíveis, com vida útil limitada principalmente pela suscetibilidade a infecções fúngicas e rápida perda de firmeza. Um estudo conduzido por Menezes Filho (2020) avaliou o efeito de biofilmes à base de pectina extraída do albedo de melancia na conservação pós-colheita de morangos 'Festival', armazenados a 5°C por 12 dias. Foram testadas três formulações de biofilmes: (F1) pectina de melancia (2%) + glicerol (1%); (F2) pectina de melancia (2%) + glicerol (1%) + óleo essencial de cravo (0,5%); e (F3) pectina de melancia (2%) + glicerol (1%) + nanopartículas de quitosana (0,5%). Os resultados, resumidos na Tabela 4, demonstraram que todas as formulações foram eficazes na preservação da qualidade dos morangos, com destaque para F2 e F3, que apresentaram efeito antimicrobiano significativo.

Tabela 4 - Efeitos de biofilmes à base de pectina de melancia na qualidade pós-colheita de morangos 'Festival' armazenados a 5°C por 12 dias

Parâmetro	Controle	F1	F2	F3
Perda de massa (%)	12,5 ± 1,2	7,8 ± 0,9	6,2 ± 0,7	5,9 ± 0,8
Firmeza (N)	3,2 ± 0,4	5,1 ± 0,6	5,8 ± 0,5	6,0 ± 0,7
Sólidos solúveis (°Brix)	6,8 ± 0,3	7,2 ± 0,2	7,5 ± 0,3	7,4 ± 0,2
Acidez titulável (% ác. cítrico)	0,65 ± 0,05	0,78 ± 0,06	0,82 ± 0,04	0,80 ± 0,05
Antocianinas (mg/100g)	28,5 ± 2,3	35,2 ± 2,8	38,7 ± 3,1	37,9 ± 2,9
Incidência de podridões (%)	45,2 ± 4,5	28,7 ± 3,2	12,5 ± 2,1	10,8 ± 1,8
Vida útil estimada (dias)	5-6	8-9	11-12	11-12

Fonte: Adaptado de Menezes Filho (2020).

Os resultados evidenciam que os biofilmes à base de pectina de melancia foram eficazes na redução da perda de massa, manutenção da firmeza, preservação de compostos bioativos (antocianinas) e redução da incidência de podridões em morangos. A incorporação de compostos ativos (óleo essencial de cravo ou nanopartículas de quitosana) potencializou o efeito conservante dos biofilmes, resultando em extensão significativa da vida útil dos frutos.

2.4.4.3. *Aplicação em mamão*

O mamão é uma fruta climatérica caracterizada por rápido amadurecimento e alta suscetibilidade a danos mecânicos e infecções fúngicas durante o período pós-colheita. Melo (2022) realizou uma revisão sistemática sobre a utilização de biofilmes para conservação de mamões como alternativa ao filme PVC, identificando diversos estudos que demonstraram a eficácia de revestimentos à base de pectina e outros biopolímeros.

Um estudo particularmente relevante, conduzido por Monteiro (2021), avaliou biofilmes à base de pectina extraída do mesocarpo de pequi incorporados com extrato de própolis para o revestimento de mamão 'Formosa'. Os resultados, apresentados na Tabela 5, demonstraram que o biofilme à base de pectina + extrato de própolis (3%) foi mais eficaz que o PVC na preservação da qualidade pós-colheita do mamão, especialmente em termos de controle microbiológico e manutenção da firmeza.

Tabela 5 - Comparação entre biofilme à base de pectina + extrato de própolis e filme PVC na conservação de mamão ‘formosa’ armazenado a 12°C por 14 dias

Parâmetro	Controle (sem revestimento)	PVC	Biofilme (pectina + própolis)
Perda de massa (%)	15,2 ± 1,5	8,7 ± 0,9	7,3 ± 0,8
Firmeza (N)	5,8 ± 0,7	8,3 ± 1,0	10,5 ± 1,2
Taxa respiratória (mL CO ₂ /kg·h)	42,5 ± 3,8	28,6 ± 2,5	22,3 ± 2,1
Produção de etileno (µL/kg·h)	8,5 ± 0,9	5,2 ± 0,6	4,1 ± 0,5
Contagem de bolores e leveduras (log UFC/g)	4,8 ± 0,5	3,2 ± 0,4	1,8 ± 0,3
Aceitação sensorial (escala 1-9)*	5,2 ± 0,6	7,1 ± 0,8	7,8 ± 0,7
Vida útil estimada (dias)	6-7	10-12	14-16

Fonte: Adaptado de Monteiro (2021) e Melo (2022).

Os resultados destacam a superioridade do biofilme à base de pectina + extrato de própolis em relação ao filme PVC convencional, especialmente em termos de controle microbiológico e aceitação sensorial. Além disso, o biofilme apresenta a vantagem adicional de ser biodegradável, representando uma alternativa sustentável ao PVC.

2.4.5. Fatores que influenciam a eficácia dos biofilmes em frutas e hortaliças

A eficácia dos biofilmes na conservação pós-colheita de frutas e hortaliças é influenciada por diversos fatores, que podem ser agrupados em três categorias principais: (1) fatores relacionados ao biofilme, (2) fatores relacionados ao produto e (3) fatores relacionados às condições de armazenamento. A Tabela 6 apresenta os principais fatores em cada categoria e seu impacto na eficácia dos biofilmes.

Tabela 6 - Fatores que influenciam a eficácia dos biofilmes em frutas e hortaliças

Categoria	Fator	Impacto na eficácia	Referências
Relacionados ao biofilme	Composição	Determina propriedades de barreira, mecânicas e funcionais	Olivas e Barbosa-Cánovas (2009)
	Concentração dos componentes	Afeta espessura, permeabilidade e resistência	Kocira et al. (2021)

	Método de aplicação	Influencia uniformidade e aderência	Nunes et al. (2023)
	Incorporação de compostos ativos	Potencializa efeitos antimicrobianos e antioxidantes	Matloob et al. (2023)
Relacionados ao produto	Espécie/variedade	Diferentes respostas fisiológicas e suscetibilidade	Batista (2013)
	Estágio de maturação	Afeta taxa respiratória e resposta ao revestimento	Olivas e Barbosa-Cánovas (2009)
	Características da superfície	Influencia aderência e uniformidade do revestimento	Menezes Filho (2020)
	Taxa respiratória	Determina necessidade de permeabilidade a gases	Batista (2013)
Relacionados ao armazenamento	Temperatura	Afeta metabolismo do fruto e propriedades do biofilme	Nunes et al. (2023)
	Umidade relativa	Influencia perda de água e estabilidade do biofilme	Chettri et al. (2023)
	Composição atmosférica	Interage com efeito de barreira do biofilme	Olivas e Barbosa-Cánovas (2009)
	Tempo de armazenamento	Determina durabilidade do efeito protetor	Melo (2022)

Fonte: O autor (2025)

A compreensão desses fatores é fundamental para o desenvolvimento de biofilmes com características otimizadas para cada aplicação específica. Por exemplo, frutas climatéricas com alta taxa respiratória (como banana, mamão e manga) requerem biofilmes com permeabilidade moderada a gases para evitar a anaerobiose e o desenvolvimento de sabores e odores indesejáveis. Por outro lado, produtos minimamente processados, com tecidos danificados e alta suscetibilidade à contaminação microbiana, beneficiam-se de biofilmes com propriedades antimicrobianas (OLIVAS; BARBOSA-CÁNOVAS, 2009; BATISTA, 2013).

2.4.6. Tendências e perspectivas futuras

O campo de biofilmes aplicados à conservação de frutas e hortaliças está em constante evolução, com diversas tendências emergentes que prometem expandir ainda mais as aplicações desses materiais. Entre as principais tendências, destaca-se o desenvolvimento de biofilmes ativos e inteligentes, que incorporam compostos bioativos (antimicrobianos, antioxidantes) e indicadores (de temperatura, pH, gases) para conferir funcionalidades

adicionais aos biofilmes, como proteção antimicrobiana e monitoramento da qualidade em tempo real (PAN et al., 2024).

Outra área de grande interesse é a Nanotecnologia, que utiliza nanopartículas e nanoestruturas para melhorar as propriedades de barreira, mecânicas e funcionais dos biofilmes, bem como para modular a liberação de compostos bioativos (MATLOOB et al., 2023). O desenvolvimento de biofilmes multicamadas também representa uma estratégia promissora, focando na criação de estruturas em camadas que combinam diferentes biopolímeros para otimizar propriedades específicas, como a barreira à umidade e a gases (MARTINS et al., 2024).

Paralelamente, a pesquisa intensifica-se no aproveitamento de resíduos agroindustriais, buscando a extração e utilização de biopolímeros e compostos bioativos de resíduos, alinhando-se aos princípios da economia circular e da bioeconomia (MENEZES FILHO, 2020; USMAN et al., 2025). Por fim, o foco se volta para os processos de aplicação em escala industrial, visando o desenvolvimento de tecnologias e equipamentos para a aplicação eficiente de biofilmes em escala industrial, superando limitações atuais relacionadas à uniformidade, aderência e tempo de secagem (NUNES et al., 2023).

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre biofilmes convencionais e biofilmes de nova geração, destacando os avanços recentes e perspectivas futuras.

Tabela 7 - Comparação entre biofilmes convencionais e biofilmes de nova geração para aplicação em frutas e hortaliças

Característica	Biofilmes convencionais	Biofilmes de nova geração	Referências
Composição	Biopolímeros simples (amido, pectina, proteínas)	Blendas complexas, nanocompósitos, estruturas multicamadas	Martins et al. (2024)
Funcionalidade	Principalmente barreira física	Multifuncional: barreira física + atividade biológica + indicadores de qualidade	Pan et al. (2024)
Propriedades de barreira	Limitadas, especialmente à umidade	Melhoradas por nanopartículas, estruturas multicamadas	Matloob et al. (2023)
Atividade antimicrobiana	Geralmente ausente ou limitada	Potencializada por nanopartículas, óleos essenciais, peptídeos	Nunes et al. (2023)
Atividade antioxidante	Geralmente ausente ou	Incorporação de extratos vegetais,	Chettri et al.

	limitada	compostos fenólicos	(2023)
Biodegradabilidade	Variável, dependendo da composição	Controlada, com tempos de degradação otimizados	Usman et al. (2025)
Monitoramento da qualidade	Não disponível	Incorporação de indicadores colorimétricos de frescor	Pan et al. (2024)
Aplicabilidade industrial	Limitada por questões técnicas e econômicas	Melhorada por novos processos e equipamentos	Nunes et al. (2023)

Fonte: O autor (2025)

Essas tendências apontam para um futuro promissor para os biofilmes no setor de frutas e hortaliças, com potencial para revolucionar as práticas de conservação pós-colheita e contribuir significativamente para a redução do desperdício de alimentos e da poluição ambiental causada por embalagens plásticas convencionais.

2.4.7. Desafios para implementação em escala comercial

Apesar dos avanços significativos e resultados promissores em escala laboratorial, a implementação comercial de biofilmes para frutas e hortaliças ainda enfrenta diversos desafios. A Tabela 8 apresenta os principais desafios e possíveis estratégias para superá-los.

Tabela 8 - Desafios para implementação comercial de biofilmes em frutas e hortaliças e estratégias para superá-los

Desafio	Descrição	Estratégias para superação	Referências
Custo de produção	Geralmente superior ao de embalagens convencionais	Otimização de processos, economia de escala, valorização de resíduos	Usman et al. (2025)
Propriedades de barreira	Limitações em termos de barreira à umidade	Desenvolvimento de estruturas multicamadas, incorporação de componentes hidrofóbicos	Martins et al. (2024)
Estabilidade durante armazenamento	Degradação prematura, alterações nas propriedades	Incorporação de estabilizantes, otimização da formulação	Nunes et al. (2023)
Aplicação em escala industrial	Dificuldades técnicas para aplicação uniforme em grandes volumes	Desenvolvimento de equipamentos específicos, adaptação de tecnologias existentes	Chettri et al. (2023)

Regulamentação	Falta de regulamentação específica para biofilmes comestíveis	Estudos de segurança, articulação com órgãos reguladores	Matloob et al. (2023)
Aceitação do consumidor	Percepção negativa ou desconhecimento	Educação do consumidor, marketing destacando benefícios ambientais e para a saúde	Pan et al. (2024)
Escalonamento da produção	Dificuldades na transição de escala laboratorial para industrial	Parcerias com indústrias, projetos-piloto	Usman et al. (2025)

Fonte: O autor (2025)

A superação desses desafios requer uma abordagem multidisciplinar e colaborativa, envolvendo pesquisadores, indústrias, órgãos reguladores e consumidores. O desenvolvimento de políticas públicas de incentivo à utilização de materiais biodegradáveis, bem como a crescente conscientização ambiental dos consumidores, são fatores que podem acelerar a adoção comercial de biofilmes em frutas e hortaliças.

2.4.8. Considerações finais sobre aplicações em frutas e hortaliças

A aplicação de biofilmes em frutas e hortaliças representa uma fronteira promissora na interface entre ciência de alimentos, ciência de materiais e sustentabilidade. Os estudos revisados nesta seção demonstram que biofilmes à base de pectina extraída de resíduos de melão e melancia, bem como de outros biopolímeros, podem contribuir significativamente para a extensão da vida útil e manutenção da qualidade pós-colheita de diversos produtos hortifrutícolas.

Os biofilmes oferecem vantagens significativas em relação às embalagens convencionais, como biodegradabilidade, comestibilidade, capacidade de serem incorporados como compostos bioativos e potencial para serem produzidos a partir de resíduos agroindustriais. No entanto, desafios técnicos, econômicos e regulatórios ainda precisam ser superados para viabilizar sua implementação em escala comercial.

O contínuo avanço da pesquisa nesta área, com foco em melhorar as propriedades funcionais dos biofilmes, reduzir custos de produção e desenvolver tecnologias de aplicação em escala industrial, será fundamental para consolidar os biofilmes como alternativa viável e sustentável às embalagens plásticas convencionais no setor de frutas e hortaliças

3. MÉTODOS DE PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOFILMES A PARTIR DE RESÍDUOS DE FRUTAS E HORTALIÇAS

A produção de biofilmes a partir de resíduos agroindustriais é um campo de pesquisa multidisciplinar que envolve uma série de etapas, desde a preparação da matéria-prima até a caracterização detalhada do material final.

Diferentemente de uma metodologia experimental, esta seção descreve os principais métodos reportados na literatura científica para a obtenção e avaliação de biofilmes biodegradáveis, com foco no aproveitamento de subprodutos de frutas e hortaliças.

As técnicas aqui apresentadas são consolidadas e foram aplicadas em diversos estudos, servindo como base para o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis.

3.1. OBTENÇÃO E PREPARO DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Os resíduos, como cascas, bagaços e sementes, são coletados e submetidos a etapas de pré-tratamento. A lavagem e a sanitização são cruciais para remover sujidades e reduzir a carga microbiana, sendo a sanitização frequentemente realizada com solução de hipoclorito de sódio em concentrações que variam de 100 a 200 ppm (partes por milhão) (MUNHOZ et al., 2018; CARVALHO, 2021).

A etapa de secagem é fundamental para a conservação e posterior processamento. A literatura reporta o uso de estufas com circulação de ar a temperaturas que variam de 40 a 70°C, até atingirem uma umidade final baixa (geralmente abaixo de 15%), o que garante sua estabilidade microbiológica para armazenamento (ALI et al., 2024).

3.1.1. Obtenção da Farinha e Extração Direta

O material seco é moído para a obtenção de uma farinha com granulometria controlada. A moagem aumenta a área de superfície do material, facilitando a extração de componentes ou o uso direto da farinha como material de reforço em compósitos. A farinha obtida pode ser usada diretamente na formulação de biofilmes, como demonstrado por Gupta, Toksha e Rahaman (2022), que utilizaram farinha de casca de maracujá em matrizes de amido.

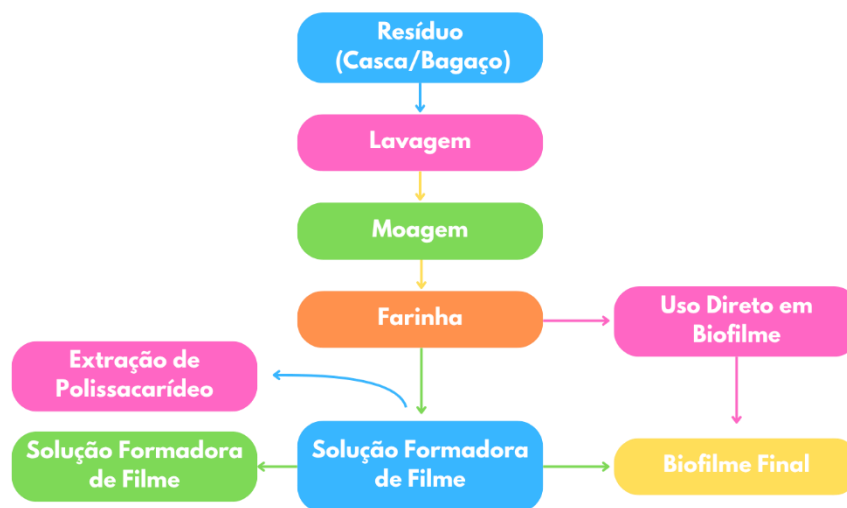
A Tabela 9 ilustra o potencial de diferentes resíduos de frutas e hortaliças para a produção de biofilmes, destacando a fração utilizada e o principal biopolímero de interesse. A figura 1 ilustra as etapas de valorização de resíduos de frutas e hortaliças para a produção de biofilmes.

Tabela 9 - Exemplos de resíduos de frutas e hortaliças utilizados na produção de biofilmes

Resíduo (Fonte)	Fração Utilizada	Principal Biopolímero/Composto	Estudo de Referência
Melão (<i>Cucumis melo L.</i>)	Casca (Entrecasca)	Pectina, Fibras	OLIVEIRA et al. (2020)
Manga (<i>Mangifera indica L.</i>)	Casca	Pectina, Compostos Fenólicos	RIBEIRO et al. (2021)
Maracujá (<i>Passiflora edulis</i>)	Casca (Albedo)	Pectina, Fibras	MUNHOZ et al. (2018)
Batata Doce (<i>Ipomoea batatas</i>)	Casca, Polpa	Amido, Fibras	SARMA et al. (2024)
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Bagaço (Pomace)	Pectina, Licopeno	CARVALHO (2021)

Fonte: O autor (2025)

Figura 1 - Fluxograma de valorização de resíduos de frutas e hortaliças para a produção de biofilmes



Fonte: O autor (2025)

3.2. EXTRAÇÃO DE POLISSACARÍDEOS E OUTROS COMPONENTES

Os resíduos de frutas e hortaliças são fontes ricas em polissacarídeos com excelentes propriedades filmogênicas, com destaque para a pectina e o amido.

3.2.1. Extração de Pectina

A pectina é um dos biopolímeros mais promissores para a produção de biofilmes, e sua extração de resíduos é amplamente estudada. O método de extração mais comum é a hidrólise ácida em meio aquoso e sob aquecimento. O processo envolve a suspensão da farinha do resíduo em água, o ajuste do pH para valores ácidos (geralmente entre 1,5 e 3,0) com ácidos como o cítrico ou clorídrico, e a manutenção da mistura sob agitação e

temperatura controlada (60 a 90°C) por um determinado período (1 a 3 horas) (NADAR et al., 2022).

Estudos comparativos, como o realizado por Karim et al. (2022), detalharam a extração de pectina de cascas de limão e manga, utilizando ácido cítrico e tampão citrato monossódico. Os autores otimizaram as condições de processo, demonstrando que as variações de pH, temperatura e tempo afetam diretamente o rendimento e a qualidade da pectina (Grau de Metoxilação - GM). É importante notar que pectinas de baixo GM (BGM) são frequentemente obtidas em condições mais severas de extração ácida.

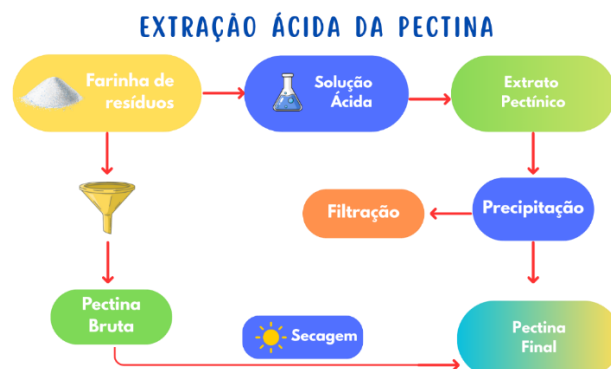
Além disso, Nadar et al. (2022) destacam que métodos não convencionais, como a Extração Assistida por Ultrassom (EAU) ou Micro-ondas (EAM), são investigados por permitirem a redução do tempo de extração e do consumo de solventes, alinhando-se a uma perspectiva de química verde. A tabela 10 compara as condições de extração de pectina em diferentes resíduos. A figura 2 demonstra o processo de extração da pectina a partir de resíduos agroindustriais.

Tabela 10 - Comparação de condições de extração de pectina de diferentes resíduos

Resíduo (Fonte)	Agente Extrator	pH	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Rendimento (%)	Referência
Casca de Limão	Ácido Cítrico	2,0	80	60	28,5	KARIM et al. (2022)
Casca de Manga	Ácido Cítrico	2,0	80	60	18,9	KARIM et al. (2022)
Casca de Maracujá	Ácido Nítrico	1,5	90	60	15,2	MUNHOZ et al. (2018)
Casca de Melancia	Ácido Cítrico	2,0	90	90	11,5	CARVALHO (2021)

Fonte: O autor (2025)

Figura 2 - Diagrama do processo de extração ácida de pectina a partir de resíduos agroindustriais



Fonte: O autor (2025)

3.2.2. Extração de Amido

Para resíduos ricos em amido, como tubérculos e algumas sementes, a extração é geralmente realizada por soluções aquosas. O processo envolve a moagem do material em água, seguida de uma série de etapas de filtração e decantação para separar as fibras e outros componentes. O amido, por ser insolúvel em água fria e mais denso, sedimenta-se, permitindo sua separação.

A suspensão de amido é então centrifugada e o amido purificado é seco. Sarma et al. (2024) destacam que o amido proveniente de resíduos de frutas e vegetais possui inúmeras aplicações, incluindo a produção de filmes biodegradáveis para embalagens de alimentos.

3.3. MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE BIOFILMES

Uma vez obtido o polímero (ou a farinha do resíduo), a etapa seguinte é a produção do biofilme. Dentre as várias técnicas existentes, o método de casting é o mais utilizado em escala laboratorial pela sua simplicidade e baixo custo.

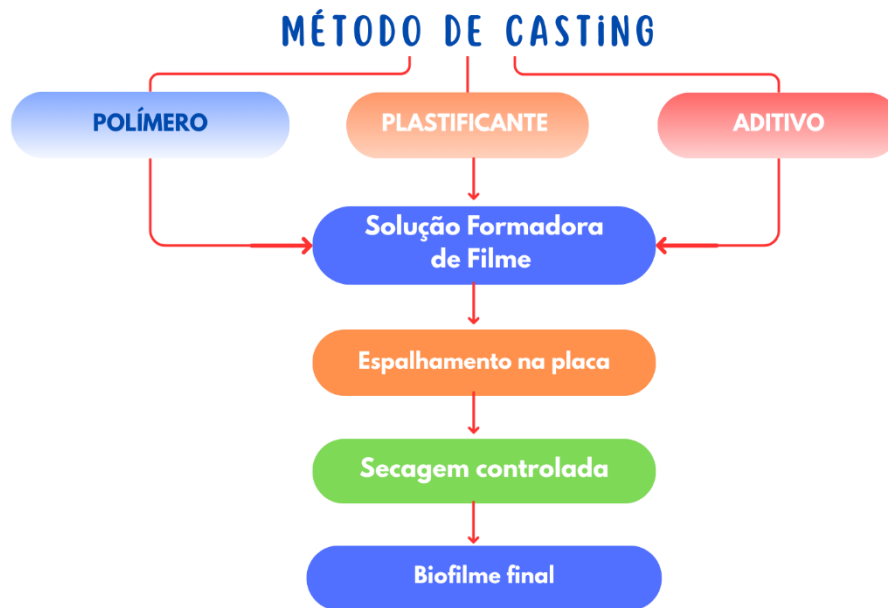
3.3.1. Método de Casting (Evaporação de Solvente)

O método de casting consiste na preparação de uma solução filmogênica, que é espalhada sobre uma superfície plana e seca sob condições controladas. A solução envolve a dispersão ou solubilização do polímero (ex: pectina, amido) em um solvente (geralmente água). A essa dispersão, são adicionados os plastificantes, como o glicerol e o sorbitol, que são essenciais para aumentar a flexibilidade e a maleabilidade do filme, reduzindo sua fragilidade (TURHAN; ŞAHBAZ, 2004).

Para criar biofilmes ativos, aditivos como extratos de compostos fenólicos (RIBEIRO et al., 2021) ou óleos essenciais (SAID et al., 2025) são incorporados à solução filmogênica. Após a homogeneização e deaeração (remoção de bolhas de ar), a solução é vertida sobre um suporte (placas de Petri ou de vidro) e seca em estufa com temperatura e umidade relativa controladas. Machado et al. (2024) reforçam que a secagem controlada é vital, pois a taxa de evaporação do solvente influencia diretamente a microestrutura e as propriedades finais do filme.

A figura 3 demonstra o esquema conceitual do método de casting.

Figura 3 - Esquema conceitual do método de casting (evaporação de solvente para a produção de biofilmes)



Fonte: O autor (2025)

3.4. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS BIOFILMES

Para avaliar a qualidade e a potencial aplicação de um biofilme, é essencial caracterizar suas propriedades. A literatura descreve um conjunto de análises padronizadas para determinar as propriedades físicas, mecânicas, de barreira, ópticas, estruturais e de biodegradabilidade dos materiais.

3.4.1. Propriedades Físicas

As propriedades físicas incluem a espessura, que é medida com um micrômetro digital em diversos pontos da amostra para verificar a uniformidade do filme. A espessura é um parâmetro fundamental, pois é utilizada para normalizar outras propriedades, como a Permeabilidade ao Vapor de Água (PVA) (TURHAN; ŞAHBAZ, 2004).

Outras análises importantes são o teor de umidade, que indica a afinidade do filme com a água, e a solubilidade em água, que avalia a integridade do filme em contato com o solvente. Uma alta solubilidade pode ser desejável para filmes comestíveis, mas indesejável para embalagens que serão expostas a ambientes úmidos (ESPITIA et al., 2014).

3.4.2. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas determinam a resistência e a elasticidade do filme, sendo cruciais para sua função como embalagem. Estes ensaios são tipicamente conduzidos em uma máquina universal de ensaios, seguindo normas internacionais como a ASTM D882-12 (CHAVES et al., 2024).

As principais medidas são a Resistência à Tração (RT), que é a força máxima que o filme pode suportar antes de se romper; a Elongação na Ruptura (%E), que representa a capacidade do filme de se esticar (flexibilidade); e o Módulo de Young, que indica a rigidez do material. Por exemplo, Said et al. (2025) demonstraram que a incorporação de óleos essenciais em filmes de pectina resultou em uma redução da RT e um aumento da %E.

Este resultado é típico de um efeito plastificante, onde o aditivo se insere na matriz polimérica, diminuindo as interações intermoleculares e tornando o filme mais flexível, porém menos resistente.

3.4.3. Propriedades de Barreira

As propriedades de barreira são vitais para a proteção do alimento. A Permeabilidade ao Vapor de Água (PVA) é a propriedade mais crítica para a maioria dos biopolímeros hidrofílicos. É medida pelo método gravimétrico (ASTM E96/E96M), onde o filme sela um recipiente e a taxa de transferência de vapor é monitorada (TURHAN; ŞAHBAZ, 2004).

Além disso, a Permeabilidade a Gases (O_2 , CO_2) é fundamental para a conservação de muitos produtos, sendo que uma baixa permeabilidade ao O_2 é geralmente desejada para minimizar reações de oxidação.

3.4.4. Propriedades Ópticas

As propriedades ópticas, como cor e transparência, são importantes para a aceitação do consumidor. A cor é medida no sistema CIELab, enquanto a transparência é quantificada pela transmitância de luz. Ursachi et al. (2024) observaram que a adição de pectina a filmes de amido aumentou a transparência, uma propriedade desejável para embalagens.

3.4.5. Análise Morfológica e Estrutural

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é utilizada para visualizar a superfície e a seção transversal do filme em alta resolução, revelando a homogeneidade da matriz. A

presença de poros ou aglomerados (Ali et al., 2024) indica problemas de dispersão e compromete as propriedades.

A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é usada para identificar os grupos funcionais e, crucialmente, as interações intermoleculares (ligações de hidrogênio) entre os componentes do filme.

Karim et al. (2022) utilizaram o FTIR para confirmar a compatibilidade da pectina extraída com os plastificantes. Por fim, a Difração de Raios X (DRX) determina o grau de cristalinidade do material, o qual afeta significativamente a rigidez, a resistência mecânica e as propriedades de barreira do filme (BAIDURAH, 2022).

3.4.6. Análise de Biodegradabilidade

A biodegradabilidade é a principal vantagem ambiental dos biofilmes. A avaliação é feita por métodos que simulam condições ambientais, como o ensaio de biodegradação em solo, onde a perda de massa de amostras enterradas é monitorada ao longo do tempo (MUNHOZ et al., 2018). A tabela 11 resume as técnicas de caracterização e seu significado para biofilmes.

Tabela 11 - Resumo das técnicas de caracterização e seu significado para biofilmes

Propriedade	Técnica Padrão	Significado para o Biofilme	Referência Chave
Mecânica	Ensaio de Tração (ASTM D882)	Capacidade de resistir ao manuseio e transporte (RT, %E, Módulo)	CHAVES et al. (2024)
Barreira	Permeabilidade ao Vapor de Água (ASTM E96)	Capacidade de proteger o alimento contra ganho/perda de umidade	TURHAN & ŞAHBAZ (2004)
Estrutural	FTIR	Confirmação de interações polímero-aditivo e compatibilidade da matriz	KARIM et al. (2022)
Morfológica	MEV	Avaliação da homogeneidade, porosidade e dispersão de aditivos	ALI et al. (2024)
Ambiental	Biodegradação em Solo	Taxa de decomposição no ambiente (sustentabilidade)	MUNHOZ et al. (2018)

Fonte: O autor (2025)

4. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE BIOFILMES A PARTIR DE RESÍDUOS DE FRUTAS E HORTALIÇAS

A eficácia de um biofilme como embalagem é determinada pela combinação de suas propriedades funcionais, que são intrinsecamente ligadas à composição da matéria-prima e ao método de produção. Esta seção discute os resultados de estudos de relatados na literatura, as propriedades físico-químicas, mecânicas e de barreira de biofilmes desenvolvidos a partir de diferentes resíduos de frutas e hortaliças, conforme as técnicas de caracterização detalhadas na Seção 3.

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS RESÍDUOS

A premissa para a valorização de resíduos é sua composição química. O aproveitamento de resíduos de frutas e hortaliças, como cascas de manga, maracujá, melão e tomate, é justificado pela alta concentração de polissacarídeos (pectina, celulose, amido) e compostos bioativos (fenólicos, carotenoides). A pectina, por exemplo, é um dos polissacarídeos mais estudados.

Resíduos como a casca de melancia e de melão são fontes promissoras. Carvalho (2021) demonstrou a viabilidade da extração de pectina da casca de melancia, reforçando a ideia de que esses resíduos são alternativas aos citros e maçã. A qualidade da pectina extraída, determinada pelo seu Grau de Metoxilação (GM), influencia diretamente a formação de biofilmes e suas propriedades.

Além da matriz polimérica, a presença de compostos bioativos confere a capacidade de produzir embalagens ativas. Ribeiro et al. (2021) utilizaram cascas de manga ricas em compostos fenólicos para desenvolver filmes com propriedades antioxidantes. Os resultados mostraram que a incorporação desses extratos nos filmes de pectina aumentou a atividade antioxidante (medida por ensaios como DPPH), o que é um fator crucial para retardar a oxidação lipídica e prolongar a vida útil de alimentos.

4.2. PROPRIEDADES DE BARREIRA: PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (PVA)

A Permeabilidade ao Vapor de Água (PVA) é a propriedade de barreira mais crítica para biofilmes, pois a maioria dos biopolímeros (pectina, amido) é hidrofílica, resultando em filmes com alta PVA em comparação com plásticos sintéticos. Turhan e Şahbaz (2004) destacam que a composição da solução filmogênica e a presença de plastificantes afetam diretamente a PVA.

O glicerol, por ser hidrofílico, aumenta a mobilidade das cadeias poliméricas e, consequentemente, a PVA. Filmes à base de pectina pura ou amido tendem a ter PVA elevada. Para mitigar isso, a literatura reporta a adição de componentes hidrofóbicos. Por exemplo, a incorporação de óleos essenciais (OEs) ou lipídios na matriz polimérica cria uma estrutura mais tortuosa para a passagem do vapor de água, reduzindo a PVA. Embalagens ativas com a incorporação de OEs em filmes de pectina, como as estudadas por Said et al. (2025), buscam um equilíbrio: embora os OEs possam reduzir a PVA, a eficácia da barreira ainda é um desafio que exige a otimização da formulação, muitas vezes com o uso de blendas poliméricas (ex: pectina/amido) ou o uso de reforços como nanopartículas.

4.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS: RESISTÊNCIA, FLEXIBILIDADE E RIGIDEZ

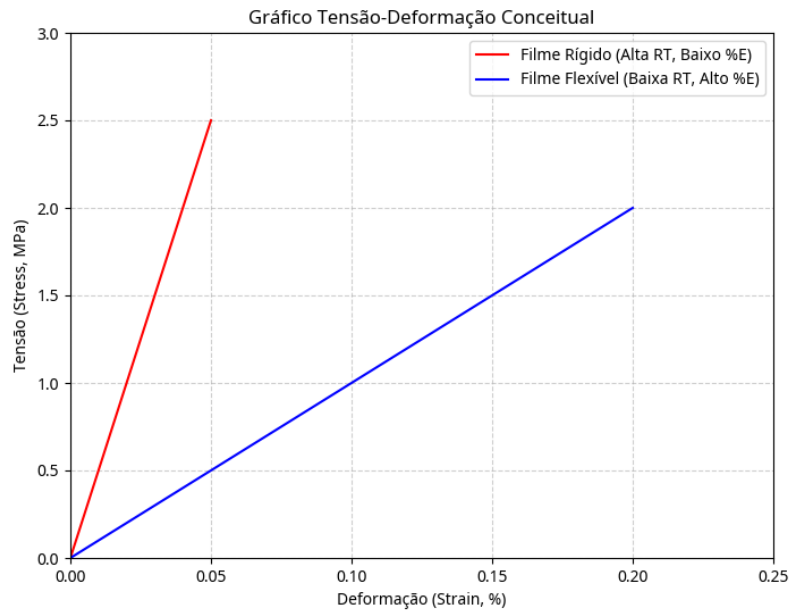
As propriedades mecânicas (Resistência à Tração - RT, Elongação na Ruptura - %E, e Módulo de Young) determinam a capacidade do filme de suportar o manuseio e a tensão de aplicação. O plastificante é o principal modulador das propriedades mecânicas. Said et al. (2025) observaram que a incorporação de óleos essenciais em filmes de pectina resultou em uma redução da RT e um aumento da %E.

Isso ocorre porque o óleo essencial atua como plastificante, tornando o filme mais flexível (maior %E) e menos resistente (menor RT). Estudos como o de Ursachi et al. (2024) demonstraram que a adição de pectina a filmes de amido pode aumentar a RT, sugerindo uma melhor interação intermolecular entre os polímeros, o que confere maior coesão à matriz. Filmes de pectina tendem a ser mais rígidos e frágeis do que filmes de amido, exigindo um teor de plastificante maior para atingir a flexibilidade necessária para o uso em embalagens.

Chaves et al. (2024) caracterizaram filmes de pectina/amido, mostrando que a RT e o Módulo de Young podem ser ajustados pela proporção dos polímeros, visando um equilíbrio entre resistência e flexibilidade.

A Figura 4 ilustra o comportamento mecânico de diferentes biofilmes. Filmes mais rígidos, como os de pectina pura, tendem a apresentar alta Resistência à Tração (RT) e baixa Elongação na Ruptura (%E), enquanto a adição de plastificantes ou a escolha de biopolímeros mais flexíveis, como o amido, resulta em filmes com menor RT e maior %E (CHAVES et al., 2024).

Figura 4 - Gráfico conceitual de tensão-deformação comparando o comportamento mecânico de filmes rígidos (alta resistência, baixa flexibilidade) e filmes flexíveis (baixa resistência, alta flexibilidade)



Fonte: O autor (2025)

4.4. PROPRIEDADES ÓPTICAS E ANÁLISE ESTRUTURAL

As propriedades ópticas e a microestrutura são essenciais para a aceitação e funcionalidade do biofilme. A transparência é geralmente desejável para permitir a visualização do produto.

Ursachi et al. (2024) reportaram que a adição de pectina a filmes de amido aumentou a transparência. Contudo, a incorporação de farinhas integrais de resíduos ou extratos com alta concentração de pigmentos (como carotenoides ou antocianinas) pode aumentar a opacidade e alterar a cor do filme (ALI et al., 2024). Essa alteração pode ser intencional em embalagens que protegem o alimento da luz UV (embalagem ativa) ou que servem como indicadores de pH (embalagem inteligente).

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é fundamental para verificar a homogeneidade do filme. Filmes ideais devem apresentar uma superfície lisa e uniforme. A presença de poros, fissuras ou aglomerados de partículas (aditivos, farinhas) indica uma dispersão inadequada e pode comprometer as propriedades mecânicas e de barreira (ALI et al., 2024).

A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é crucial para confirmar a interação entre os componentes. Karim et al. (2022) utilizaram o FTIR para verificar a formação de ligações de hidrogênio entre a pectina e os plastificantes, o que é um

indicativo da compatibilidade da matriz polimérica e ajuda a explicar as mudanças nas propriedades mecânicas e de barreira.

Em suma, a literatura demonstra que o desenvolvimento de biofilmes a partir de resíduos de frutas e hortaliças é um processo de otimização contínua. A escolha da matriz polimérica (pectina, amido), a concentração de plastificante e a incorporação de aditivos funcionais (compostos bioativos) são fatores que, quando ajustados com base nas técnicas de caracterização, permitem a criação de embalagens biodegradáveis com desempenho promissor para a conservação de alimentos.

CONCLUSÃO

Esta revisão da literatura consolidou o vasto potencial dos resíduos da agroindústria de frutas e hortaliças como matéria-prima de baixo custo e ambientalmente amigável para a produção de biofilmes biodegradáveis. A análise dos estudos demonstra que subprodutos como cascas, sementes e bagaços são fontes ricas em biopolímeros filmogênicos, como pectina e amido, e compostos bioativos que podem agregar funcionalidades às embalagens.

Conclui-se que a valorização desses resíduos está perfeitamente alinhada com os princípios da economia circular, transformando um passivo ambiental em um produto de alto valor agregado. As pesquisas futuras devem focar na otimização dos processos de extração e produção em maior escala, na melhoria das propriedades de barreira e mecânicas dos filmes para competir com os plásticos convencionais, e na realização de estudos de viabilidade econômica e análise de ciclo de vida para acelerar a transição desses materiais do laboratório para o mercado.

REFERÊNCIAS

ALI, M. Q. et al. **An overview: exploring the potential of fruit and vegetable waste and by-products in food biodegradable packaging.** Discover Food, v. 4, n. 130, 2024. DOI: 10.1007/s44187-024-00117-4.

ALVES, T. S. **Obtenção e caracterização de filmes biodegradáveis a partir do amido de manga (*Mangifera indica* L.)** var. Tommy Atkins. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

BAIDURAH, S. **Methods of analyses for biodegradable polymers: a review.** Polymers, v. 14, n. 22, p. 4928, 2022.

CARVALHO, M. S. M. **Extração de Pectina de casca de melancia: produção de biofilmes e aplicação de Pectina cítrica como cobertura comestível na conservação pós-colheita de tomate cereja.** 2021. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2021.

CHANDEL, V. et al. **Current Advancements in Pectin: Extraction, Properties and Multifunctional Applications.** Foods, v. 11, n. 17, p. 2683, 2022. DOI: 10.3390/foods11172683.

CHAVES, M. L. C. et al. **Biodegradable Pectin/Starch-Based Films Applied on Fresh Fruits.** ACS Omega, v. 9, n. 1, p. 1163-1174, 2024.

ESPITIA, P. J. P. et al. **Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties—A review.** Food Hydrocolloids, v. 35, p. 1-13, 2014.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2016: Climate Change, Agriculture and Food Security.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.

GUERRA, A. F. et al. **Resíduos agroindustriais: uma perspectiva para a produção de alimentos funcionais.** Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2015.

GUPTA, P.; TOKSHA, B.; RAHAMAN, M. **A review on biodegradable packaging films from vegetative and food waste.** The Chemical Record, v. 22, n. 1, p. e202100326, 2022.
KARIM, R. et al. **Pectin from lemon and mango peel: Extraction, characterisation and application in biodegradable film.** Food Packaging and Shelf Life, v. 32, p. 100870, 2022.

MUNHOZ, D. R. et al. **Sustainable Production and *In vitro* Biodegradability of Edible Films from Yellow Passion Fruit Coproducts via Continuous Casting.** ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 6, n. 12, p. 16560-16569, 2018.

NADAR, C. G.; ARORA, A.; SHASTRI, Y. **Sustainability Challenges and Opportunities in Pectin Extraction from Fruit Waste.** ACS Engineering Au, v. 2, n. 6, p. 453-467, 2022.

OLIVEIRA, K. C. I. et al. **Efeito do revestimento de quitosana e bentonita na conservação de melão minimamente processado**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 13, n. 2, p. 451-468, 2020.

RIBEIRO, A. C. B. et al. **Pectin-phenolic antioxidant films from mango peels**. International Journal of Biological Macromolecules, v. 192, p. 1060-1068, 2021.

RIFNA, E. J.; MISRA, T.; DWIVEDI, M. **Valorization of fruit and vegetable waste to develop biodegradable packaging: a review**. Journal of Food Science and Technology, v. 58, n. 12, p. 4591-4606, 2021.

SAID, N. S. et al. **Pectin-Based Active and Smart Film Packaging**. Polymers, v. 17, n. 1, p. 21, 2025.

SARMA, M. et al. **Starch-Based Biodegradable Film from Fruit and Vegetable Waste**. Starch - Stärke, v. 76, n. 1-2, p. 2300082, 2024.

SILVA, M. A. da. **Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis à base de amido de mandioca e proteína de soja**. 2005. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

TURHAN, K. N.; ŞAHBAZ, F. **Water vapor permeability, tensile properties and solubility of methylcellulose-based edible films**. Journal of Food Engineering, v. 61, n. 3, p. 459-464, 2004.

URSACHI, V. F. et al. **Development and characterization of biodegradable films based on cassava starch and pectin**. Food Packaging and Shelf Life, v. 41, p. 101292, 2024.