

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

BIANCA STELLA PRIGOL

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES POLIMÉRICOS À BASE
DE SORO DE LEITE E AMIDO DE MILHO**

CAXIAS DO SUL

2025

BIANCA STELLA PRIGOL

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES POLIMÉRICOS À BASE
DE SORO DE LEITE E AMIDO DE MILHO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como parte dos requisitos
necessários para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Química da
Universidade de Caxias do Sul.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Camila Baldasso

CAXIAS DO SUL

2025

BIANCA STELLA PRIGOL

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES POLIMÉRICOS À BASE
DE SORO DE LEITE E AMIDO DE MILHO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como parte dos requisitos
necessários para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Química da
Universidade de Caxias do Sul.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Camila Baldasso

Orientadora:

Prof. Dra. Camila Baldasso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wendel Paulo Silvestre

Ma. Júlia Daneluz

CAXIAS DO SUL

2025

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço profundamente aos meus pais, que me proporcionaram viver essa jornada. A vocês, minha eterna gratidão, admiração e amor. Sem o apoio incondicional de vocês, este sonho não teria se concretizado. Ao meu irmão, que esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis, oferecendo apoio e força: obrigada por sempre estar presente. Sei que abdicar de momentos em família foi necessário, mas mesmo distantes, nunca deixamos de estar unidos.

Aos que já não estão mais entre nós, em especial aos meus queridos avós, deixo meu carinho e saudade. Durante a minha trajetória acadêmica, precisei me despedir da presença física de vocês, mas carrego comigo tudo o que me ensinaram. Sei que estariam orgulhosos da pessoa que me tornei. À minha amiga e colega Érica, que partiu de forma repentina, dedico esta conquista. Você foi um presente que a universidade me deu, e sua memória seguirá viva comigo — este trabalho também é seu.

Ao meu namorado Marcelo, agradeço a paciência, compreensão e por cada gesto de apoio durante os momentos em que precisei me ausentar para estudar. Suas vivências e conhecimentos sobre engenharia trouxeram leveza e acolhimento neste encerramento de ciclo. Sou grata por compartilhar essa etapa com você.

Às minhas amigas de infância, Joanna e Luzia, que estiveram ao meu lado em todas as fases da vida, desde o Jardim, até os desafios do fim de curso: vocês representam o verdadeiro significado de amizade e lealdade. Cada palavra de conforto e celebração será guardada para sempre no meu coração.

Aos amigos que tive o privilégio de conhecer desde que me mudei para Caxias do Sul, meu muito obrigada. Vocês me acolheram e fizeram com que eu me sentisse pertencente a esta cidade. Cada um teve um papel especial na pessoa que me tornei.

Às minhas colegas de graduação, Ingrid, Eduarda, Vitória e Nicole, meu agradecimento mais sincero. Sem vocês, este sonho não teria sido possível. Vocês foram fundamentais na minha formação como engenheira química.

Aos professores que contribuíram com minha formação, minha gratidão. Em especial, à professora Camila Baldasso, por quem tenho profunda admiração como pessoa e profissional. À Jocelei, que conheci por meio da professora Camila, agradeço pelos ensinamentos no laboratório e pelas valiosas conversas. Este trabalho só foi possível graças à sua orientação e dedicação.

“Cresci vendo meus pais suando para me proporcionarem oportunidades e uma boa educação. Vencer na vida nunca foi no singular. É no plural: vou vencer, porque eles vencem comigo.”

RESUMO

Os materiais poliméricos são amplamente utilizados na fabricação de embalagens devido à sua resistência mecânica e versatilidade. Contudo, a dependência de fontes não renováveis tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis. O soro de leite, subproduto da coagulação do leite durante a fabricação de queijos, destaca-se como uma matéria-prima promissora por ser rico em proteínas funcionais, que atuam como agentes formadores de filme. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar filmes biodegradáveis à base de soro de leite e amido de milho, utilizando como plastificantes o glicerol e o sorbitol. O amido de milho foi empregado como polímero biodegradável, contribuindo para a formação do filme e diminuindo o custo da matéria prima. Além disso, avaliou-se diferentes formulações em comparação com um filme contendo álcool polivinílico (PVA). Os filmes foram produzidos pelo método de *casting* e analisados quanto à morfologia superficial e transversal (MEV), propriedades térmicas (TGA e DSC), estrutura química (FTIR), solubilidade em água, ângulo de contato e desempenho mecânico. Os filmes com glicerol (F4) apresentaram maior alongamento na ruptura (20,73%) e módulo de Young de 35,87 MPa. Já os filmes com ambas as plastificações (F5) apresentaram a menor resistência mecânica (0,520 MPa) e menor alongamento (7,05%), indicando fragilidade estrutural. A amostra com apenas soro de leite e amido (F1) apresentou resistência intermediária, com tensão na ruptura de 1,365 MPa. A amostra comparativa contendo álcool polivinílico (PVA) apresentou os melhores resultados em resistência e coesão. Os resultados mostraram que a adição de sorbitol promoveu maior homogeneidade estrutural, enquanto o glicerol favoreceu a formação de microfissuras. A amostra comparativa contendo PVA apresentou superioridade em resistência mecânica e menor solubilidade, com superfície mais contínua e densa. As análises térmicas indicaram estabilidade térmica adequada em todas as amostras analisadas. Os espectros de FTIR confirmaram a presença das proteínas do soro e interação com os plastificantes. O estudo mostrou que filmes compostos por soro de leite, amido de milho e sorbitol apresentam potencial para aplicações em embalagens biodegradáveis. A pesquisa evidencia a viabilidade do uso de resíduos agroindustriais como matriz polimérica, sendo uma alternativa sustentável frente aos polímeros convencionais.

Palavras-chave: sustentabilidade, plastificantes, proteínas.

ABSTRACT

Polymeric materials are widely used in packaging manufacturing due to their mechanical strength and versatility. However, the dependence on non-renewable sources has driven the development of more sustainable alternatives. Whey, a by-product of milk coagulation during cheese production, stands out as a promising raw material due to its richness in functional proteins, which act as film-forming agents. This study aimed to develop and characterize biodegradable films based on whey and corn starch, using glycerol and sorbitol as plasticizers. Corn starch was used as a biodegradable polymer, contributing to film formation and reducing raw material costs. In addition, different formulations were evaluated and compared to a film containing polyvinyl alcohol (PVA). The films were produced by the casting method and analyzed for surface and cross-sectional morphology (SEM), thermal properties (TGA and DSC), chemical structure (FTIR), water solubility, contact angle, and mechanical performance. The films with glycerol (F4) showed higher elongation at break (20.73%) and Young's modulus of 35.87 MPa. Films with both plasticizers (F5) had the lowest mechanical strength (0.520 MPa) and elongation (7.05%), indicating structural fragility. The formulation containing only whey and starch (F1) showed intermediate strength, with tensile stress of 1.365 MPa. The comparative sample containing PVA showed superior results in mechanical strength and cohesion. Results showed that the addition of sorbitol promoted greater structural homogeneity, while glycerol favored the formation of microcracks. The PVA film exhibited lower solubility and a more continuous and dense surface. Thermal analysis indicated adequate thermal stability in all tested samples. FTIR spectra confirmed the presence of whey proteins and interaction with plasticizers. The study demonstrated that films composed of whey, corn starch, and sorbitol show potential for application in biodegradable packaging. The research highlights the feasibility of using agro-industrial residues as a polymeric matrix, offering a sustainable alternative to conventional polymers.

Keywords: sustainability, plasticizers, proteins.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo caseiro para a obtenção do soro de leite	18
Figura 2 - Fluxograma do processo de produção dos biopolímeros.....	29
Figura 3 - Amostras preparadas para ir para a estufa	35
Figura 4 - Fluxograma do processo do ensaio de solubilidade	35
Figura 5 - Amostras após período de ensaio de solubilidade completo	36
Figura 6 - Termograma da amostra F1	39
Figura 7 - Termograma da amostra F3.....	39
Figura 8 - Termograma da amostra F4.....	40
Figura 9 - Termograma da amostra F5.....	40
Figura 10 - Termograma da Amostra comparativa	41
Figura 11 - FTIR do soro fluido.....	44
Figura 12 - FTIR amostra F1	44
Figura 13 - FTIR amostra F2.....	45
Figura 14 - FTIR amostra F3.....	46
Figura 15 - FTIR amostra F5.....	46
Figura 16 - FTIR amostra F5.....	47
Figura 17 - FTIR Amostra comparativa	47
Figura 18 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X da F1	49
Figura 19 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X da F3	49
Figura 20 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X da F4	50
Figura 21 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X da F5	50
Figura 22 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X.....	51
Figura 23 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da F1	52
Figura 24 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da F3	52
Figura 25 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da F4	53
Figura 26 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da F5	53
Figura 27 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da amostra comparativa.....	54

Figura 28 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da amostra comparativa.....55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados na produção dos filmes.....	26
Tabela 2 - Nomenclatura das amostras	26
Tabela 3 - Leituras termogravimétricas dos filmes.....	34
Tabela 4 - Dados da análise de DSC das amostras.....	39
Tabela 5 - Solubilidade em água das amostras.....	51
Tabela 6 - Resultados do ensaio de ângulo de contato.....	52
Tabela 7 - Resultados provenientes do ensaio de resistência à tração.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

cm	Centímetro (s)
DBO	Demanda Bioquímica De Oxigênio
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FTIR	Espectroscopia No Infravermelho Com Transformada De Fourier
g	Gramma (s)
g.cm ⁻²	Gramma (s) Por Centímetro Quadrado
h	Hora (s)
L	Litro
t	tonelada
LAMEM	Laboratório de Membranas e Materiais
kg	Quilograma
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
min	Minuto (s)
mL	Mililitros
mol/L	Mol por litro
NaOH	Hidróxido de sódio
nm	Nanômetros
PHAs	poli(hidroxialcanoatos)
PHB	poli(β -hidroxibutirato)
PVA	poli(álcool vinílico)
TGA	Termogravimetria
UV	Ultravioleta
WPU	Poliuretanos à base de água
°C	Graus Celsius
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 POLÍMEROS	17
3.2 SORO DO LEITE.....	17
3.2.1 Proteínas do soro do leite.....	19
3.3 AMIDO DE MILHO	20
3.4 ADITIVOS	21
3.4.1 Glicerol	21
3.4.2 Sorbitol	22
3.5 POLÍMEROS DE MATRIZ MISTA	23
3.6 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS	24
3.6.1 Polímeros a base de soro de leite	26
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 MATERIAIS	28
4.2 METODOLOGIA	29
4.2.1 Ajuste do pH e Desnaturação das Proteínas do Soro do Leite	30
4.2.2 Incorporação do Amido de Milho no Soro do leite.....	30
4.2.3 Adição de Plastificantes	30
4.2.4 Formação do Filme	31
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES	31
4.3.1 Análises Físico-Químicas	31
4.3.1.1 Termogravimetria (TGA)	31
4.3.1.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	32
4.3.1.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	33

4.3.2 Análise Estrutural e Morfológica	33
4.3.2.1 Microscopia Eletronica de Varredora (MEV)	33
4.3.3 Propriedades físicas	34
4.3.3.1 Solubilidade em água	34
4.3.3.2 Ângulo de contato	36
4.3.4 Propriedades mecânicas	37
4.3.4.1 Resistência a tração	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES	38
5.1.1 Análises Físico-Químicas	38
5.1.1.1 Termogravimetria (TGA)	38
5.1.1.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	42
5.1.1.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	43
5.1.2 Análise Estrutural e Morfológica	48
5.2.2.1 Microscopia Eletronica de Varredora (MEV)	48
5.1.3 Propriedades físicas	54
5.1.3.1 Solubilidade em água.....	54
5.1.3.2 Ângulo de contato.....	57
5.1.4 Propriedades mecânicas	59
5.1.4.1 Resistência à tração	59
5.2 ANÁLISE ECONÔMICA	60
5.3 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CRÉDITOS DE CARBONO EM SUBSTITUIÇÃO AO POLIETILENO (PE).....	62
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	64
REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros são materiais formados por macromoléculas constituídas por unidades repetitivas ligadas por ligações covalentes, o que resulta em uma grande variedade de propriedades. Essa diversidade torna os polímeros fundamentais em diversas indústrias e tecnologias, desempenhando um papel essencial no desenvolvimento de materiais que podem combinar leveza, resistência mecânica, flexibilidade e durabilidade. Essas propriedades tornam os polímeros fundamentais para aplicações que vão desde produtos do cotidiano até componentes de alta tecnologia, como biomateriais e dispositivos eletrônicos. A estrutura molecular dos polímeros influencia diretamente características como resistência ao impacto, estabilidade térmica e resistência química, tornando-os adaptáveis às necessidades específicas de diferentes setores industriais.

A síntese de polímeros pode ser realizada por diferentes métodos, sendo a polimerização por adição e a polimerização por condensação os mais empregados. A escolha do método influencia diretamente as propriedades finais do material, incluindo sua estabilidade térmica e resistência química. O controle das condições de polimerização é essencial para que os polímeros atendam às exigências específicas de suas aplicações, garantindo assim a qualidade e a eficiência de seu uso.

Recentemente, a crescente preocupação com os impactos ambientais dos plásticos tradicionais tem estimulado a pesquisa e o desenvolvimento de polímeros biodegradáveis, que são projetados para se decompor de forma natural no meio ambiente. Esses materiais representam uma alternativa promissora para reduzir a persistência de resíduos plásticos, especialmente em produtos descartáveis, como embalagens. Os polímeros biodegradáveis surgem como uma solução viável para minimizar os danos ambientais, direcionando o mercado para opções mais sustentáveis, no entanto, possuem desvantagens devido à baixa resistência mecânica, normalmente com custo elevado, sensibilidade a umidade, entre outros.

O soro de leite é um subproduto da indústria de laticínios resultante do processo de coagulação do leite durante a fabricação de queijos. Esse resíduo é rico em proteínas e lactose, representando um desafio ambiental significativo devido ao seu alto potencial poluente quando descartado inadequadamente. Para mitigar esses efeitos, pesquisas têm explorado a aplicação do soro de leite em novos materiais, incluído sua utilização na produção de filmes poliméricos biodegradáveis. As proteínas

presentes no soro podem ser modificadas e integradas as matrizes poliméricas, resultando em materiais com propriedades mecânicas aprimoradas, capacidade de formação de filmes e maior biodegradabilidade.

O amido de milho é um biopolímero amplamente estudado por sua abundância, baixo custo e caráter renovável, sendo uma alternativa promissora aos polímeros sintéticos. Suas propriedades funcionais, como a capacidade de formar filmes, biodegradabilidade e de atuar como matriz polimérica, tornam o amido adequado para aplicações em embalagens biodegradáveis e revestimentos. Além disso, sua estrutura rica em grupos hidroxila facilita interações com plastificantes e outros aditivos, permitindo ajustes em características como flexibilidade e solubilidade. O amido de milho também apresenta boa afinidade ambiental, sendo facilmente degradado por microrganismos em condições naturais, o que contribui para reduzir os impactos ambientais associados ao descarte de materiais plásticos convencionais.

Diante do crescimento da demanda por materiais sustentáveis, o desenvolvimento de filmes poliméricos derivados de fontes renováveis, como o soro de leite, se destaca como uma solução promissora. A combinação do soro de leite com amido de milho, pode não apenas modificar as propriedades mecânicas, mas também reduzir os custos de produção e o impacto ambiental. Este trabalho explora essas alternativas, analisando o papel dos aditivos plastificantes glicerol e sorbitol e a viabilidade do uso de fontes biodegradáveis para a aplicação em filmes poliméricos.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo, apresentam-se o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um filme polimérico biodegradável utilizando soro de leite e amido de milho como materiais base, visando explorar suas propriedades para aplicações sustentáveis e ambientalmente compatíveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Utilizar uma metodologia previamente descrita, adaptada, de síntese dos filmes poliméricos com soro de leite e amido de milho

Analisar as propriedades físicas, mecânicas, químicas e morfológicas dos filmes poliméricos com soro de leite e amido de milho.

Comparar o desempenho dos filmes com polímeros convencionais, como polietileno.

Realizar uma análise econômica comparativa entre os filmes poliméricos biodegradáveis formulados à base de soro de leite com amido e álcool polivinílico (PVA) e a sacola plástica convencional de polietileno (PE), considerando os custos de matéria-prima, desempenho funcional e viabilidade de substituição em aplicações comerciais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 POLÍMEROS

Polímeros são macromoléculas que se destacam pelo seu tamanho e estrutura química. Eles são formados por unidades químicas chamadas meros, que se conectam por ligações covalentes, repetindo-se ao longo da cadeia. O grau de polimerização, indicado por n ou DP (*degree of polymerization*), refere-se ao número de meros presentes na cadeia polimérica (Mano *et al.*, 1999).

Os polímeros desempenham um papel fundamental na sociedade moderna devido à sua versatilidade e ampla gama de propriedades. Eles são essenciais em diversas aplicações industriais e tecnológicas, conferindo características únicas aos materiais, como flexibilidade, resistência e leveza. A evolução no desenvolvimento desses materiais tem permitido inovações que vão desde produtos de uso cotidiano até aplicações de alta tecnologia (Callister e Rethwisch, 2018).

O processo de síntese dos polímeros envolve métodos como a polimerização por adição e a polimerização por condensação. A polimerização por adição ocorre quando os monômeros se juntam sem a eliminação de subprodutos, enquanto a polimerização por condensação resulta na formação de cadeias poliméricas com a liberação de pequenas moléculas, como água ou metanol. De acordo com Sperling (2015), a escolha do método de polimerização é essencial para o controle das propriedades finais do polímero, pois influencia diretamente sua resistência térmica, estabilidade química e comportamento mecânico. Dessa forma, é fundamental selecionar adequadamente o processo de polimerização para garantir que os materiais desenvolvidos atendam às exigências das mais diversas aplicações industriais

Nos últimos anos, o desenvolvimento de polímeros biodegradáveis tem ganhado destaque devido à crescente preocupação com os impactos ambientais dos plásticos convencionais. Polímeros biodegradáveis são projetados para se decompor sob condições ambientais naturais mais rapidamente, minimizando a persistência de resíduos no meio ambiente. Marques (2021) afirma que esses materiais são uma solução promissora para reduzir o impacto ambiental dos resíduos plásticos, especialmente em aplicações de uso único, como embalagens e produtos descartáveis.

3.2 SORO DO LEITE

O soro de leite é um subproduto gerado durante a coagulação do leite no processo de produção de queijos, caseína ou outros produtos lácteos. Nessa fase, ocorre a separação do soro, que contém água, sais, lactose e proteínas, enquanto as gorduras e os sais ficam retidos para a formação do produto (Ordóñez *et al.*, 2005).

Jesus (2020) explica que o soro é formado pela "precipitação da gordura e das caseínas do leite durante o processo de fabricação do queijo, sendo uma importante fonte de proteínas". Em média, a produção de queijo gera cerca de 0,9 L de soro para cada litro de leite utilizado, o que o torna o principal subproduto da indústria de laticínios. Na Figura 1, é possível visualizar a separação para o soro do leite.

Figura 1 - Processo caseiro para a obtenção do soro de leite



Fonte: Google imagens (2024).

As características do soro de leite dependem do tipo de produto fabricado, do método de produção e da origem do leite utilizado (como leite bovino, caprino ou ovino). O volume de soro gerado pode representar até 90% do total de leite processado na fabricação de queijos e produtos similares (Rohlfes *et al.*, 2011).

Devido à sua elevada carga orgânica, o soro de leite apresenta um alto potencial de poluição e contaminação. O descarte de uma tonelada de soro sem o tratamento adequado equivale à poluição gerada diariamente por 470 pessoas. Além disso, dependendo do tipo de queijo e do processo de fabricação, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) do soro varia entre 50.000 e 80.000 mg/L, valor que pode ser 100 vezes maior do que o do esgoto doméstico (Murari *et al.*, 2013). O

descarte inadequado desse resíduo na água compromete a fauna que depende dos corpos hídricos receptores e pode provocar a eutrofização de rios e lagos, além de dificultar o tratamento da água destinada ao abastecimento público (Matos, 2005, apud Murari *et al.*, 2013; Faria *et al.*, 2004).

Estudos recentes indicam que, no Brasil, aproximadamente 50% do soro de leite produzido é descartado sem o devido tratamento, especialmente por pequenas e médias empresas (Cappato *et al.*, 2024). Isso o transforma em um resíduo industrial prejudicial ao meio ambiente, com significativo impacto negativo sobre a fauna e flora.

Em contraste, o soro apresenta características nutricionais desejáveis e de alta qualidade, sendo uma rica fonte de proteínas, lactose, minerais e vitaminas, o que pode possibilitar seu uso como matéria-prima para o desenvolvimento de novos produtos (Jesus, 2020). Revillion *et al.* (2000, citado por Murari *et al.*, 2013) destaca que a composição do soro de leite varia conforme a qualidade e o tipo de queijo produzido, e informa que, em termos de massa, "contém cerca de 4,5% de lactose, 0,6-0,8% de proteína, 0,03-0,01% de gordura, 0,5-0,8% de minerais, principalmente cloreto de sódio, além de fosfato e cálcio, e 0,2-0,8% de ácido láctico".

3.2.1 Proteínas do soro do leite

As proteínas do soro do leite vêm sendo estudadas como base para formulação de filmes biodegradáveis, devido sua abundância, baixo custo e capacidade de formação de filmes coesos. Segundo Leonardelli, Silvestre e Baldasso (2020), essas proteínas, em destaque a β -lactoglobulina e a α -lactoalbumina, possuem uma estrutura globular que, ao serem desnaturadas, facilitam a formação de redes tridimensionais estáveis, favorecendo a interação com polímeros. Ademais, o soro do leite contém capacidade de emulsificar e formar géis, características que são fundamentais para a estabilidade dos filmes produzidos.

A β -lactoglobulina é correspondente a aproximadamente 50% das proteínas do soro do leite, possuindo uma elevada capacidade de reticulação térmica, o que contribui para a rigidez e a integridade estrutural dos filmes produzidos. A α -lactoalbumina, embora em menor quantidade, seu papel é auxiliar na estabilidade da rede proteica, influenciando positivamente a elasticidade. Além disso, o soro de leite também contém pequenas quantidades de imunoglobulinas e glicomacropéptídeos, que auxiliam na formação de barreiras mais coesas.

Outro ponto relevante é a capacidade emulsificante das proteínas do soro, que estabiliza misturas heterogêneas, especialmente quando combinadas com plastificantes e outros biopolímeros. Essa característica assegura a homogeneidade da matriz polimérica e impacta diretamente a morfologia final dos filmes (Campos et al., 2018). Além disso, a habilidade dessas proteínas em formar géis contribui para a estruturação da matriz, aumentando tanto a resistência mecânica quanto a estabilidade térmica dos filmes obtidos.

3.2 AMIDO DE MILHO

O amido de milho é um polissacarídeo amplamente utilizado na indústria alimentícia, farmacêutica e de materiais biodegradáveis devido à sua abundância, baixo custo e capacidade de formar filmes comestíveis. Estruturalmente, é composto por duas frações principais: a amilose, um polímero linear de glicose com ligações α -(1→4), também responsável pela formação de filmes mais rígidos, e a amilopectina, molécula ramificada com ligações α -(1→4) e α -(1→6), que confere maior flexibilidade e solubilidade ao material. De acordo com Mali et al. (2004), filmes produzidos a partir de amido de milho apresentam boa transparência, são biodegradáveis e podem atuar como barreiras a gases. Essa característica pode ser modificada com a adição de plastificantes ou a incorporação de outros polímeros, o que amplia suas aplicações em embalagens sustentáveis.

Segundo Müller et al. (2009), o amido é classificado como um polímero termoplástico quando processado na presença de plastificantes, como o glicerol, o que possibilita sua moldagem em condições similares às de polímeros sintéticos. Contudo, filmes produzidos exclusivamente com amido apresentam elevada sensibilidade à umidade e baixa resistência mecânica, o que justifica a combinação com outros polímeros ou aditivos para ampliação de suas aplicações em embalagens sustentáveis e sistemas de liberação controlada.

A biodegradabilidade do amido de milho é uma característica fundamental que o torna uma alternativa promissora aos polímeros sintéticos, especialmente em aplicações de embalagens sustentáveis. Estudos demonstram que filmes biodegradáveis à base de amido, quando enterrados em solo, começam a apresentar sinais visíveis de degradação em poucos dias, devido à ação de microrganismos que

promovem a despolimerização do material em açúcares simples. Essa rápida degradação é influenciada por fatores como umidade, temperatura e composição do solo, sendo essencial considerar essas variáveis no desenvolvimento de produtos à base de amido para garantir um equilíbrio entre desempenho funcional e impacto ambiental positivo (Lopes, 2025).

3.3 ADITIVOS

Devido às interações entre os grupos funcionais, que podem tornar os filmes mais frágeis, a adição de aditivos é fundamental na formulação de biopolímeros à base de soro de leite (Jesus, 2020). Para viabilizar seu uso em escala industrial, é necessário incorporar aditivos que reduzam a intensidade das ligações dissulfeto, pontes de hidrogênio, interações hidrofóbicas e forças eletrostáticas, aumentando assim a flexibilidade da cadeia polimérica (Schmid, 2013). Segundo Orliac *et al.* (2013), as propriedades físicas dos aditivos plastificantes, como composição e estrutura, influenciam diretamente a modificação estrutural dos filmes.

Biopolímeros, por sua natureza, degradam-se mais rapidamente que polímeros sintéticos, o que requer a adição de compostos que prolonguem sua vida útil, como um reticulante. Jesus (2020) menciona que ácidos orgânicos, enzimas, fungicidas e compostos naturais são exemplos de aditivos com função antimicrobiana, fundamentais para estender a durabilidade desses materiais.

3.3.1 Glicerol

O glicerol é caracterizado como um poliol com propriedades plastificantes (Jiugao, Ning, & Xiaofei, 2005), e sua adição ao biopolímero ajuda a reduzir a temperatura de transição vítrea, aumentando a flexibilidade do material (Shi *et al.*, 2008). Esse plastificante é amplamente aplicado em filmes à base de gelatina, pois contribui com maleabilidade e melhora outras características, como também transparência, flexibilidade, favorece a coesão estrutural, entre outros. Nos filmes derivados do soro de leite, o glicerol também demonstra benefícios interessantes ao atuar como um agente plastificante eficaz (Jesus, 2020).

Além de aumentar a flexibilidade, o glicerol também afeta diretamente a transparência, a espessura e a solubilidade dos filmes, variando conforme sua concentração. Em níveis elevados, pode provocar a formação de microfissuras ou diminuir a resistência mecânica devido ao excesso de mobilidade na rede polimérica (Santos et al., 2019). Por outro lado, em concentrações adequadas, o glicerol promove um equilíbrio eficiente entre ductilidade e estabilidade. Em formulações que contêm proteínas do soro, sua presença favorece a obtenção de filmes homogêneos e contínuos, especialmente quando combinado com outros plastificantes, como o sorbitol, com o qual pode apresentar efeitos sinérgicos ou antagonistas, dependendo da proporção e da composição da matriz.

Dessa forma, o glicerol é considerado um plastificante preferencial na fabricação de biofilmes proteicos, devido à sua eficácia na modulação das propriedades mecânicas e ópticas, além de ser biodegradável, não tóxico e compatível com diversos polímeros naturais.

3.3.2 Sorbitol

O sorbitol é amplamente empregado como plastificante em biopolímeros, pois possui a capacidade de aumentar a flexibilidade e diminuir a rigidez dos materiais. Em filmes biodegradáveis, como os produzidos a partir de amido, a incorporação de sorbitol resulta na redução da temperatura de transição vítrea, o que eleva a elasticidade e diminui a tendência a rupturas. Além disso, por ser um composto não tóxico e biodegradável, o sorbitol é especialmente adequado para embalagens alimentícias, promovendo a sustentabilidade e a segurança dos produtos (Sothornvit; Krochta, 2000).

Além de suas propriedades plastificantes, o sorbitol é um composto biodegradável, atóxico, inodoro e não volátil, características que o tornam especialmente atrativo para aplicações em embalagens sustentáveis e produtos com contato direto com alimentos. Sua baixa higroscopicidade, quando comparado a outros plastificantes como o glicerol, contribui para a estabilidade dos materiais em ambientes úmidos, reduzindo o risco de absorção excessiva de água e mantendo as propriedades mecânicas ao longo do tempo.

Do ponto de vista regulatório, o sorbitol é aprovado por agências internacionais como a FDA e amplamente reconhecido por sua segurança em aplicações alimentícias. Sua compatibilidade com diferentes polímeros naturais também permite sua utilização em sistemas complexos, favorecendo a formação de matrizes coesas e estáveis, sem comprometer a integridade química ou térmica dos compostos.

Portanto, o sorbitol representa uma escolha eficiente e ecologicamente adequada para a modulação das propriedades físico-químicas de materiais biodegradáveis, combinando desempenho técnico com segurança e sustentabilidade.

3.4 POLÍMEROS DE MATRIZ MISTA

Os polímeros de matriz mista, também conhecidos como blendas poliméricas, são formados pela combinação de dois ou mais polímeros, com o intuito de criar materiais que possuem propriedades aprimoradas em relação aos polímeros individuais. A principal vantagem dessas blendas é a capacidade de unir características desejáveis de diferentes polímeros, como resistência mecânica, flexibilidade, estabilidade térmica e resistência química, em um único produto. Conforme Utracki (1990), as blendas poliméricas são uma abordagem amplamente utilizada para modificar as propriedades dos materiais, permitindo que as indústrias desenvolvam soluções específicas para diversas áreas, incluindo embalagens, setor automotivo e aplicações médicas.

A miscibilidade entre os polímeros é um fator crucial na formação de blendas poliméricas. Quando as blendas são compatíveis, elas tendem a criar uma fase única, resultando em uma combinação homogênea de propriedades. No entanto, se os polímeros forem imiscíveis, isso pode prejudicar as propriedades do material final, devido à separação de fases. Paul e Bucknall (2000) explicam que a utilização de compatibilizantes pode facilitar a interação entre os polímeros, melhorando a miscibilidade e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas, térmicas, adesão interfacial, estabilidade morfológica e umidade da blenda. A adição de compatibilizantes tem se mostrado uma solução eficaz para contornar a imiscibilidade natural de muitos polímeros.

Outro aspecto fundamental na otimização das propriedades das blendas poliméricas é a caracterização. Técnicas como calorimetria diferencial de varredura

(DSC) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) são frequentemente empregadas para analisar a distribuição de fases e a compatibilidade entre os componentes da blenda. De acordo com Sperling (2006), a análise térmica por DSC é útil para identificar transições de fase e as interações entre os polímeros em nível molecular, enquanto a MEV fornece informações sobre a morfologia e a distribuição de partículas entre as fases poliméricas. Esses métodos são essenciais para assegurar a eficiência e a qualidade do material obtido.

3.5 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS

Os polímeros biodegradáveis, também conhecidos como bioplásticos, têm sido estudados e utilizados há mais de um século, com exemplos históricos como o celofane no início do século XX e os polihidroxialcanoatos (PHAs), descobertos na década de 1920 (Lemoigne, 1926), mas ainda representam uma fração pequena do mercado global (Korner *et al.*, 2005). Embora ofereçam benefícios ambientais, eles costumam ser mais caros e têm menos aplicações do que os plásticos sintéticos, devido à sua menor flexibilidade mecânica (Chandra *et al.*, 1998).

De acordo com Andrady (2015), "os polímeros biodegradáveis são definidos como materiais que podem ser metabolizados por organismos vivos, resultando em subprodutos naturais como dióxido de carbono, água, metano e biomassa". Essa característica faz deles uma alternativa promissora para substituir plásticos convencionais, principalmente em aplicações de uso único, como embalagens descartáveis e utensílios domésticos.

Esses biopolímeros podem ser originados de fontes naturais ou sintetizadas artificialmente. Os naturais se formam durante o crescimento e o metabolismo de organismos vivos, com sua síntese ocorrendo através de reações enzimáticas. Exemplos incluem biopolímeros como proteínas, ácidos nucleicos e polissacarídeos, como celulose e amido, além da quitina, que é utilizada para produzir quitosana. Já os polímeros sintéticos são frequentemente desenvolvidos para aplicações biomédicas, como cápsulas de liberação controlada de medicamentos, implantes e fios de sutura, com destaque para o poli(ácido lático), poli(ácido glicólico) e poli(ϵ -caprolactona) (Pradella, 2006). Segundo Marques e Demarquette (2006), "os polímeros biodegradáveis derivados de recursos naturais são particularmente

interessantes devido à sua capacidade de degradação e à redução do impacto ambiental em comparação aos plásticos convencionais".

A diferença entre plásticos biodegradáveis e degradáveis também deve ser considerada. Os plásticos degradáveis sofrem fragmentação física ou química sob condições ambientais, como exposição à luz solar ou oxigênio, mas nem sempre se decompõem completamente em subprodutos inofensivos. Além disso, esse processo pode resultar na formação de microplásticos, que persistem no ambiente e agravam a poluição. A distinção entre essas classes se dá, principalmente, pelo tempo de degradação, sendo que os plásticos degradáveis podem levar mais tempo e gerar resíduos nocivos, enquanto os plásticos biodegradáveis podem ser completamente metabolizados por micro-organismos, resultando em dióxido de carbono, água e biomassa (Revista Analytica, 2024).

É importante destacar que nem todos os plásticos biodegradáveis são compostáveis, pois a compostagem exige condições específicas, como umidade e temperatura controladas, para ocorrer de forma eficaz (Ecycle, 2024). Dessa forma, a escolha entre esses materiais deve considerar seu impacto ambiental e a infraestrutura disponível para seu descarte adequado.

O Quadro 1 apresenta uma comparação entre polímeros biodegradáveis sintéticos e naturais, destacando suas principais características.

Quadro 1- Comparação entre polímeros naturais, sintéticos e biodegradável

Tipo de polímero	Exemplos	Origem	Vantagens	Desvantagens
Sintético	PLA, PBS	Petroquímicos	Controle de propriedades de barreira	Dependência de recursos fósseis
Natural	Amido, Celulose	Fontes renováveis	Biocompatibilidade, Sustentabilidade	Propriedades mecânicas limitadas
Biodegradável	PHA, PCL, PBAT	Variada	Degradabilidade ambiental	Custo elevado, pouca resistência mecânica

Fonte: a autora (2024).

No Brasil, desde a década de 1990, iniciou-se a pesquisa para desenvolver plásticos biodegradáveis a partir de derivados da cana-de-açúcar, em um projeto colaborativo entre o IPT, a Copersucar e a Universidade de São Paulo. Esse trabalho incluiu investigações sobre polímeros da família dos poli(hidroxicanoatos) (PHAs), que podem ser produzidos por bactérias em biorreatores utilizando açúcares. Esses polímeros possuem características similares aos plásticos derivados do petróleo, mas têm a vantagem de serem biodegradáveis por microrganismos no ambiente, em um curto período após o descarte. O poli(β -hidroxibutirato) (PHB) é o principal representante dos PHAs, apresentando propriedades físicas e mecânicas semelhantes às do polipropileno (PP) (Chandra *et al.*, 1998).

O desenvolvimento de polímeros biodegradáveis mais resistentes e de menor custo continua sendo um desafio para a pesquisa científica. A busca por materiais que possam combinar alta performance com biodegradabilidade é essencial para o futuro dos materiais plásticos sustentáveis. Conforme mencionado por Auras *et al.* (2010), "os avanços na formulação de polímeros biodegradáveis têm sido focados não apenas em aumentar a biodegradabilidade, mas também em melhorar as propriedades mecânicas para competir com plásticos tradicionais". Essas inovações visam aumentar a competitividade dos polímeros biodegradáveis em comparação aos plásticos tradicionais.

3.5.1 Polímeros à base de soro do leite e outros componentes

Os polímeros à base de soro de leite têm despertado crescente interesse na pesquisa científica e na indústria devido à sua biodegradabilidade e ao potencial para aplicações sustentáveis, especialmente na área de embalagens. De Andrade e colaboradores (2017) criaram filmes multicamadas combinando soro de leite, gelatina e polihidroxicanoatos (PHAs). Ao avaliar a permeabilidade ao vapor de água, foi observado que os filmes multicamadas tiveram uma permeabilidade menor em comparação ao filme composto apenas por PHA (controle). Esse resultado se deve ao fato de que a adição de gelatina e soro de leite ajudou a fechar os microporos presentes na matriz polimérica, tornando-a mais uniforme e compacta, o que reforçou a barreira contra a água e reduziu a permeabilidade ao vapor.

Weizman *et al.* (2016) desenvolveram diversos revestimentos à base de proteína isolada do soro de leite (WPI), aos quais foram adicionados poli(álcool vinílico) (PVA) e pectina para aprimorar as propriedades do filme revestido. Além disso, nanopartículas de argila foram incorporadas para melhorar a barreira ao vapor de água. A comparação entre o filme puro de PVA e o filme de poli(ácido láctico) (PLA) revestido com WPI mostrou uma melhoria de cerca de 90% nas propriedades de barreira ao oxigênio e de aproximadamente 27% nas propriedades de barreira ao vapor de água. A maior barreira ao oxigênio pode ser atribuída à elevada cristalinidade do revestimento de WPI e à grande quantidade de ligações de hidrogênio formadas entre as cadeias moleculares de WPI após a desnaturação térmica.

A invenção proposta por Duarte e Baldasso (2024) visam a utilização do soro *in natura*, sem a necessidade de processos adicionais para a concentração ou isolamento de proteínas, com o objetivo de criar polímeros biodegradáveis. Essa abordagem diminui a dependência de etapas que consomem muitos recursos e energia, como a ultrafiltração e a desidratação por spray dryer, tornando a produção mais simples, econômica e sustentável.

Segundo Duarte e Baldasso (2024), "a fabricação do polímero à base de soro de leite consiste na combinação do soro com uma matriz polimérica, seguida de tratamentos térmicos e ajustes de pH para desnaturar as proteínas, resultando em um material homogêneo e de fácil processamento". Este método maximiza o aproveitamento do soro, reduzindo o desperdício e potencializando a utilização dos componentes naturais presentes, incluindo proteínas e outros nutrientes que podem servir como aditivos naturais no produto final.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

A Tabela 1 apresenta os materiais utilizados no preparo dos filmes poliméricos com amido de milho e soro de leite.

Tabela 1 – Materiais utilizados na produção dos filmes

Reagente	Fórmula molecular	Concentração	Fornecedor
Soro de leite	-	-	Tirolez
Hidróxido de sódio	NaOH	1 mol/L	Dinâmica Química Contemporânea Ltda.
Água destilada	H ₂ O	-	Preparado no LAMEM
Amido de milho	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	-	Maizena
Sorbitol	C ₆ H ₁₄ O ₆	98%	Dinâmica Química Contemporânea Ltda.
Glicerol	C ₃ H ₈ O ₃	97%	Vetec Química Fina

Fonte: A autora (2024).

Com estes materiais, foram realizadas 5 diferentes formulações, a fim de comparar com a formulação proveniente do filme de soro de leite e PVA (Duarte, 2024). A Tabela 2 a seguir apresenta as nomenclaturas das amostras, cujos materiais foram variados.

Tabela 2 – Nomenclatura das amostras

Amostra	Soro de Leite (mL)	Amido (g)	Glicerol (mL)	Sorbitol (mL)
F1	100	4,3	-	-
F2	100	-	1,6	1,2
F3	100	4,3	-	1,2
F4	100	4,3	1,6	-
F5	100	4,3	1,8	1,2

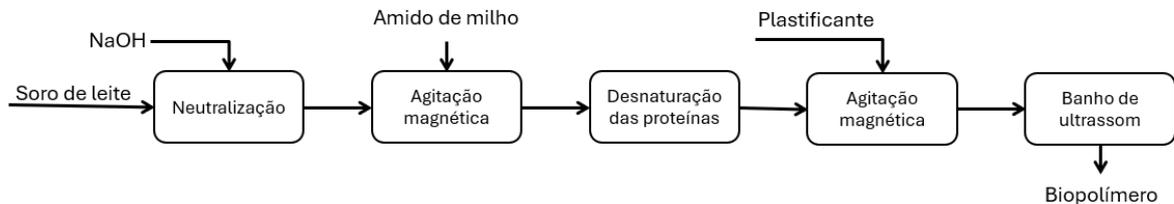
Fonte: A autora (2025).

A quantidade de glicerol na formulação 5 foi ajustada para 1,8 g após a realização de testes com diferentes concentrações. Esse valor foi selecionado por apresentar o melhor desempenho entre as variações testadas.

4.2 METODOLOGIA

A produção dos filmes poliméricos utilizou uma combinação de soro de leite e amido de milho como componentes principais, além de plastificantes para aumentar a flexibilidade do material final. A metodologia incluiu etapas de preparação do soro de leite, mistura e incorporação dos componentes e formação do filme em uma superfície adequada. A seguir, a Figura 2 representa o fluxograma do processo da produção dos biopolímeros, em seguida, estão descritos os detalhes de cada etapa.

Figura 2 - Fluxograma do processo de produção dos biopolímeros



Fonte: A autora (2025).

4.2.1 Ajuste do pH e Desnaturação das Proteínas do Soro de Leite

Primeiramente, o soro de leite, com pH inicial de aproximadamente 5, passou por um ajuste até atingir um valor próximo a 7, considerado ideal para favorecer a desnaturação das proteínas e melhorar a interação com o poliuretano. Esse ajuste foi realizado por meio da adição controlada de hidróxido de sódio (NaOH), através de um phmetro, até que se alcançasse a neutralidade (pH 7,). A relevância desse ajuste reside na preparação das proteínas para um estado desnaturado, ou seja, com a perda de sua estrutura original, o que possibilita uma interação mais eficaz com o amido de milho.

Após o ajuste de pH, o soro de leite foi aquecido a 80°C e mantido nessa temperatura durante 10 min, para assegurar a completa desnaturação das proteínas.

Esse processo é essencial, pois a exposição das cadeias proteicas permite uma melhor interação com o polímero durante a mistura, promovendo uma maior compatibilidade entre os componentes. Dessa forma, busca-se a formação de uma matriz polimérica mais uniforme e homogênea.

A desnaturação das proteínas é um processo crítico, pois altera propriedades estruturais influenciadas pela microestrutura e afeta a capacidade das proteínas de atuarem como plastificantes. Além disso, modifica aspectos como densidade, orientação polimérica e grau de reticulação, resultando em uma diminuição da solubilidade e dificultando as atividades superficiais do filme formado, como a interação com a umidade (Jesus, 2020). Esses fatores são fundamentais para a obtenção de um filme com características mecânicas e de barreira aprimoradas, contribuindo para a qualidade final do material polimérico.

4.2.2 Incorporação do Amido no Soro de Leite

O amido de milho foi incorporado ao soro de leite ainda a temperatura ambiente (20°C) e em seguida, aquecido para 80°C, em agitação constante de 8 RPM para assegurar uma mistura homogênea. A solução ficou sob temperatura e agitação por 10 min.

4.2.3 Adição de Plastificantes

Com a solução viscosa pronta, foram incorporados os plastificantes glicerol e sorbitol, em uma temperatura de aproximadamente 60°C. Esses componentes são amplamente utilizados na formação de filmes, pois proporcionam flexibilidade e resistência mecânica ao produto final. Sem a adição de plastificantes, os filmes poliméricos poderiam se tornar rígidos e quebradiços, comprometendo suas propriedades de uso e aplicabilidade.

O glicerol funciona como um plastificante primário, reduzindo a rigidez do filme e melhorando sua flexibilidade. O glicerol é altamente compatível com proteínas e facilita a mobilidade das cadeias poliméricas, ajudando a evitar rachaduras e fragilidade no filme final.

O sorbitol, além de atuar como plastificante, também aumenta a estabilidade térmica e melhora a resistência à umidade dos filmes. Ele contribui para a retenção

de umidade, o que é benéfico para a maleabilidade do filme, proporcionando um equilíbrio adequado entre flexibilidade e resistência.

A adição dos plastificantes foi realizada sob agitação contínua (8 RPM), garantindo a incorporação homogênea dos mesmos à solução viscosa de soro de leite e amido de milho.

4.2.4 Formação do Filme

Após a preparação da solução com todos os componentes, a mistura foi espalhada em uma placa de vidro revestida com teflon. Esse revestimento foi escolhido para evitar a aderência do filme à superfície durante a secagem, garantindo uma remoção fácil após a formação completa do filme. A solução espalhada (107,3 g (m/m), considerando F5) foi controlada para assegurar uma espessura uniforme dos filmes.

A placa foi mantida em um ambiente controlado (22°C) e até a secagem completa do filme (24 h), momento em que a água residual e outros voláteis foram eliminados, deixando apenas a matriz polimérica formada pelo soro de leite e o amido de milho, plastificada com glicerol e sorbitol. Após a secagem, os filmes foram cuidadosamente removidos da placa e armazenados no mesmo ambiente controlado para evitar contaminação e perda de umidade.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES

Os filmes confeccionados foram caracterizados com foco na avaliação de suas propriedades físicas, morfológicas, físico-químicas e de resistência mecânica. Todas as técnicas e métodos utilizados serão descritos detalhadamente nos itens a seguir.

4.3.1 Análises Físico-Químicas

4.3.1.1 Termogravimetria (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica que permite monitorar as variações na massa de uma amostra em função da temperatura e do tempo, utilizando uma balança de alta precisão para registrar essas mudanças. Este método é

especialmente importante para o estudo do comportamento térmico, pois fornece informações sobre a estabilidade térmica, decomposição e possíveis processos de oxidação de substâncias orgânicas e polímeros (Crespo, 2022).

Com a TGA, é possível identificar as temperaturas em que ocorrem perdas de massa importantes, o que pode estar relacionado à degradação ou volatilização dos componentes. Em materiais poliméricos, essa análise é fundamental para determinar a faixa de estabilidade térmica, permitindo inferir sobre a durabilidade e a adequação do material para diversas aplicações. Além disso, a técnica é útil na caracterização de compostos adicionados, como plastificantes ou aditivos, que podem influenciar a resistência térmica do material. Dessa forma, a termogravimetria se torna uma ferramenta essencial para compreender as propriedades térmicas e de degradação dos polímeros em diferentes contextos industriais e científicos.

A análise foi realizada utilizando o equipamento TGA – 50 da fabricante Shimadzu, operando sob atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo controlado de 50 mL.min⁻¹. As amostras que continham aproximadamente 10 mg, foram submetidas a aquecimento desde a temperatura ambiente (25°C) até 800 °C.

A DTG (Termogravimetria derivada), foi obtida pela primeira derivada da curva TGA, para analisar a variação da taxa de perda da massa em função do tempo ou temperatura. Para essa análise, utilizou-se os mesmos parâmetros citados anteriormente.

4.3.1.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é um método termoanalítico que avalia a variação de fluxo de calor entre uma amostra e uma referência inerte, enquanto ambas são submetidas a um programa de temperatura controlado. Este método possibilita a identificação de transições térmicas como fusão, cristalização e transição vítrea, além de fornecer dados sobre a estabilidade térmica e a pureza dos materiais. No trabalho de Bernal *et al.* (2002), foram conduzidos experimentos para mostrar como diferentes fatores experimentais podem impactar os resultados qualitativos e quantitativos obtidos por DSC, utilizando a sacarina como modelo de substância.

As análises foram realizadas no equipamento DSC-60 da fabricante Shimadzu, onde foi utilizado uma taxa de aquecimento e resfriamento constante de 10°C.min⁻¹. A

faixa de temperatura foi de 25°C iniciais, até 110°C, seguido de um resfriamento até a temperatura inicial. Para referência, foi utilizado um cadinho de alumínio vazio, e o sistema de resfriamento operou com fluxo de nitrogênio em uma taxa de 50 mL.min⁻¹.

4.3.1.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica analítica utilizada para identificar grupos funcionais e avaliar as ligações químicas em moléculas. O FTIR é amplamente empregado no quesito polímeros para analisar as interações entre componentes, como aditivos e plastificantes, além de monitorar alterações estruturais decorrentes de processos de envelhecimento ou degradação. A técnica envolve a passagem de radiação infravermelha pela amostra, onde cada tipo de ligação absorve a energia em comprimentos de onda específicos, criando um espectro característico que facilita a identificação dos componentes químicos (Stuart. B, 2004).

A análise foi conduzida utilizando o espectrofotômetro Nicolet IS10 da marca Thermo Scientific. A medição dos resultados foram realizadas com resolução espectral de 4 cm⁻¹ aplicando 32 varreduras (scans) em cada espectro, em um número de onda entre 550 e 4500 cm⁻¹.

Como referência comparativa, também foi considerada a formulação descrita por Duarte (2024), composta por soro de leite, álcool polivinílico (PVA), sorbitol e glicerol. Essa formulação foi incluída no estudo com o objetivo de comparar o desempenho dos filmes biodegradáveis com um material contendo um polímero sintético hidrossolúvel amplamente utilizado, para realizar a análise de custos. A presença do PVA nessa amostra permite avaliar diferenças estruturais, físico-químicas e mecânicas entre as formulações naturais e híbridas, especialmente quanto à interação entre os constituintes, solubilidade e integridade morfológica observadas nas análises posteriores.

4.3.2 Análise Estrutural e Morfológica

4.3.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredora (MEV)

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica de análise que utiliza um feixe de elétrons para produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Em estudos de polímeros, o MEV é essencial para observar a morfologia e a estrutura superficial, incluindo a uniformidade, porosidade, dispersão de aditivos ou preenchimentos, e até defeitos como rachaduras ou falhas de adesão.

No MEV, o feixe de elétrons interage com a superfície da amostra, gerando sinais que são convertidos em uma imagem detalhada. Esta técnica permite ampliações superiores a 100.000 vezes, revelando características que não seriam visíveis com microscopia ótica convencional.

O método de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregado por meio do equipamento MIRA 3, da fabricante Tescan, com o objetivo de obter as informações tridimensionais de topografia e características microestruturais das amostras. Para a análise da seção transversal, as amostras foram previamente fraturadas em nitrogênio líquido, a fim de preservar as estruturas internas e permitir a visualização da ruptura com maior nitidez.

Ademais, a espectroscopia por dispersão de energia (EDS) foi aplicada para a caracterização elementar das amostras, utilizando o detector X-MAX 50, da Oxford Instruments, o qual opera por meio da excitação dos elementos presentes com um feixe de elétrons, promovendo a emissão de radiação característica de cada elemento químico.

4.3.3 Propriedades físicas

4.3.3.1 Solubilidade em água

A solubilidade em água é uma propriedade físico-química que indica a capacidade de um material, como um polímero, de se dissolver em água. Essa característica é importante para avaliar a adequação de polímeros em aplicações específicas, como embalagens biodegradáveis, revestimentos de liberação controlada e dispositivos médicos (Mark, 2007).

Para o teste de solubilidade, foi utilizada a metodologia adaptada de Jesus (2020), onde as amostras em triplicadas de tamanho 2 cm x 2 cm foram postas para secar em uma estufa Tecnolab à 60°C durante o período de 24 horas, conforme a Figura 3.

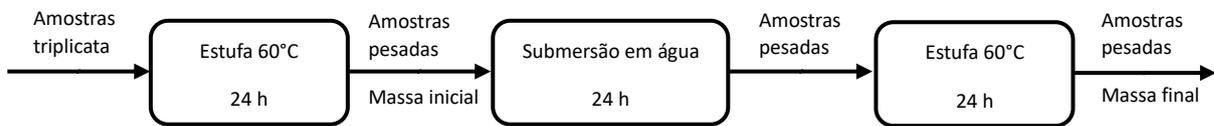
Figura 3 - Amostras preparadas para ir para a estufa



Fonte: A autora (2025).

A Figura 4 a seguir, apresenta um fluxograma de blocos representativo do processo para o ensaio de solubilidade.

Figura 4 - Fluxograma do processo do ensaio de solubilidade



Fonte: A autora (2025).

Após as 24 horas, as amostras foram pesadas para determinar a massa inicial, e posteriormente submersas em água destilada (aproximadamente 30 mL), em recipientes de poliestireno, pelo mesmo período de estufa.

Depois, as amostras que não se solubilizaram, foram pesadas e novamente colocadas na estufa, pelo período de 24 horas, para obter a massa final. A Figura 5 apresenta as amostras após o ensaio completo.

Figura 5 - Amostras após período de ensaio de solubilidade completo



Fonte: A autora (2025).

Com os dados de massa inicial e massa final, foi possível calcular a porcentagem de solubilidade em água, obtido por meio da Equação 1 abaixo.

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

4.3.3.2 Ângulo de contato

Com o objetivo de avaliar a interação dos filmes com a água, foram aplicadas microgotas de água deionizada em três regiões distintas de cada amostra. A medida do ângulo de contato entre a gota e a superfície do filme foi realizada sob condições controladas de temperatura (23 °C) e umidade relativa (60 %). As imagens das gotas foram registradas imediatamente após a aplicação, utilizando uma câmera digital de alta resolução, e a determinação do ângulo de contato foi feita com o auxílio do software SurfTens.

4.3.4 Propriedades mecânicas

4.3.4.1 Resistência à tração

A resistência à tração é uma característica mecânica essencial que demonstra a habilidade de um material em suportar forças de tração sem se quebrar. Em testes de resistência à tração, uma amostra é submetida a uma carga crescente até atingir o ponto de fratura, permitindo assim a determinação de características como o limite de resistência à tração, o alongamento até a fratura e o módulo de elasticidade.

Esses testes são particularmente importantes na avaliação de polímeros, pois auxiliam na análise da durabilidade e do desempenho mecânico dos materiais em várias aplicações, como embalagens, revestimentos e estruturas. A resistência à tração pode variar conforme a composição, o processo de fabricação e a presença de aditivos ou reforços no polímero.

Os ensaios foram realizados na máquina Emic, modelo DL 2000, método ASTM D882-2018, submetidos a uma velocidade de 25 milímetros por minuto (mm/min) e com uma célula de capacidade de 20 quilonewton (kN).

Para fins de comparação com a sacola plástica de PE, foram realizados ensaios de tração, permitindo avaliar o desempenho mecânico dos filmes biodegradáveis em relação a um material comercial amplamente utilizado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo aborda os resultados obtidos a partir das formulações propostas dos filmes biopoliméricos a base de soro de leite e amido de milho, bem como suas propriedades e caracterizações.

Não foi possível realizar alguns dos ensaios propostos com a formulação 2 e 3 devido sua de integridade, pois apresentaram fragilidade estrutural o que impossibilitou seu manuseio e preparação para análise.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES

5.1.1 Análises Físico-Químicas

5.1.1.1 Termogravimetria (TGA)

A análise de TGA demonstrou que, todos os filmes analisados apresentam um perfil de degradação térmica em três estágios principais. A primeira perda de massa, foi observada em até aproximadamente 150 °C, que acontece devido a evaporação de água livre e absorvida.

A segunda etapa, entre 160 e 230 °C, corresponde a degradação térmica dos compostos orgânicos, destacando as proteínas do soro de leite, amido de milho e plastificantes (Jesus, 2020). Essa atribuição também é consistente com a degradação do glicerol, cujo grupos hidroxila são voláteis e instáveis a partir de temperaturas moderadas em sistemas poliméricos (Shankar *et al.*, 2015).

A terceira etapa, acima de 250 °C, está associada a degradação final do resíduo, representada pela presença das proteínas do soro do leite e do amido de milho. A quebra das cadeias peptídicas e glicosídias leva a formação de compostos voláteis e, conseqüentemente, a geração de resíduos carbonáceos e sais inorgânicos. De acordo com Jesus (2020), esta etapa está diretamente ligada á degradação completa da matéria orgânica.

Os valores de temperatura inicial de decomposição (T_d), temperatura máxima de decomposição ($T_{máx}$) e a perda de massa em porcentagem, estão representadas na Tabela 3, abaixo.

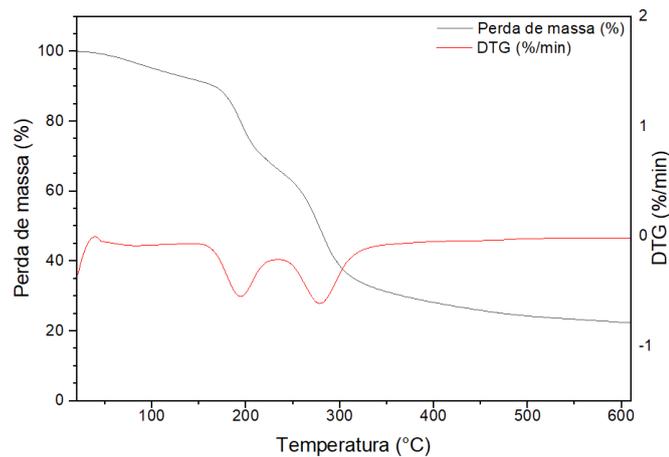
Tabela 3 - Leituras termogravimétricas dos filmes

Amostra	T_d (°C)	$T_{máx}$ (°C)	Perda de massa (%)	Resíduo a 800 °C (%)
F1	150	310	72	28
F3	140	300	70	30
F4	145	310	68	32
F5	150	305	65	35

Fonte: A autora (2025).

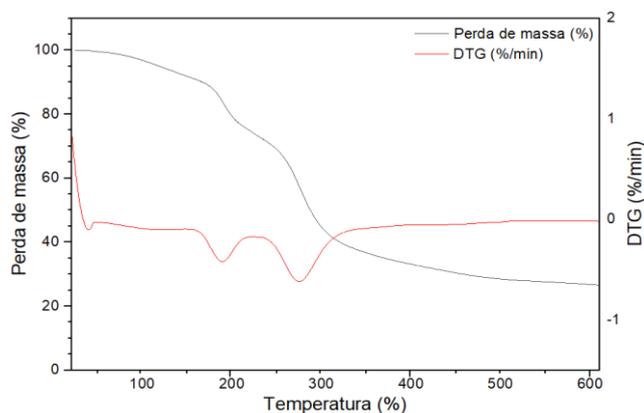
As Figuras 6, 7, 8 e 9, representam os gráficos de TGA e DTG, das formulações.

Figura 6 - Termograma da amostra F1



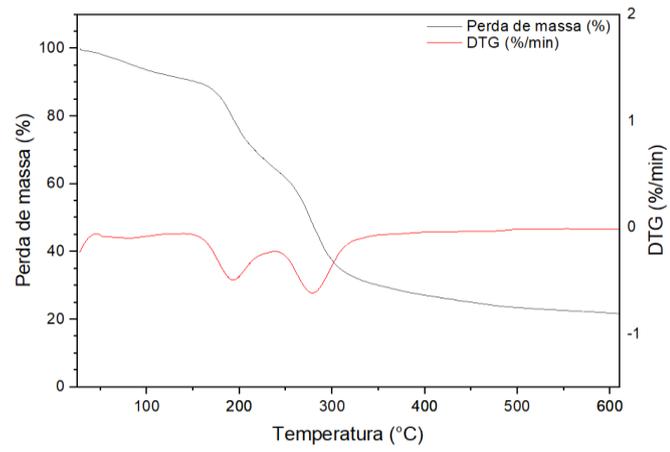
Fonte: A autora (2025).

Figura 7 - Termograma da amostra F3



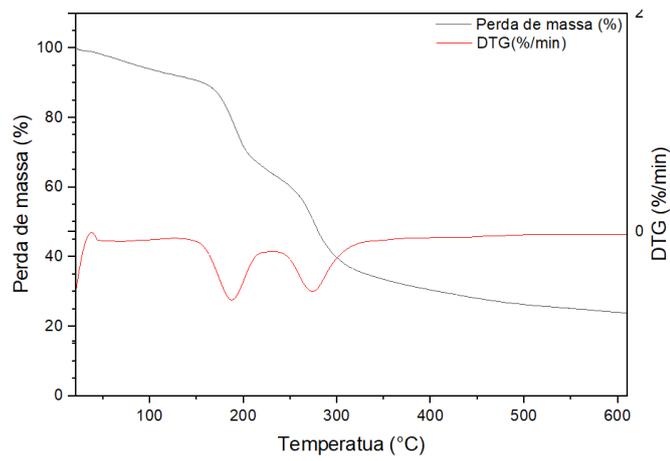
Fonte: A autora (2025).

Figura 8 - Termograma da amostra F4



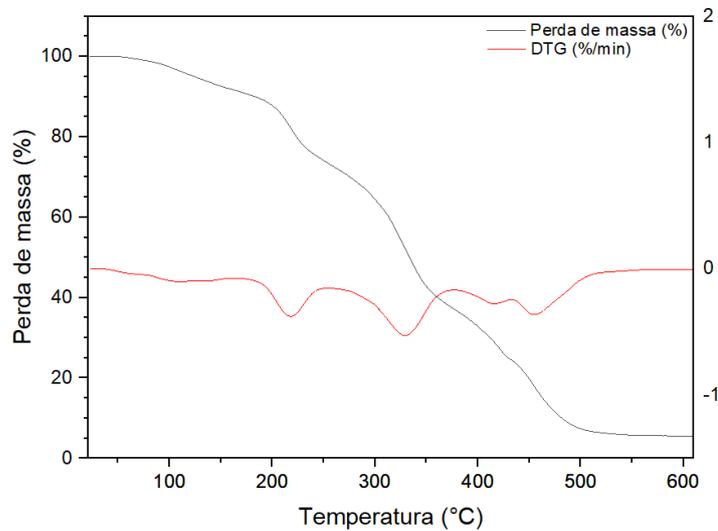
Fonte: A autora (2025).

Figura 9 - Termograma da amostra F5



Fonte: A autora (2025)

Figura 10 - Termograma da Amostra comparativa



Fonte: A autora (2025).

A amostra F1 apresentou uma temperatura de início de degradação (T_d) de 150 °C e uma temperatura de máxima taxa de decomposição ($T_{máx}$) de 310 °C. A perda total de massa foi de 72%, resultando em um resíduo fixo de 28% a 800 °C. A curva DTG revelou um evento térmico principal na faixa de 310 °C, indicando a decomposição sinérgica do amido e da fração proteica.

Com T_d em 140 °C e $T_{máx}$ em 300 °C, o filme F3 apresentou um perfil térmico semelhante ao F1, mas com menor complexidade térmica, evidenciada por múltiplos picos suaves na curva DTG. A ausência de amido e glicerol parece ter comprometido a estabilidade estrutural do filme, resultando em maior volatilização entre 160 °C e 230 °C e um resíduo final de 30%.

A amostra F4 teve T_d de 145 °C e $T_{máx}$ de 310 °C, com uma perda total de massa de 68%, deixando 32% de resíduo térmico. A presença de glicerol proporcionou um perfil DTG com uma transição secundária bem definida entre 160 °C e 230 °C, relacionada à sua degradação, enquanto o soro de leite predominou na última etapa térmica, acima de 250 °C.

A amostra F5 demonstrou o comportamento térmico mais estável, com T_d de 150 °C e $T_{máx}$ de 305 °C. A perda total de massa foi de 65%, resultando em um resíduo de 35% a 800 °C. A combinação dos dois plastificantes e do amido favoreceu a formação de uma matriz termicamente resistente, com a curva DTG indicando

múltiplos eventos de degradação controlada e uma distribuição de massa volátil ao longo da análise.

A amostra comparativa (Figura 10) contendo soro de leite, glicerol, sorbitol e PVA revelou três etapas distintas de degradação. A primeira perda de massa, observada até aproximadamente 150 °C, corresponde à eliminação da umidade residual e de compostos voláteis. A segunda etapa, entre 220 °C e 360 °C, está relacionada à decomposição das proteínas do soro e dos plastificantes (glicerol e sorbitol), conforme também descrito por Jesus (2020) e Shankar et al. (2015). Por fim, a degradação mais acentuada acima de 400 °C é atribuída à quebra térmica das cadeias do PVA, polímero com alta resistência térmica. O comportamento geral indica que a presença do PVA confere ao material maior estabilidade térmica, retardando a degradação total do filme quando comparado às formulações livres de polímero sintético.

5.1.1.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

A temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão e evento exotérmico das amostras F1, F3, F4, F5 e da Amostra comparativa, são apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Dados da análise de DSC das amostras

Amostra	Temperatura de transição vítrea (°C)	Temperatura de fusão (°C)	Evento exotérmico (°C)
F1	22,6	112,47	195,26
F3	178,46	122,61	-51,52
F4	-21,4	116,67	194,27
F5	77,77	108,99	194,08
Amostra comparativa	248,7	102,8	29,3

Fonte: A autora (2025).

Os resultados das análises térmicas realizadas por meio de DSC revelaram variações significativas nas formulações em relação à temperatura de transição vítrea

(T_g), temperatura de fusão e a presença de eventos exotérmicos. A formulação contendo PVA apresentou o maior valor de T_g , de 248,85 °C, indicando uma estrutura amorfa mais rígida e estável, característica de materiais que incorporam polímeros sintéticos com alta resistência térmica, como o álcool polivinílico. Em contraste, a formulação 4 apresentou uma T_g negativa de -21,40 °C, sugerindo uma elevada mobilidade das cadeias poliméricas em temperaturas muito baixas, possivelmente devido à presença de glicerol como plastificante principal.

A temperatura de fusão variou entre 103,30 °C (PVA) e 122,61 °C (formulação 3). Os picos endotérmicos bem definidos observados nas formulações 3, 4 e 5 podem ser atribuídos à fusão de fases parcialmente cristalinas resultantes da estruturação de amido e proteínas do soro. A temperatura de fusão foi ligeiramente inferior na formulação com PVA pode indicar uma estrutura mais homogênea e menos cristalina, reforçada pela boa miscibilidade do PVA com os outros componentes da matriz.

Eventos exotérmicos, que refletem processos como degradação térmica ou reticulação secundária, foram identificados em todas as formulações, exceto na formulação 3, onde o valor negativo provavelmente se refere a um artefato térmico ou instabilidade local. As formulações 1, 4 e 5 apresentaram eventos exotérmicos em torno de 194–195 °C, possivelmente relacionados ao início da degradação de proteínas ou ao rompimento de interações fracas entre amido e plastificantes. Por outro lado, o filme com PVA apresentou um evento exotérmico mais precoce, a 28,79 °C, que pode estar associado à liberação de água adsorvida ou a reações iniciais entre componentes com baixa estabilidade térmica.

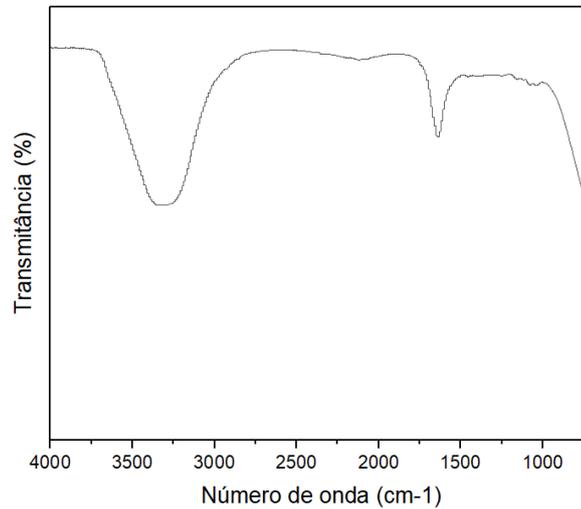
Essas diferenças térmicas destacam o impacto da composição das formulações sobre a estabilidade e as transições físicas dos filmes. A formulação com PVA se mostrou a mais estável termicamente, enquanto as demais apresentaram comportamentos mais compatíveis com sistemas poliméricos naturais e plastificantes.

5.1.1.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O espectro de soro fluido, Figura 11, foi utilizado como referência para as demais amostras. Observou-se uma banda larga e intensa na região entre 3200-3400 cm^{-1} , característico do grupo hidroxila (OH), que estão presentes na água e nos aminoácidos. A presença de bandas que se encontram em torno de 1530 cm^{-1} , representam o grupo amina II e correspondem as vibrações de estiramento da

carbonila (C=O) e flexão do N-H das ligações peptídicas das proteínas, como β -lactoglobulina e α -lactoalbumina (Jia *et al.*, 2016).

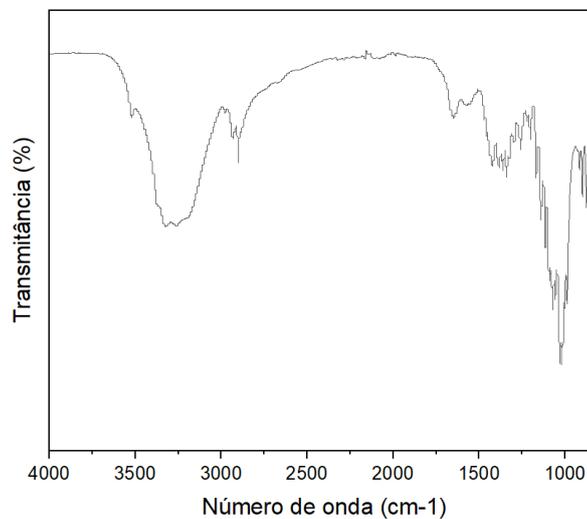
Figura 11 - FTIR do soro fluido



Fonte: A autora (2025).

A amostra F1 apresentou banda larga na região de aproximadamente 3300 cm^{-1} , indicando a presença de grupos hidroxila referentes ao soro fluido. Na Figura 12, pode-se observar também, uma banda e, aproximadamente, 2900 cm^{-1} , que representa o estiramento C-H alifático. A principal evidência da presença do amido de milho, é referente a banda na região de 1000 cm^{-1} , que corresponde as vibrações-O, C-C e C-OH proveniente do anel glucosídico (Santos, 2011).

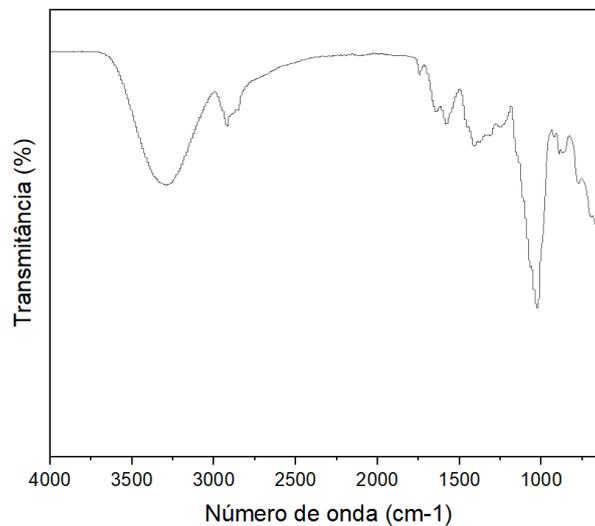
Figura 12 - FTIR amostra F1



Fonte: A autora (2025).

O espectro na Figura 13, contendo soro de leite, glicerol e sorbitol (F2), representou a mesma banda em 3300 cm^{-1} indicando a presença dos grupos O-H e das proteínas. A região de, aproximadamente, 1000 cm^{-1} , apresentou um alargamento típico das vibrações C-O de álcoois, o que confirma a incorporação dos plastificantes na amostra (Syarifunddin, 2025).

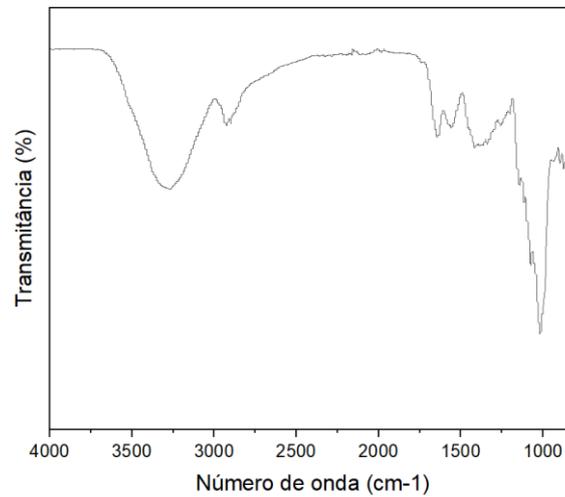
Figura 13 - FTIR amostra F2



Fonte: A autora (2025).

A amostra F3, como sugere a Figura 14 apresentou um comportamento espectral similar ao da F2, mas com intensidade reduzida em aproximadamente 2900 cm^{-1} , devido à ausência de glicerol. As bandas de O-H, localizadas em cerca de 3300 cm^{-1} , e C-O, entre 1050 e 1150 cm^{-1} , permaneceram bem definidas, indicando que o sorbitol se integrou à rede polimérica. A falta de glicerol parece ter gerado uma matriz menos densa, o que se reflete em um espectro com transições mais suaves.

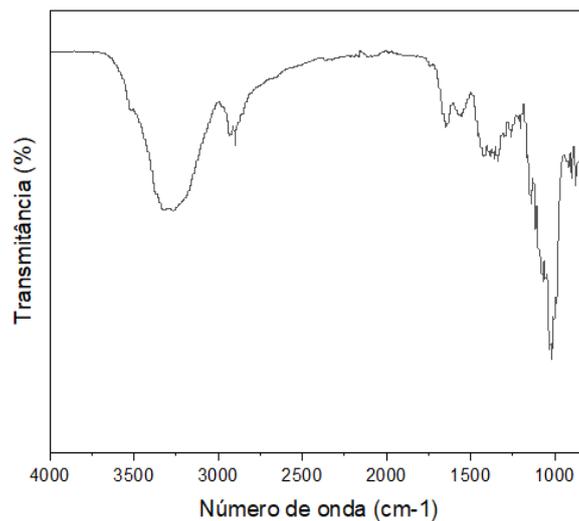
Figura 14 - FTIR amostra F3



Fonte: A autora (2025).

Como já vistas anteriormente, o espectro do filme F4 (Figura 15), apresentou as mesmas características do soro de leite, amido de milho e glicerol no espectro de FTIR (Figura X), contendo uma pequena alteração nas bandas de Amida II (1550 cm⁻¹), que sugere uma ocorrência entre as interações intermoleculares nos grupos hidroxila do glicerol e as ligações da proteína. A sobreposição nas bandas 1000-1700 cm⁻¹ condiz com a miscibilidade entre os componentes da amostra, indicando uma matriz polimérica coesa e estabilizada pelas ligações.

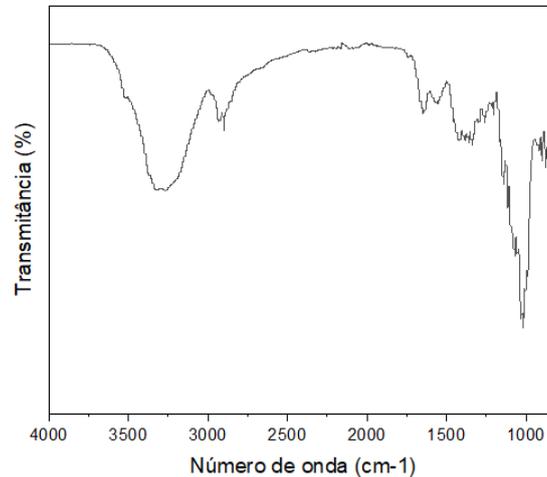
Figura 15 - FTIR amostra F5



Fonte: A autora (2025).

O espectro da amostra F5, apresentado na Figura 16, se manteve semelhante a amostra F4, contendo apenas o componente glicerol de diferente em sua formulação. Como o glicerol é um plastificante similar ao sorbitol, as bandas se mantiveram entre os espectros.

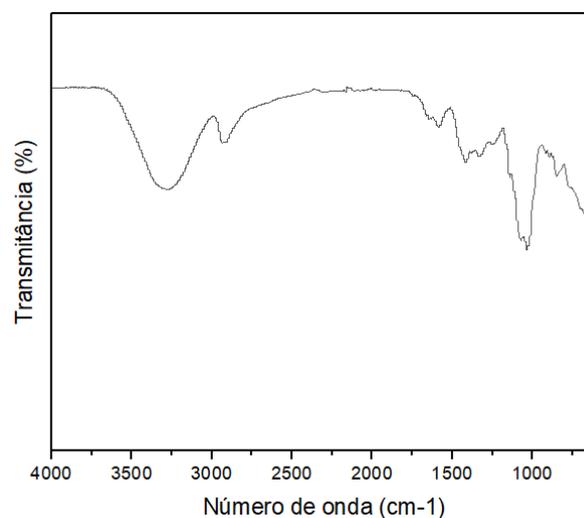
Figura 16 - FTIR amostra F5



Fonte: A autora (2025).

Como comparativo, a Figura 17 apresenta o filme da formulação comparativa de Duarte (2024), que contém soro de leite, PVA, sorbitol e glicerol em sua formulação, demonstra bandas que indicam elevada miscibilidade em água, devido o polímero PVA ser hidrofílico. Destaca-se uma banda intensa em aproximadamente 1100 cm^{-1} , atribuída a vibração C-O do PVA, que estava ausente ou pouco intensa nos filmes sem o polímero sintético.

Figura 17 - FTIR Amostra comparativa



Fonte: A autora (2025).

Assim, a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) possibilitou a identificação dos principais grupos funcionais presentes nos filmes, bem como a confirmação da incorporação dos componentes utilizados nas formulações. As bandas típicas associadas às proteínas do soro de leite foram preservadas nos diversos filmes analisados, o que indica que houve uma conservação parcial da estrutura proteica, mesmo após a desnaturação térmica. Também foram detectadas variações de intensidade e deslocamentos nas bandas referentes às ligações hidroxila e carbonila, sugerindo a ocorrência de interações intermoleculares entre o soro, os plastificantes e o amido de milho.

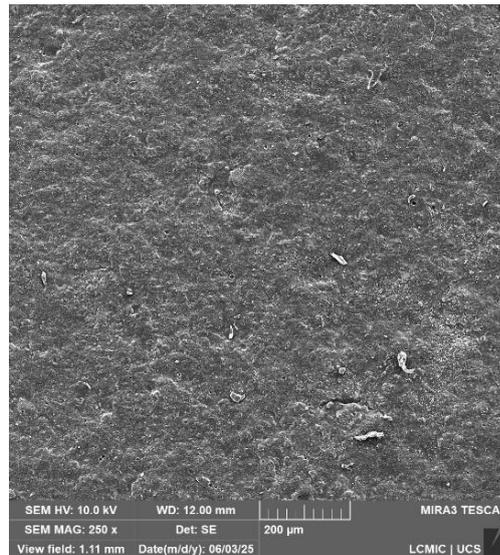
Essas interações apontam para a formação de uma matriz polimérica compatível, evidenciando a eficiência do processo de fabricação dos filmes. Portanto, os dados obtidos por FTIR corroboram a viabilidade do uso sinérgico desses materiais na produção de filmes biodegradáveis com estrutura coesa, reforçando seu potencial para aplicação em embalagens ambientalmente sustentáveis.

5.1.2 Análise Estrutural e Morfológica

5.1.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

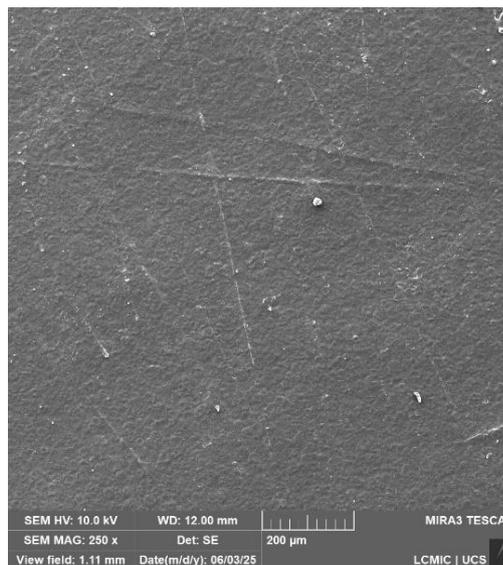
Para a realização da microscopia eletrônica de varredura dos filmes a base de soro de leite e amido de milho, foram selecionadas as amostras de magnificação 250 X e 10 kX para melhor visualização dos poros. Abaixo estão apresentadas as Figuras 18, 19, 20 e 21 referentes as fotomicrografias das superfícies. Não foi possível realizar o ensaio da amostra F2 devido sua estrutura física insuficiente.

Figura 18 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X da F1



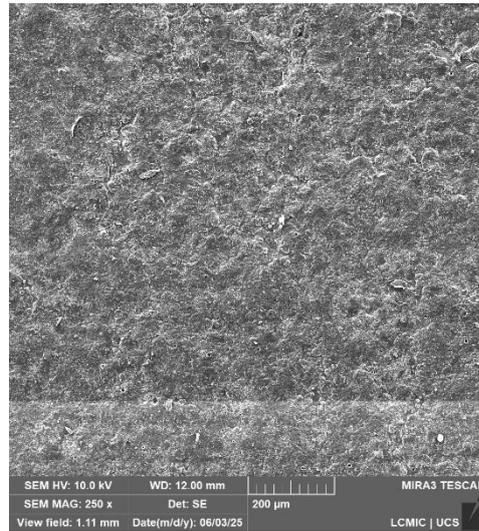
Fonte: A autora (2025).

Figura 19 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X da F3



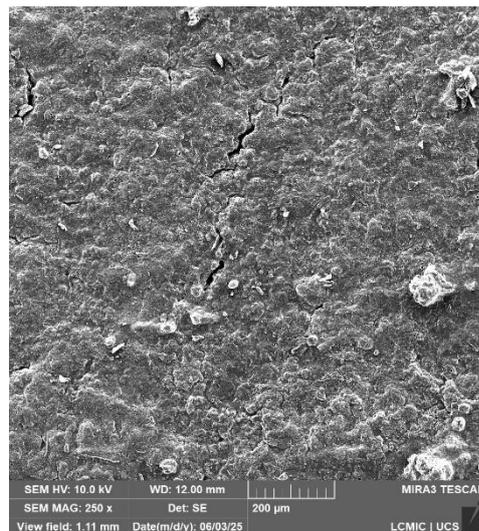
Fonte: A autora (2025).

Figura 20 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X da F4



Fonte: A autora (2025).

Figura 21 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X da F5



Fonte: A autora (2025).

A amostra F1, composta apenas por soro de leite e amido de milho, apresentou uma superfície relativamente contínua, com poucos poros ou fissuras visíveis. A boa interação entre os constituintes favoreceu a formação de uma estrutura densa e coesa, embora com leve rugosidade superficial. Essa morfologia, semelhante ao observado por Jesus (2020), indica que a matriz se estruturou de forma uniforme mesmo na ausência de plastificantes, com distribuição razoavelmente homogênea dos polímeros.

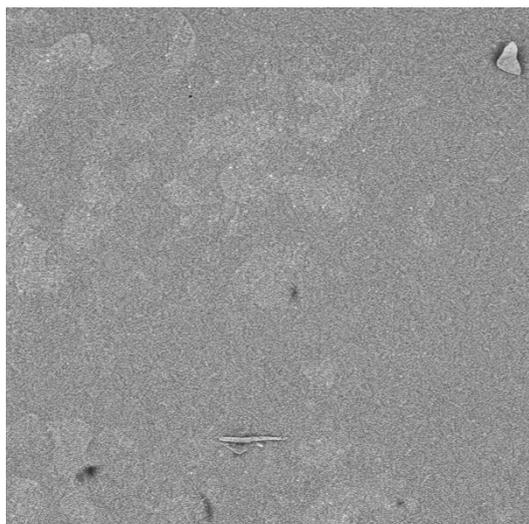
Na amostra F3, que inclui sorbitol como plastificante, a superfície tornou-se mais regular e menos rugosa. Essa suavização é atribuída à atuação eficiente do sorbitol como agente compatibilizante, promovendo melhor mobilidade das cadeias poliméricas. Conforme descrito por Jesus (2020), o preenchimento de espaços vazios ocorre com o aumento de constituintes que favorecem a reticulação ou a uniformidade estrutural, o que pode ser aplicado ao comportamento observado nesta amostra.

Amostras contendo glicerol (F4) apresentaram microfissuras e irregularidades mais evidentes. A superfície da matriz é menos uniforme, com possíveis indícios de granulação, sugerindo que o glicerol pode ter induzido separação parcial de fases ou excesso de plastificantes. Assim como discutido por Jesus (2020), a presença de grânulos ou estruturas dispersas pode estar relacionada à incompleta solubilidade de componentes ou à interferência de impurezas no processo de secagem.

A amostra F5, que combina sorbitol e glicerol, apresentou uma superfície heterogênea, caracterizada por áreas lisas intercaladas com regiões granulosas. A presença simultânea dos dois plastificantes não parece ter gerado uma sinergia na organização da matriz; ao contrário, essa heterogeneidade indica um desequilíbrio na incorporação dos componentes.

Em comparação, a Figura 22 representa a micrografia do filme Amostra comparativa, com soro de leite, PVA e os plastificantes (glicerol e sorbitol).

Figura 22 - Fotomicrografia de superfície com magnificação de 250X

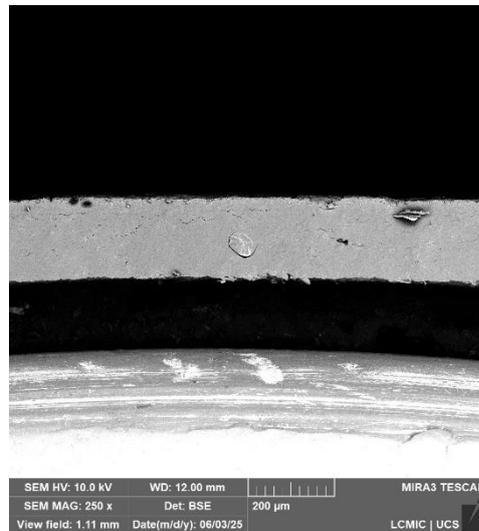


Fonte: Duarte (2024).

A formulação contendo PVA (Amostra comparativa) demonstrou uma morfologia mais homogênea, podendo ser característica do PVA. Sua presença tende a reduzir a tensão superficial entre os componentes da mistura, evitando rugosidades e fissuras como nas figuras anteriores dos filmes com amido de milho.

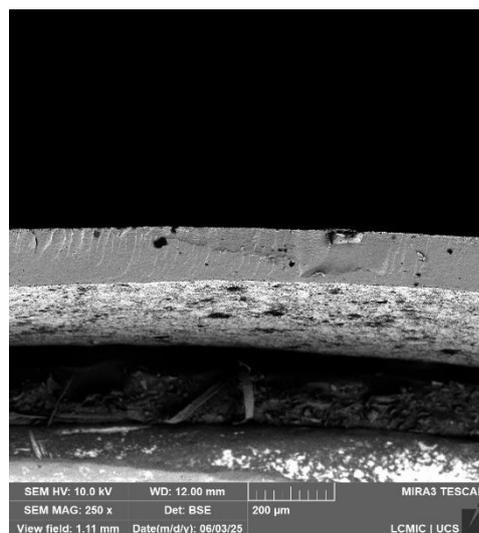
As Figuras 23, 24, 25 e 26 apresentam as fotomicrografias das seções transversais a 10 kV e com magnificação de 250 X, nas amostras F1, F3, F4 e F5, respectivamente.

Figura 23 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da F1



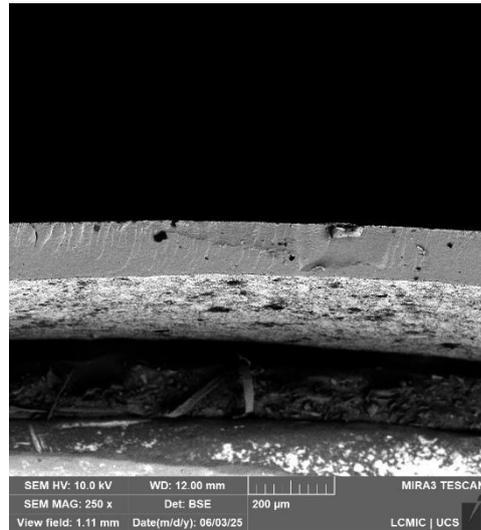
Fonte: A autora (2025).

Figura 24 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da F3



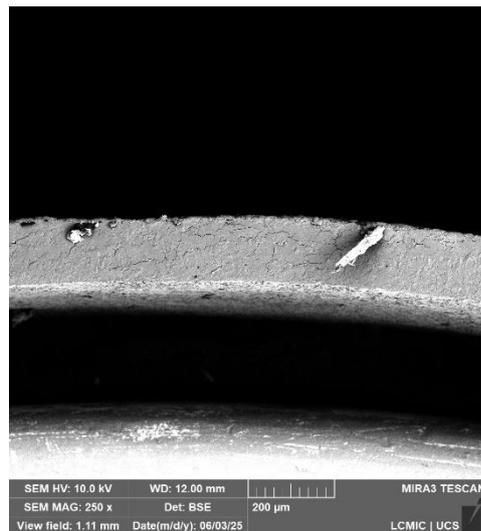
Fonte: A autora (2025).

Figura 25 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da F4



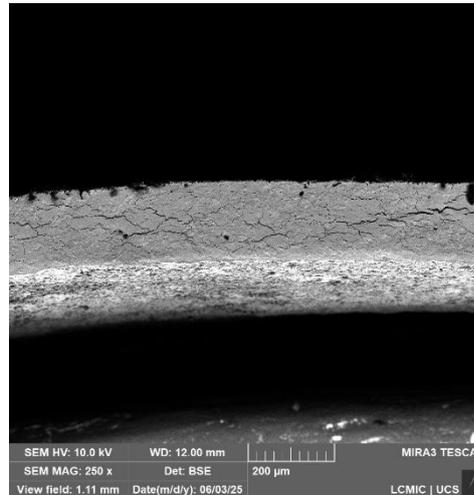
Fonte: A autora (2025).

Figura 26 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da F5



Fonte: A autora (2025).

Figura 27 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da amostra comparativa



Fonte: A autora (2025).

As análises em corte transversal das amostras permitiram avaliar a morfologia interna dos filmes. A amostra F1, composta por soro de leite e amido de milho apresentou uma estrutura relativamente contínua e espessura uniforme, com pequenas trincas. A ausência dos plastificantes resultou em uma matriz mais compacta, ainda que com pequenas imperfeições superficiais.

A inclusão do sorbitol na amostra F3 promoveu uma notável melhoria na integridade estrutural do filme, formando uma superfície interna mais espessa, densa e homogênea. Esse comportamento se deve a plastificação promovida pelo sorbitol, que favorece a mobilidade das cadeias poliméricas na matriz.

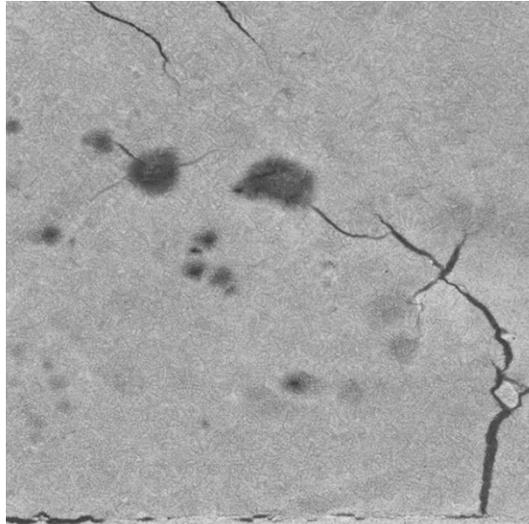
Em contrapartida, a amostra F4 que utilizou glicerol como único plastificante, apresentou uma morfologia transversal mais irregular. Foram observadas microfissuras e variações na densidade ao longo da espessura do filme, sugerindo que o glicerol pode ter provocado uma redistribuição inadequada dos componentes ou uma expansão descontrolada da matriz durante o processo de secagem. Esse padrão morfológico indica uma possível incompatibilidade parcial ou uma excessiva quantidade de glicerol, resultando em uma perda de homogeneidade

A formulação F5, que combina sorbitol e glicerol, apresentou uma estrutura visivelmente menos coesa, com camadas distintas e trincas internas ao longo do corte transversal. A presença simultânea dos dois plastificantes parece não ter gerado um efeito sinérgico, mas sim uma possível competição por interações com as fases resultando em falhas estruturais. Essa descontinuidade compromete a estabilidade

física do filme e pode impactar negativamente suas propriedades mecânicas e funcionais.

A Figura 27 representa o MEV da Amostra comparativa da seção transversal, que revela uma morfologia estrutural distinta quando comparada as amostras F1, F3, F4 e F5. A imagem demonstra uma matriz mais densa, com superfície interna bem aderida, apesar de algumas fissuras localizadas, que podem estar associadas com poros ou zonas de menor densidade. Ainda assim, a estrutura apresenta boa compactação e espessura regular, revelando um filme coeso.

Figura 28 - Fotomicrografia da seção transversal com magnificação de 250X da amostra comparativa



Fonte: Duarte (2024).

5.1.4 Propriedades físicas

5.1.4.1 Solubilidade em água

As amostras F1, F4 e F5 mantiveram-se visivelmente íntegras durante e após o teste, embora, demonstraram significativa afinidade com a água, evidenciando uma tendência a solubilização na água. Embora as proteínas do soro do leite apresentem baixa solubilidade em água, devido às intensas ligações intermoleculares formadas durante o processo de desnaturação (Ramos et al. 2013), o amido possui elevada afinidade com a água, especialmente em sua forma gelatinizada, pois absorve água com facilidade, o que facilita sua dispersão em meio aquoso.

A Tabela 5 a seguir, apresenta os valores médios de massa dos filmes após o primeiro processo de secagem e a segunda, bem como o percentual de solubilidade em água.

Tabela 5- Solubilidade em água das amostras

Amostra	Peso médio após primeira secagem (g)	Peso médio após segunda secagem (g)	Solubilidade (%)
F1	0,0899	0,0312	63,73
F2	-	-	-
F3	0,0745	-	-
F4	0,0848	0,0308	62,95
F5	0,0992	0,0324	67,43
Amostra comparativa	0,0898	0,0384	56,92

Fonte: A autora (2025).

A amostra F5 apresentou o resultado de maior solubilidade (67,43%), seguida das amostras F1 (63,73%) e F4 (62,95%). Esses resultados sugerem que, a presença dos plastificantes glicerol e sorbitol, podem ter contribuído para o aumento da solubilidade, devido sua natureza hidrofílica e a capacidade de reduzir as interações intermoleculares entre as cadeias poliméricas.

A Amostra F2 e F3, que continha apenas glicerol e sorbitol e apenas sorbitol respectivamente, não teve massa final registrada devido a sua total solubilização na água após a imersão, revelando baixa resistência em meio aquoso.

Em comparação, os filmes de amostra comparativa tiveram menor porcentagem de solubilidade, o que pode ser atribuído ao polímero PVA (álcool polivinílico), cuja estrutura confere maior resistência à hidrólise em relação ao amido de milho. Essa redução de solubilidade pode estar também relacionada a maiores forças provenientes das ligações intermoleculares no PVA, que reduzem a penetração de água em sua matriz.

5.1.4.2 Ângulo de contato

Para cada uma das amostras, foi realizada a medição do ângulo de contato nos filmes produzidos que demonstraram um espalhamento da microgota, sugerindo sinais de solubilização da superfície. Segundo Kurek, Galus e Debeaufort (2014), esse fato pode estar relacionado a presença do glicerol na formulação, considerando seu caráter higroscópico. Além disso, o sorbitol também traz essas características, e as proteínas do soro quanto os carboidratos presentes no amido, possuem elevada afinidade por água, o que favorece interações que podem modificar a estrutura superficial do filme (Jesus, 2020)

Com base na definição que superfícies de ângulo de contato inferiores a 90° são consideradas hidrofílicas, enquanto as com valores superiores são classificadas como hidrofóbicas, os valores médios dos ângulos de contato obtidos para cada formulação estão organizados na Tabela 6, permitindo avaliar a interação entre os filmes e a água.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de ângulo de contato

Amostra	Ângulo de contato médio	Ângulo mínimo	Ângulo máximo	Figura
F1	57,85	56,02	59,77	
F2	-	-	-	-
F3	40,95	38,85	43,74	
F4	48,48	47,05	49,91	
F5	61,83	60,59	63,16	
Amostra comparativa	45,35	44,54	46,02	

Fonte: A autora (2025).

A amostra F1, apresentou um ângulo de contato médio de 57,85°, revelando comportamento moderadamente hidrofílico. Esse resultado é coerente com a natureza

do soro do leite e do amido, que são constituintes polares com grupos hidroxila e amino, favorecendo a interação com as moléculas de água.

A amostra F2 não apresentou estrutura física suficiente para viabilizar a realização do ensaio.

A amostra F3, onde o sorbitol é o único plastificante na formulação, apresentou menor ângulo de contato entre os demais, indicando elevada hidrofiliabilidade. Esse comportamento é atribuído ao sorbitol, pois é um composto higroscópico que aumenta a presença de grupos funcionais hidrofílicos na superfície do filme, facilitando a interação com a água. O mesmo acontece com a amostra F4, embora o glicerol também seja um agente higroscópico, sua estrutura química e interação com a matriz polimérica resultam em uma superfície ligeiramente menos hidrofílica, e ainda assim, o ângulo confirma a afinidade do material com a água.

Por fim, a amostra F5, que contém os dois plastificantes (glicerol e sorbitol), apresentou maior ângulo de contato médio ($61,83^\circ$), revelando um comportamento mais hidrofóbico se comparado com os demais. Este resultado sugere que a combinação dos plastificantes pode resultar em uma reorganização da matriz polimérica, reduzindo a disponibilidade dos grupos hidrofílicos livres na superfície do filme.

Com base no resultado apresentado na Tabela 6, o resultado parece ser contraditório se comparado com o resultado do ensaio de solubilidade apresentado na Tabela 5, isso pode ser explicado pela estrutura do material, o ângulo de contato indica a afinidade superficial com a água, mas esse parâmetro não contempla a difusão da água no interior da matriz, o que indicou o resultado de solubilidade. Além disso, a rugosidade superficial exerce influência direta sobre a medida do ângulo de contato, podendo levar a interpretações equivocadas sobre a hidrofobicidade do material. Superfícies mais rugosas tendem a reter gotas de água e aumentar artificialmente o ângulo medido, sem refletir necessariamente uma menor interação com o meio aquoso. Assim, pode-se concluir que a Amostra comparativa tem afinidade com a água, no entanto, tem uma resistência maior no interior estrutural da matriz polimérica.

5.1.5 Propriedades mecânicas

5.1.5.1 Resistência à tração

Para o ensaio de resistência à tração, foram selecionadas as formulações 1, 2, 4 e 5. No entanto, não foi possível realizar o teste com as formulações 2 e 3 devido à ausência de integridade física dos filmes, que apresentaram fragilidade e não resistiram ao preparo das amostras para análise.

A Tabela 7 apresenta os valores correspondentes ao alongamento na ruptura (ϵ_b), módulo de Young (E) e à tensão na ruptura (σ_b) referentes aos filmes submetidos ao ensaio. As amostras F2 e F3 não foram submetidas ao ensaio de tração devido à ausência de integridade estrutural que permitisse a realização do teste.

Tabela 7 - Resultados provenientes do ensaio de resistência à tração

Amostra	Alongamento na ruptura (%)	Módulo de Young (MPa)	Tensão na ruptura (MPa)
F1	19,20	34,37	1,365
F4	20,73	35,87	1,116
F5	7,05	26,62	0,520
Amostra comparativa (com PVA)	91,32	134,27	1,126
Sacola Plástica (PE)	213,88	154,75	8,79

Fonte: A autora (2025).

Os resultados da Tabela 7 evidenciam diferenças significativas nas propriedades mecânicas entre as formulações. As amostras F4 e F1 demonstraram maiores valores de alongamento na ruptura, com 20,73% e 19,20% respectivamente, indicando maior capacidade de deformação antes de uma fratura. Já a amostra F5 obteve um desempenho inferior, com apenas 7,05%, sugerindo menor capacidade de elasticidade. Esse comportamento pode estar relacionado a presença dos plastificantes, glicerol e sorbitol, que pode ter comprometido a harmonia da matriz polimérica, tornando o filme mais suscetível à ruptura prematura.

O módulo de Young representa a rigidez do material, sendo a amostra F4, novamente teve um melhor desempenho, com 35,87 MPa. A amostra F5 demonstrou desempenho inferior, o que confirma sua menor resistência à deformação elástica. Uma explicação para esse acontecimento, pode estar relacionada com o excesso de plastificantes na formulação, visto que a amostra F5 contém os plastificantes glicerol e sorbitol, já a amostra F4, contém apenas glicerol.

O valor mais alto no módulo de Young para a Amostra comparativa revela que o PVA incluso na formulação oferece maior resistência a deformação elástica do que o amido de milho, utilizado nas demais amostras. A tensão de ruptura foi próxima a da amostra F4, isso sugere que ambas suportam cargas finais semelhantes, mas a forma como se deformam até a ruptura é diferente. A amostra F4 se rompe de forma mais abrupta (com menor deformação), enquanto a amostra com PVA absorve mais energia antes da falha.

Os altos valores obtidos no ensaio de tração da amostra da sacola plástica são atribuídos, em grande parte, às propriedades intrínsecas do polietileno (PE), um polímero termoplástico com excelente desempenho mecânico. O PE é caracterizado por longas cadeias lineares de hidrocarbonetos e um baixo grau de polaridade, resultando em uma estrutura molecular que é tanto flexível quanto resistente. Essa configuração proporciona ao material uma notável capacidade de deformação antes da fratura (alto alongamento), enquanto mantém uma boa resistência à tração, especialmente quando na forma orientada, como ocorre durante o processamento por extrusão de filmes para sacolas.

5.2 ANÁLISE ECONÔMICA

A viabilidade econômica de filmes biodegradáveis à base de soro de leite está intimamente ligada à composição das formulações e ao desempenho técnico dos materiais. Nesta análise, comparamos duas formulações diferentes: uma que inclui soro de leite, glicerol, sorbitol e amido de milho (F5); e outra que contém soro de leite, sorbitol, glicerol e PVA (Amostra comparativa), como apresenta a Tabela 8. Sob a perspectiva econômica, a amostra F5 apresenta um custo de produção significativamente mais baixo, graças ao uso de insumos que são amplamente disponíveis e de menor valor comercial, como o amido de milho e o glicerol. Em contraste, a Amostra comparativa depende do PVA, um polímero sintético que possui

um custo elevado e, em geral, é importado. Além disso, o sorbitol utilizado nesta amostra também tem um valor superior ao do glicerol, o que impacta negativamente sua viabilidade econômica.

Tabela 8 – Média de preços encontrados dos componentes

Componente	Custo (R\$/kg)
Soro de leite	0,50 - 2,00
Glicerol	50 – 100
Sorbitol	100 - 150
Amido de milho	25 - 45
PVA (Álcool Polivinílico)	100 – 200

Fonte: A autora (2025).

O filme F5 é economicamente mais viável para aplicações de curto prazo e menor exigência funcional, já o filme Amostra comparativa, embora mais caro, atende melhor em contextos que exigem mais durabilidade e resistência do material. Contudo, é importante destacar que a amostra F5, por ser composto exclusivamente de materiais biodegradáveis e de origem renovável, representa uma alternativa ambientalmente mais sustentável. Ao contrário dos polímeros derivados do petróleo, como o PVA, os componentes naturais têm menor impacto ambiental, pois se degradam em condições naturais sem gerar resíduos tóxicos persistentes. Enquanto o PE, amplamente utilizado na produção de sacolas plásticas, pode levar centenas de anos para se decompor no ambiente, os filmes à base de soro de leite e amido de milho demonstram um grande potencial de degradação acelerada, contribuindo para a redução da poluição plástica. Essa vantagem torna o F5 especialmente atrativo para aplicações que visam à redução da poluição plástica, sendo coerente com políticas de economia circular e responsabilidade ambiental. Portanto, a escolha entre essas formulações deve considerar não apenas o equilíbrio entre custo e desempenho, mas também os impactos ecológicos de longo prazo associados ao uso de materiais biodegradáveis.

5.3 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CÉDITOS DE CARBONO EM SUBSTITUIÇÃO AO POLIETILENO

A aplicação de filmes biodegradáveis produzidos a partir de soro de leite e amido de milho pode representar uma estratégia eficaz de mitigação climática por meio da redução de emissões associadas ao ciclo de vida de materiais plásticos convencionais. Embalagens fabricadas com polietileno (PE), amplamente utilizadas na indústria, possuem uma pegada de carbono média de aproximadamente 1,8 a 2,5 kg CO₂ por quilograma de material produzido, de acordo com estudos do *European Plastics Converters* (2020). Por outro lado, filmes biodegradáveis à base de amido de milho, dependendo da matriz utilizada, apresentam pegada entre 0,3 e 0,6 kg CO₂ por quilograma, o que representa uma redução de até 85% nas emissões diretas de gases de efeito estufa. Considerando, por exemplo, a substituição de uma tonelada de sacolas plásticas de PE por filmes de amido de milho e soro de leite, a economia pode chegar a 1,5 a 2,2 t de CO₂ equivalente por tonelada de material substituído.

Ao se projetar essa substituição em larga escala, o impacto ambiental torna-se ainda mais expressivo. Supondo uma indústria que consuma 100 t/ano de embalagens plásticas convencionais, a substituição integral por filmes biodegradáveis propostos neste trabalho poderia resultar na redução de 150 a 220 t de CO₂ ao ano. Essa economia é suficiente para compensar aproximadamente as emissões anuais de cerca de 100 veículos automotores de passeio, segundo dados do IPCC (2021). Além disso, o uso de soro de leite – um subproduto com alta carga orgânica – contribui com o aproveitamento de resíduos da indústria de laticínios, reduzindo impactos ambientais e possibilitando a inserção do projeto em programas de geração de créditos de carbono. Tais créditos podem ser negociados em mercados regulados ou voluntários, agregando valor econômico à produção sustentável. Dessa forma, o desenvolvimento e aplicação de filmes biodegradáveis não apenas substitui polímeros derivados de petróleo, mas também contribui de maneira importante para estratégias de descarbonização e economia circular, reforçando seu potencial como solução técnica e ambientalmente vantajosa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de filmes poliméricos a partir de soro de leite e amido de milho se mostrou uma alternativa viável para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis, com grande potencial para aplicações em embalagens de baixo impacto ambiental. A análise das propriedades físico-químicas, morfológicas, térmicas e mecânicas revelou que as características finais dos filmes são fortemente influenciadas pela escolha e proporção dos plastificantes utilizados. Os resultados indicaram que o sorbitol foi o plastificante que proporcionou a melhor homogeneidade estrutural e flexibilidade à matriz polimérica, favorecendo a formação de uma superfície contínua e densa. Em contraste, o glicerol, quando utilizado isoladamente ou em combinação com o sorbitol, resultou em filmes com maior incidência de microfissuras e descontinuidades internas, além de um comportamento mecânico inferior, evidenciando a necessidade de um controle rigoroso nas condições de formulação.

Uma amostra comparativa que continha PVA (polivinil álcool) apresentou desempenho superior em todos os parâmetros analisados, incluindo um maior módulo de elasticidade, alongamento na ruptura e menor solubilidade em água. Além disso, a microestrutura dos filmes contendo PVA foi mais coesa, destacando a efetividade deste polímero para reforçar a matriz, melhorando significativamente a integridade física dos filmes. A análise térmica demonstrou que as formulações com maior teor de amido apresentaram estabilidade térmica adequada para aplicações em embalagens não termossensíveis. Os espectros de FTIR confirmaram a presença de interações químicas entre as proteínas do soro e os aditivos utilizados.

Conclui-se que a incorporação de soro de leite e amido de milho, juntamente com plastificantes apropriados, possibilita a elaboração de filmes biodegradáveis com propriedades ajustáveis. Quando comparados às sacolas de polietileno (PE), esses filmes apresentam vantagens ambientais significativas, como a rápida degradação e menor geração de resíduos persistentes. Além disso, seu uso pode contribuir para geração de créditos de carbono, favorecendo iniciativas sustentáveis e o cumprimento de metas de redução de emissões associadas a produção dos plásticos convencionais. Para aplicações comerciais, recomenda-se a continuidade dos estudos, focando em resistências naturais, aditivos compatibilizantes e testes de biodegradação em diferentes meios, visando aprimorar o desempenho funcional e ambiental dos filmes desenvolvidos.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao desenvolvimento de filmes biodegradáveis com melhor desempenho técnico, sugere-se a produção de novas amostras com maior espessura. Essa modificação pode influenciar diretamente nas propriedades mecânicas e na barreira à umidade, além de possibilitar aplicações em embalagens mais robustas.

Adicionalmente, seria relevante investigar a incorporação de cargas minerais (como argilas ou carbonato de cálcio) ou reforços naturais (como fibras vegetais) para melhorar a resistência térmica e estrutural dos filmes.

A análise da biodegradabilidade em diferentes meios (solo, compostagem industrial, água) também se mostra essencial para avaliar o comportamento ambiental em condições reais.

REFERÊNCIAS

ALI, S.; HASSANIN, H. A. Adsorptive removal of vitamin B6 and ciprofloxacin using polyurethane foam in pure and pharmaceutical preparations: kinetic and equilibrium studies. *Journal of the Chinese Chemical Society*, v. 68, n. 5, p. 878–887, 2020. DOI: 10.1002/jccs.202000364.

ANDRADE, M. A. et al. Characterization of rosemary and thyme extracts for incorporation into a whey protein based film. *LWT - Food Science and Technology*, v. 92, p. 497–508, 2018.

ANDRADY, A. L. ***Plastics and Environmental Sustainability***. John Wiley & Sons, 2015.

AURAS, R.; LIM, L.-T.; SELKE, S. E. M.; TSUJI, H. Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications. John Wiley & Sons, 2010.

AYRES, E. Poliuretanos e nanocompósitos biodegradáveis derivados de dispersões aquosas projetados para aplicações biomédicas. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

BAFERANI, A. H. et al. Effects of silicone surfactant on the properties of open-cell. *Polymer Advanced Technology*, p. 5-13, 2010. DOI: 10.1002/pat.1728.

BERNAL, F. A. et al. A calorimetria exploratória diferencial como técnica para caracterização de substâncias orgânicas. *Química Nova*, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/KfBp7Qd99hKFjn7tCFN9TCz/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

BOROWICZ, M.; PACIOREK-SADOWSKA, J.; ISBRANDT, M. Synthesis and application of new bio-polyols based on mustard oil for the production of selected polyurethane materials. *Industrial Crops and Products*, v. 155, 2020. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112831.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. ***Materials Science and Engineering: An Introduction***. 10. ed. John Wiley & Sons, 2018.

CAMPOS, M. I. et al. ***Biofilmes comestíveis à base de proteínas do soro de leite: propriedades funcionais e aplicações***. *Ciência Rural*, v. 48, n. 9, 2018.

CAPPATO, Leandro; SANTOS, Lorrane Soares dos; SILVA, Marco Antônio Pereira da. Aproveitamento do líquido residual da indústria de leite: o soro de leite. *Portal eFood*. Disponível em: <https://portalefood.com.br/artigos/aproveitamento-do-liquido-residual-da-industria-de-leite-o-soro-de-leite/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

CHANDRA, R.; RUSTGI, R. ***Progress in Polymer Science***, v. 23, p. 1273, 1998.

CRESCO, J. da S. Métodos termoanalíticos aplicados a materiais. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul (UCS), 2022. 73 slides, color.

DA SILVEIRA NETA, J. et al. **Use of polyurethane foams for the removal of the direct red 80 and reactive blue 21 dyes in aqueous medium.** *Desalination*, v. 281, n. 1, p. 55–60, 2011. DOI: 10.1016/j.desal.2011.07.041.

DAS, A.; MAHANWAR, P. A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, v. 3, n. 3, p. 93–101, 2020. DOI: 10.1016/j.aiepr.2020.07.002.

DOAK, K. W. Ethylene Polymers. In: **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. John Wiley & Sons, New York, v. 6, 1986.

DIAS, F. **Bioplástico, oxidegradável e biodegradável: qual a diferença entre esses plásticos? | Revista Analytica.** Disponível em: <<https://revistaanalytica.com.br/bioplastico-oxidegradavel-e-biodegradavel-qual-a-diferenca-entre-esses-plasticos/>>. Acesso em: 23 jun. 2025.

DUARTE, J.; BALDASSO, C. Processo para obtenção de um polímero biodegradável à base de soro de leite bovino e/ou bubalino. Fundação Universidade de Caxias do Sul, 2024.

FRANÇA, P. et al. Biodegradable Cassava Starch-Based Films Formulated with Coconut Oil for Sustainable Food Packaging. **Food Science and Engineering**, p. 140–154, 17 mar. 2025.

GOLDSTEIN, J.; NEWBURY, D.; JOY, D.; LYMAN, C. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer, 2003.

IONESCU, M. *Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes*. Shropshire: Smithers Rapra, 2005.

JESUS, G. L. de. Obtenção, caracterização e comparação de filmes à base de proteínas do soro de leite. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

JIA, Zhenbao et al. Effect of covalent modification by (–)-epigallocatechin-3-gallate on physicochemical and functional properties of whey protein isolate. **Lwt - Food Science And Technology**, [S.L.], v. 66, p. 305-310, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.054>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643815302723>. Acesso em: 30 maio 2025.

KONIG, A.; KROKE, E. Methyl-DOPO: a new flame retardant for flexible polyurethane foam. *Polymer Advanced Technology*, p. 5-13, 2010. DOI: 10.1002/pat.1728.

KUREK, Mia; GALUS, Sabina; DEBEAUFORT, Frédéric. Surface, mechanical and barrier properties of bio-based composite films based on chitosan and whey protein. **Food Packaging And Shelf Life**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 56-67, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fpsl.2014.01.001>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221428941400009X>. Acesso em: 28 abr. 2025.

LEMOIGNE, M. **Produit de déshydratation et de polymérisation de l'acide β -oxybutyrique**. *Annales des fermentations*, v. 12, p. 19-41, 1926

LIN, H. T. *Polymer Blends and Alloys*. London: Chapman & Hall, 2008.

MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. et al. **Mechanical and barrier properties of biodegradable films based on starches from different botanical sources**. *Journal of Food Engineering*, v. 70, n. 3, p. 389–395, 2004.

MARK, J. E. **Physical Properties of Polymers Handbook**. Springer, 2007.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. 6. reimpressão. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1999.

MARQUARDT, L. et al. **Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental**. *Tecno-Lógica*, v. 15, n. 2, p. 79-83, 2012.

MARQUES, M. D. F. V.; DEMARQUETTE, N. R. **Polímeros biodegradáveis: estudo das propriedades e aplicações**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 16, n. 1, p. 1-12, 2006.

MOREIRA, R. W. M. et al. Avaliação sensorial e reológica de uma bebida achocolatada elaborada a partir de extrato hidrossolúvel de soja e soro de queijo. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 32, n. 4, p. 435-438, 2010.

MOREIRA, T. **O que é plástico biodegradável e sua importância - eCycle**. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/plastico-biodegradavel/>>.

MÜLLER, C. M. O. et al. **Propriedades térmicas e estruturais de filmes de amido nativo e modificado de mandioca**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 29, n. 3, p. 512-519, 2009.

MURARI, C. S. et al. *Evaluation of the reduction in pollution of dairy products from whey fermentation in ethanol by yeast *Kluyveromyces marxianus* 229*. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, v. 68, n. 393, p. 42-50, 2013.

PANESAR, P. et al. **Bioutilisation of whey for lactic acid production**. *Food Chemistry*, v. 105, n. 1, p. 1-14, 2007.

PAUL, D. R.; BUCKNALL, C. B. *Polymer Blends: Performance*. New York: Wiley, 2000.

PRADELLA, J. G. C. *Biopolímeros e Intermediários Químicos*. Centro de Tecnologia de Processos e Produtos, 2006.

RAMOS, Óscar L. et al. Effect of whey protein purity and glycerol content upon physical properties of edible films manufactured therefrom. **Food Hydrocolloids**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 110-122, jan. 2013. Elsevier BV. RAMOS, Ó. L. et al. Effect of whey protein purity and glycerol content upon physical properties of edible films manufactured therefrom. **Food Hydrocolloids**, v. 30, n. 1, p. 110–122, 1 jan. 2013.

ROHLFES, A. L. B. et al. **Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental**. *Tecno-Lógica*, v. 15, n. 2, p. 79-83, 2011.

SANTOS, A. E. DA F.; BASTOS, D. C.; SIMÃO, R. A. MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL DE FILMES DE AMIDO DE MILHO ATRAVÉS DO TRATAMENTO POR PLASMA DE SF6 E HMDSO. **ABM Proceedings**, p. 3287–3296, ago. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/2594-5327-18416>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SANTOS, L. O. dos et al. Biodegradable films based on whey protein: Characterization and potential applications. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 22, p. 100417, 2019. DOI: 10.1016/j.fpsl.2019.100417.

SCHMID, M. **Properties of cast films made from different ratios of whey protein isolate, hydrolysed whey protein isolate and glycerol**. *Materials*, v. 6, n. 8, p. 3254–3269, 2013.

SOTHORNVIT, R.; KROCHTA, J. M. **Plasticizer effect on mechanical properties of β -lactoglobulin films**. *Journal of Food Engineering*, v. 50, n. 3, p. 149-155, 2000.

SILVA, M. A.; PEREIRA, L. O. R.; GONÇALVES, M. C. **Biodegradability and mechanical properties of whey protein-based bioplastics**. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 22, n. 3, p. 318-325, 2014.

SPERLING, L. H. **Polymer Blends and Composites: Structure and Performance**. New York: Springer, 2006.

SPERLING, L. H. **Introduction to Physical Polymer Science**. 5. ed. John Wiley & Sons, 2015.

STUART, B. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications**. Wiley, 2004.

SYARIFUDDIN, Adiansyah et al. Physical, Mechanical, Barrier, and Optical Properties of Sodium Alginate/Gum Arabic/Gluten Edible Films Plasticized with Glycerol and Sorbitol. **Foods**, v. 14, n. 7, p. 1219, 31 mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods14071219>. Acesso em: 11 jun. 2025.

UTRACKI, L. A. **Commercial Polymer Blends**. New York: Springer Science & Business Media, 1990.

VINHAL, J. O. et al. **Adsorption of the herbicides diquat and difenzoquat on polyurethane foam: kinetic, equilibrium and computational studies**. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 145, p. 597–604, 2017.

WANG, S. H. et al. *Polycaprolactone based biodegradable polyurethanes*. *Macromolecular Symposia*, v. 197, 2003.

WEIZMAN, O. et al. *Modified whey protein coatings for improved gas barrier properties of biodegradable films*. *Polymers for Advanced Technologies*, 2016.

ZHANG, D.; CHEN, S. *The study of palm-oil-based bio-polyol on the morphological, acoustic and mechanical properties of flexible polyurethane foams*. *Polymer International*, v. 69, n. 3, p. 257–264, 2019