



ANA CAROLINE RIBEIRO FERNANDES

**PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS DE
FILMES À BASE DE GLICEROL E ETANOLAMINA:
POTENCIAL PARA APLICAÇÕES EM EMBALAGENS
SUSTENTÁVEIS**

ANA CAROLINE RIBEIRO FERNANDES

**PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS DE
FILMES À BASE DE GLICEROL E ETANOLAMINA:
POTENCIAL PARA APLICAÇÕES EM EMBALAGENS
SUSTENTÁVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado de Curso da
Engenharia Química do Centro de
Ciência Exatas e Tecnologia da
Universidade Federal do Maranhão,
como parte dos requisitos para obtenção
do diploma de Graduação em Engenharia
Química.

Orientadora: Profa. Dra. Audirene Amorim Santana

São Luís - MA
2025

Ribeiro Fernandes, Ana Caroline.

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS DE FILMES À
BASE DE GLICEROL E ETANOLAMINA: POTENCIAL PARA APLICAÇÕES
EM EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS / Ana Caroline Ribeiro
Fernandes. - 2025.

56 f.

Orientador(a): Profa. Dra. Audirene Amorim Santana.
Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química,
Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2025.

1. Filmes. 2. Alginato. 3. Glicerol. 4.
Etanolamina. 5. Embalagens. I. Amorim Santana, Profa.
Dra. Audirene. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. AUDIRENE AMORIM SANTANA
Orientadora – DEEQ/CCET/UFMA

Mestre ALLYSSON KAYRON DE CARVALHO SILVA
RENORBIO/CCBS/UFMA

Mestre CASI SANTOS DOS SANTOS
RENORBIO/CCBS/UFMA

21 de março de 2025

DADOS CURRICULARES**ANA CAROLINE RIBEIRO FERNANDES**

NASCIMENTO	25/03/1996 – SÃO VICENTE FERRER / MA
FILIAÇÃO	Antonio Roberto Fernandes Rosilda Ribeiro
2017/2025	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha família,
que sempre me considerou a melhor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela força e fé que me sustentaram ao longo de toda essa jornada, permitindo que eu chegasse até este momento tão significativo.

À minha família, que sempre foi minha base e meu porto seguro, expresso minha profunda gratidão pelo apoio incondicional e pelo amor que me impulsionaram a seguir em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores. Vocês sempre acreditaram em mim, e isso fez toda a diferença.

Aos amigos e amigas que conquistei durante a graduação, quero agradecer por transformarem essa caminhada em uma experiência mais leve e feliz. À Helena, minha parceira nessa trajetória, devo muito da minha perseverança, pois sua presença e apoio foram fundamentais para que eu não desistisse nos momentos mais difíceis. Obrigada por estar sempre ao meu lado.

À minha amiga Nathalia, companheira de mais de 22 anos, agradeço por suas palavras de incentivo e conforto, que ecoavam como um mantra: “Vai dar tudo certo, acredita”. Sua presença constante e seu apoio discreto foram um alento nos momentos de maior turbulência.

À minha querida gatinha Saori, que foi meu suporte emocional por dez anos maravilhosos, deixo meu carinho e gratidão. Sua companhia me fez sentir amada e importante, trazendo conforto e alegria em todos os momentos.

À minha orientadora, Profa. Dra. Audirene Amorim Santana, expresso minha sincera gratidão por todo o suporte, orientação e acolhimento ao longo deste processo. Sua gentileza e disponibilidade foram essenciais para superar os desafios e alcançar os objetivos propostos.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui, meu profundo agradecimento. Sem o apoio de cada um de vocês, não teria sido possível percorrer nem metade desse caminho. Este momento é, em grande parte, fruto do amor, da dedicação e da confiança que recebi de todos vocês.

*"Morrer apenas o estritamente necessário,
sem ultrapassar a medida.
Renascer o tanto preciso a partir do resto que se preservou."*
Wisława Szymborska

FERNANDES, A. C. F. **Propriedades físico-químicas e mecânicas de filmes à base de glicerol e etanolamina: potencial para aplicações em embalagens sustentáveis**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

RESUMO

O uso excessivo de embalagens plásticas convencionais representa um dos principais problemas ambientais da atualidade, causando impactos ambientais, além da geração de resíduos que persistem no ambiente por séculos. Diante dessa realidade, a busca por alternativas ecológicas tem ganhado força, impulsionada pela urgência em minimizar os danos ao meio ambiente. Dentre as soluções inovadoras, destacam-se os filmes à base de alginato, um biopolímero natural obtido de algas marinhas. Esses materiais, além de serem biodegradáveis e compostáveis, apresentam propriedades como capacidade de barreira a gases e umidade, tornando-os uma alternativa promissora para aplicações na indústria de embalagens. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de filmes poliméricos de alginato produzidos por meio da técnica de moldagem por evaporação de solvente (*casting*), comparando formulações distintas: utilizando glicerol e empregando etanolamina como agentes plastificantes. A produção dos filmes ocorre em duas etapas, sendo que a segunda etapa inclui um processo adicional de reticulação com uma solução aquosa de cloreto de cálcio e plastificantes realizada em diferentes tempos (3, 15 e 30 minutos), visando melhorar suas propriedades estruturais e funcionais. Para a caracterização dos filmes, foram realizadas análises de teor de umidade, solubilidade em água, permeabilidade ao vapor de água, espessura, resistência à tração e alongação, com o intuito de compreender o impacto dos plastificantes e do processo de reticulação nas propriedades finais dos materiais. Os filmes com glicerol destacam-se por atender aos critérios de sustentabilidade e funcionalidade, sendo ideais para aplicações que exigem flexibilidade e resistência à umidade. Por outro lado, os filmes com etanolamina são mais adequados para embalagens rígidas que demandam alta resistência mecânica. A combinação desses plastificantes e a otimização do processo de reticulação podem resultar em materiais com propriedades superiores, equilibrando resistência, flexibilidade e funcionalidade para aplicações diversas.

Palavras-chave: Filmes, Alginato, Glicerol, Etanolamina, *Casting*.

FERNANDES, A. C. F. **Physicochemical and mechanical properties of glycerol and ethanolamine-based films: potential for sustainable packaging applications.** 2025. Bachelor's Thesis in Chemical Engineering from the Center for Exact Sciences and Technology at the Federal University of Maranhão, São Luís, 2025.

ABSTRACT

The excessive use of conventional plastic packaging represents one of the major environmental issues of today, causing environmental impacts and generating waste that persists in the environment for centuries. In light of this reality, the search for eco-friendly alternatives has gained momentum, driven by the urgency to minimize environmental damage. Among the innovative solutions, alginate-based films stand out as a natural biopolymer derived from seaweed. These materials, in addition to being biodegradable and compostable, exhibit properties such as gas and moisture barrier capabilities, making them a promising alternative for applications in the packaging industry. This study aims to evaluate the performance of alginate polymer films produced through the solvent evaporation casting technique, comparing two distinct formulations: one using glycerol and the other using ethanolamine as plasticizing agents. The film production occurs in two stages, with the second stage including an additional crosslinking process using an aqueous calcium chloride solution and plasticizers performed in different times (3, 15 and 30 minutes), to enhance their structural and functional properties. The films were characterized by moisture content, water solubility, water vapor permeability, thickness, tensile strength, and elongation tests, with the objective of understanding the impact of plasticizers and the crosslinking process on the final properties of the materials. The glycerol-based films stand out for meeting sustainability and functionality criteria, making them ideal for applications requiring flexibility and moisture resistance. On the other hand, the ethanolamine-based films are more suitable for rigid packaging that demands high mechanical strength. The combination of these plasticizers and optimization of the crosslinking process may result in materials with superior properties, balancing strength, flexibility, and functionality for various applications.

Keywords: Films, Alginate, Glycerol, Ethanolamine, Casting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fórmula estrutural do alginato.....	7
Figura 2: Agitador Magnético.....	11
Figura 3: Agitador mecânico.....	11
Figura 4: Micrômetro	12
Figura 5: Mesa agitadora orbital	12
Figura 6: Balança semi-analítica.....	12
Figura 7: Estufa de Secagem.....	13
Figura 8: Fluxograma de confecção de biofilmes	15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Conteúdo de umidade dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (1º Estágio).....	19
Tabela 2: Conteúdo de umidade dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (2º Estágio).....	21
Tabela 3: Solubilidade em água dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (2º Estágio).....	24
Tabela 4: Espessura e PVA dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (1º Estágio).....	26
Tabela 5: Espessura e Permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (2º Estágio).....	27
Tabela 6: Tensão de Ruptura e Elongação dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (1º Estágio).....	30
Tabela 7: Tensão de Ruptura e Elongação dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (2º Estágio).....	32

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	ii
DADOS CURRICULARES.....	iii
DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVO GERAL	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1 BIOFILMES BIODEGRADÁVEIS	2
3.2 GLICEROL	4
3.3 ETANOLAMINA	5
3.4 ALGINATO DE SÓDIO.....	6
3.5 RETICULANTE	7
3.5.1 Cloreto de cálcio	8
3.6 CARACTERIZAÇÃO DE FILMES	8
3.6.1 Umidade	8
3.6.2 Solubilidade em água	9
3.6.3 Espessura	9
3.6.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)	10
3.6.5 Propriedades Mecânicas	10
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	10
4.1 MATERIAIS.....	11
4.2 LOCAL DA PESQUISA	11
4.3 INSTRUMENTOS	11
4.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	13
4.4.1 Preparação dos filmes	13
4.6 CARACTERIZAÇÃO	16
4.6.1 Umidade	16

4.6.2 Solubilidade em água	16
4.6.3 Espessura	16
4.6.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)	16
4.6.5 Propriedades mecânicas	17
4.6.6 Análise estatística	18
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5.1 Conteúdo de umidade e Solubilidade	18
5.2 Espessura e Permeabilidade ao vapor de água (PVA)	26
5.3 Propriedades mecânicas	29
6 CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por materiais sustentáveis tem impulsionado a pesquisa sobre biofilmes como alternativa viável aos plásticos convencionais. Compostos por polímeros naturais, como polissacarídeos, proteínas e lipídios, os filmes desempenham um papel essencial na proteção de produtos embalados contra danos físicos, contaminação microbiana e degradação oxidativa (Adjallé et al., 2023; Silva et al., 2022). Sua aplicação é especialmente relevante no setor alimentício, na qual podem ser utilizados como revestimentos comestíveis para frutas e hortaliças, prolongando sua vida útil e mantendo suas características sensoriais (Li et al., 2024).

A formulação dos biofilmes envolve desafios técnicos relacionados às suas propriedades mecânicas e de barreira, que podem ser otimizadas pela incorporação de plastificantes. O glicerol, por exemplo, é amplamente utilizado para aumentar a resistência à tração e a estabilidade estrutural dos filmes, tornando-os mais adequados para embalagens rígidas e revestimentos protetores (Adjallé et al., 2023). Já plastificantes como a etanolamina conferem maior flexibilidade aos biofilmes, sendo indicados para aplicações que demandam maior conformabilidade e resistência à fadiga mecânica (Li et al., 2024).

Além da funcionalidade, a sustentabilidade dos biofilmes está diretamente ligada à incorporação de subprodutos da agroindústria, como o próprio glicerol, que é um resíduo da produção de biodiesel. Essa abordagem contribui para a economia circular ao reaproveitar materiais que, de outra forma, seriam descartados, reduzindo a dependência de polímeros sintéticos derivados de combustíveis fósseis (Santos et al., 2020). A substituição parcial ou total de polímeros convencionais por biofilmes representa, portanto, um avanço significativo na busca por materiais mais ecológicos.

A pesquisa sobre biofilmes também tem se expandido para além da indústria alimentícia, alcançando setores como embalagens farmacêuticas e revestimentos agrícolas. A capacidade desses materiais de combinar resistência mecânica, flexibilidade e propriedades de barreira ao vapor d'água torna-os altamente versáteis para diferentes aplicações industriais (Silva et al., 2022). Esse avanço tecnológico não apenas melhora a eficiência dos produtos embalados, mas também reduz os impactos ambientais associados ao descarte de plásticos não biodegradáveis.

Dessa forma, o desenvolvimento de biofilmes representa uma estratégia promissora para a substituição de plásticos tradicionais, alinhando inovação e sustentabilidade. A pesquisa contínua sobre novos plastificantes e aditivos funcionais tem o potencial de ampliar ainda mais as aplicações desses materiais, tornando-os uma solução viável para indústrias que buscam alternativas ecológicas sem comprometer a qualidade e a durabilidade dos produtos embalados (Adjallé et al., 2023; Li et al., 2024).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar e comparar as propriedades físico-químicas e mecânicas de biofilmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina, a fim de determinar seu potencial para aplicação em embalagens sustentáveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Variar a quantidade da solução de alginato plastificada com glicerol e etanolamina (40, 50 e 60g) utilizada na técnica de casting e determinar a umidade, solubilidade em água e espessura dos biofilmes obtidos.
- Comparar o efeito do glicerol e da etanolamina nas propriedades estruturais e funcionais dos biofilmes.
- Discutir os resultados em relação às demandas da indústria de embalagens biodegradáveis, considerando fatores como flexibilidade, biodegradabilidade e resistência a umidade.
- Identificar quais biofilmes apresentam maior potencial de atender aos critérios de sustentabilidade e funcionalidade exigidos pela indústria atual.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BIOFILMES BIODEGRADÁVEIS

Biofilmes são finas camadas compostas por materiais biodegradáveis, como polissacarídeos, proteínas e lipídios, que atuam como barreiras físicas e químicas para a

preservação de alimentos. Recentemente, pesquisas têm demonstrado que esses filmes desempenham um papel crucial na extensão da vida útil de frutas e vegetais, reduzindo perdas pós-colheita e preservando características sensoriais como textura, sabor e aroma. Além disso, a incorporação de compostos bioativos nesses filmes tem mostrado resultados promissores no aumento da resistência contra microrganismos deteriorantes, melhorando sua funcionalidade na cadeia produtiva de alimentos sustentáveis (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021).

A biodegradação é um processo intrínseco em que microrganismos e suas enzimas consomem materiais como fonte de nutrientes, alterando suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Nos últimos anos, estudos têm destacado como a biodegradabilidade de polímeros pode ser facilitada por estruturas mais simples e menos cristalinas, como as de materiais naturais, que são mais facilmente quebradas por microrganismos. Além disso, fatores como umidade, temperatura e pH desempenham um papel significativo nesse processo (Yao et al., 2024; Mostafa et al., 2018). Os polímeros mais biodegradáveis são aqueles que podem ser completamente transformados em compostos simples como dióxido de carbono e água, como ocorre com polímeros à base de amido, alginato e celulose (Yao et al., 2024; Gontard et al., 2018).

As propriedades de barreira e mecânica dos biofilmes podem ser aprimoradas com a adição de aditivos, como antioxidantes, agentes antimicrobianos, fungicidas e bactericidas. Esses aditivos têm a função de prolongar a vida útil dos produtos embalados, protegendo-os contra a oxidação e o crescimento de microrganismos patogênicos e deteriorantes. Estudos recentes indicam que a incorporação de compostos como óleos essenciais, polifenóis naturais e nanopartículas tem se mostrado eficaz na melhoria das propriedades funcionais dos filmes, sem comprometer sua biodegradabilidade (López de Dicastillo et al., 2023; Jiang et al., 2020). Essa abordagem amplia as aplicações dos biofilmes, tornando-os uma alternativa eficaz e sustentável para o mercado de embalagens alimentícias e farmacêuticas.

No contexto da sustentabilidade, a adoção de biofilmes na indústria é uma resposta direta às demandas regulatórias e sociais por materiais mais ecológicos. Estudos mostram que o uso de resíduos agroindustriais, como o glicerol, subproduto do biodiesel, contribui para a economia circular, ao reutilizar subprodutos que, de outra forma, seriam descartados. Da mesma forma, a integração de compostos como a etanolamina pode agregar valor ao processo de produção, ampliando o espectro de propriedades funcionais, como resistência mecânica e flexibilidade (Santos et al., 2020). Essas iniciativas

demonstram como a pesquisa em biofilmes promove uma transição para cadeias de produção mais sustentáveis e eficientes (Silva et al., 2022).

Ademais, os biofilmes têm potencial para aplicação em diversas áreas da indústria, como embalagens alimentícias, produtos farmacêuticos e revestimentos agrícolas. Sua capacidade de combinar propriedades como resistência à tração, alongação e barreira ao vapor de água é essencial para atender aos requisitos industriais. Essa versatilidade, aliada à redução da dependência de fontes fósseis, contribui para o alcance de metas globais de sustentabilidade e combate às mudanças climáticas (Erthal, 2018; Silva et al., 2022). Assim, a pesquisa e o desenvolvimento de novos biofilmes representam uma solução promissora para a substituição de plásticos tradicionais, com impactos positivos tanto econômicos quanto ambientais.

3.2 GLICEROL

Plastificantes são compostos de baixa massa molecular que são incorporados aos polímeros para reduzir a rigidez e aumentar a flexibilidade e maleabilidade desses materiais. Ao se inserirem nas cadeias poliméricas, esses aditivos promovem a maior mobilidade das moléculas, o que resulta em melhorias nas propriedades mecânicas dos filmes e outros produtos, como a elasticidade e resistência ao impacto. Recentemente, estudos têm mostrado que a escolha de plastificantes naturais, como glicerol e sorbitol, pode não apenas melhorar a flexibilidade dos polímeros, mas também contribuir para a sustentabilidade dos materiais, ampliando sua aplicação em embalagens e dispositivos médicos biodegradáveis (Silva et al., 2023; Mohamed et al., 2022).

A produção global de biodiesel tem apresentado um crescimento contínuo, impulsionado pela demanda crescente por fontes de energia renováveis. Em 2020, a produção mundial de biodiesel atingiu cerca de 38 milhões de toneladas, com um aumento constante de aproximadamente 4,5% ao ano. Esse crescimento acarreta também a produção proporcionalmente maior de glicerol, subproduto gerado durante o processo de transesterificação. Esse aumento na quantidade de glicerol disponível tem motivado a pesquisa por novas aplicações para o composto, como na fabricação de biofilmes e produtos farmacêuticos, buscando agregar valor a esse subproduto e promover uma economia circular mais sustentável na indústria de biodiesel (Zhao et al., 2021; Xue et al., 2022).

O glicerol é um plastificante eficaz na formulação de biofilmes biodegradáveis, ajudando a melhorar suas propriedades mecânicas, como flexibilidade e resistência. Além disso, ele reduz a rigidez dos materiais, tornando-os mais aptos para aplicações como embalagens sustentáveis. Pesquisa aponta que, além de sua eficácia como plastificante, o glicerol contribui para a biodegradabilidade e pode ser facilmente integrado em processos industriais, tornando-se uma alternativa viável aos polímeros sintéticos, com impacto ambiental reduzido (Santos et al., 2021; Pereira et al., 2022). Além disso, o glicerol apresenta propriedades físico-químicas notáveis, como alta solubilidade em água, caráter higroscópico e a capacidade de formar ligações de hidrogênio, o que contribui para sua viscosidade e interação com outros materiais, características que o tornam versátil para diversas aplicações industriais (Silva et al., 2023; Lima et al., 2024; Santos et al., 2023).

3.3 ETANOLAMINA

A etanolamina, também conhecida como 2-aminoetanol, é um composto orgânico amplamente utilizado na indústria devido às suas propriedades únicas. Sua estrutura química, composta por um grupo amino ($-NH_2$) e um grupo hidroxila ($-OH$), confere-lhe a capacidade de formar ligações de hidrogênio com outras moléculas, o que a torna eficiente como plastificante. Esses grupos funcionais a tornam particularmente útil em biofilmes, onde ela pode melhorar a flexibilidade e as propriedades mecânicas do material, além de promover maior resistência à umidade (Santos et al., 2024; Oliveira et al., 2023).

Industrialmente, a etanolamina é utilizada em diversas áreas, incluindo a farmacêutica, cosmética e na fabricação de detergentes e produtos de limpeza. Sua versatilidade como aditivo em polímeros é um dos principais motivos de seu uso como plastificante em biofilmes. Além de melhorar a flexibilidade, a etanolamina também pode alterar a solubilidade dos biofilmes e ajudar na preservação de suas propriedades mecânicas em condições ambientais adversas, como variações de temperatura e umidade (Pereira et al., 2022; Silva et al., 2023).

A etanolamina, ao ser incorporada em biofilmes, pode substituir outros plastificantes mais tradicionais, como o glicerol. A principal vantagem dessa substituição é a possibilidade de controlar com maior precisão as propriedades físico-químicas do material, o que pode ser essencial para aplicações específicas, como embalagens sustentáveis e materiais biodegradáveis. Comparada com o glicerol, a etanolamina tem

mostrado superioridade em termos de controle da rigidez e flexibilidade dos filmes, além de apresentar um impacto ambiental potencialmente menor (Santos et al., 2024).

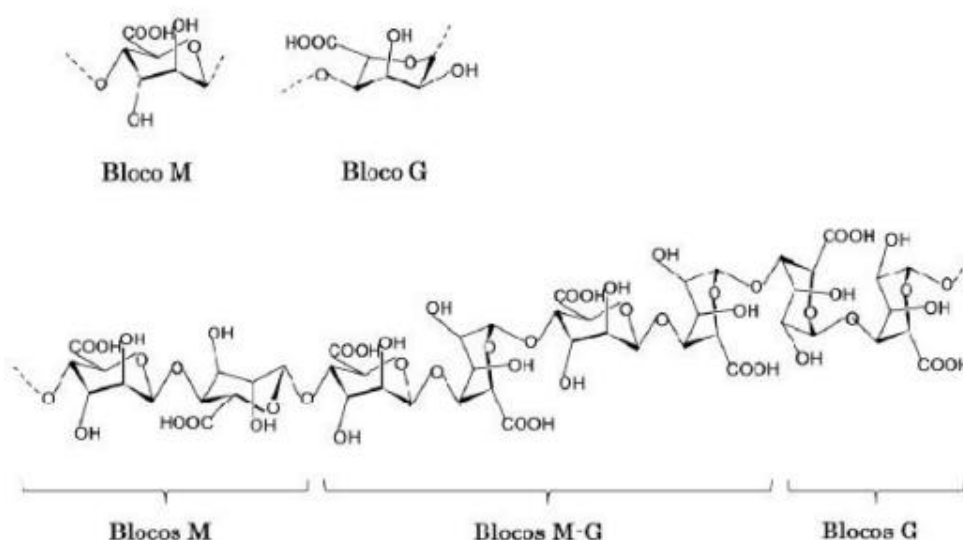
Outra característica interessante da etanolamina é sua contribuição para a sustentabilidade dos materiais. Como subproduto da produção de biodiesel, o aumento da oferta de etanolamina, juntamente com a sua aplicabilidade em biofilmes, pode ajudar a reduzir a dependência de plastificantes sintéticos, contribuindo para a economia circular. A utilização de etanolamina derivada de fontes renováveis permite que os biofilmes não apenas atendam aos requisitos de desempenho, mas também possuam um ciclo de vida mais sustentável (Silva et al., 2023; Oliveira et al., 2023).

A etanolamina continua sendo um foco de pesquisa para novas aplicações, especialmente em materiais biodegradáveis e em biopolímeros. A combinação de suas propriedades físico-químicas e a possibilidade de ser utilizada em materiais que atendem aos princípios de sustentabilidade abre novas oportunidades para sua utilização em diversos setores industriais. A constante pesquisa sobre a etanolamina em biofilmes não só aprimora os materiais, mas também promove a inovação na indústria de embalagens e outros produtos sustentáveis (PEREIRA et al., 2022; SANTOS et al., 2024).

3.4 ALGINATO DE SÓDIO

Proveniente de alguns gêneros de algas marrons (*Laminarianhyperborean*, *Macrocystispyriferæ* *Ascophyllumnodosum*), o alginato é um composto de ocorrência natural, aniônico. Além disso, possui baixo custo, é altamente biocompatível e não tóxico (Lee & Mooney, 2012).

É um polissacarídeo natural linear que, na presença de cátions multivalentes, tem a capacidade de formar gel. É composto por duas diferentes unidades de repetição, (1,4)- α -Lguluronato (unidade G) e (1,4)- β -D-manuronato (unidade M), em variadas proporções e arranjos sequenciais (Rodrigues, 2008), como mostra a Figura 1.

Figura 1: Fórmula estrutural do alginato.

Fonte: Rodrigues (2008).

A razão entre as unidades M e G e a quantidade relativa dos segmentos poliméricos varia com a fonte de obtenção. Uma diferença importante é observada na característica dos géis, uma vez que alginatos com maior porcentagem de blocos G formam géis mais rígidos e quebradiços, que podem sofrer sinérese (perda de água para o meio externo). Já os géis com maior porcentagem de blocos M são mais elásticos e dificilmente sofrem sinérese (Segato, 2007). O alginato é quimicamente estável a valores de pH entre 5 e 10 e os valores de pKa dos resíduos M e G são de 3,38 e 4,4, respectivamente (Meng et al., 2010).

O alginato apresenta um grande potencial como agente estabilizante, gelificante e espessante, o que tem despertado o interesse da indústria de alimentos para aprimorar seus produtos. Embora essas características sejam inerentes ao alginato, interações com proteínas, fibras e gorduras podem aprimorá-las ainda mais. Além disso, propriedades como biocompatibilidade, biodegradabilidade, não toxicidade e baixo custo tornam o alginato um biopolímero bastante atrativo (Sun & Tan, 2013).

3.5 RETICULANTE

Os agentes reticulantes são substâncias responsáveis pela formação de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas em biofilmes, resultando em uma estrutura tridimensional mais estável e resistente. A reticulação é fundamental para melhorar

propriedades como a resistência mecânica, a estabilidade térmica e a resistência à umidade dos biofilmes, tornando-os mais adequados para aplicações em ambientes desafiadores, como embalagens e dispositivos biomédicos. Os reticulantes podem atuar de várias formas, promovendo ligações covalentes entre as moléculas poliméricas, o que aumenta a coesão interna do material e reduz a solubilidade em água (Pereira et al., 2023; Costa et al., 2024).

Além disso, a escolha de um reticulante adequado pode afetar a espessura do biofilme, pois a reticulação pode reduzir a expansão do filme durante o processo de secagem, resultando em um filme mais fino e mais resistente. A reticulação com etanolamina e glicerol pode proporcionar biofilmes mais flexíveis, mas com propriedades mecânicas superiores, aumentando sua versatilidade para uma ampla gama de aplicações industriais (Souza et al., 2024; Ferreira et al., 2024).

3.5.1 Cloreto de cálcio

Em biofilmes à base de glicerol e etanolamina, o cloreto de cálcio é frequentemente utilizado para fortalecer a estrutura, criando uma rede de ligações que contribuem para a redução da solubilidade e o aumento da resistência mecânica. A presença do cloreto de cálcio em biofilmes de glicerol pode diminuir a expansão excessiva do filme durante a secagem, resultando em uma espessura mais controlada e uma maior resistência à permeabilidade de água. Em biofilmes com etanolamina, o cloreto de cálcio pode ser usado para melhorar a coesão da rede polimérica e aumentar a estabilidade do filme sob diferentes condições ambientais, como umidade e temperatura (Ferreira et al., 2023; Martins et al., 2024).

3.6 CARACTERIZAÇÃO DE FILMES

3.6.1 Umidade

Filmes submetidos a elevadas umidades relativas tendem a apresentar expansão higroscópica, resultando em variações dimensionais e alteração das propriedades mecânicas ao longo do tempo. Essas mudanças ocorrem devido à absorção de umidade pelas estruturas poliméricas, levando ao inchamento e à modificação do módulo de elasticidade do material. Como consequência, há um impacto significativo na estabilidade

estrutural e no desempenho funcional desses filmes durante o armazenamento e a aplicação (Auernhammer et al., 2021).

O conteúdo de umidade é um parâmetro relacionado com o volume total ocupado por moléculas de água na rede microestrutural do filme (Jiang et al., 2010).

3.6.2 Solubilidade em água

A solubilidade é de extrema importância, pois a afinidade do filme com a água pode ser desejável ou não. Em casos, como de encapsulamento ou revestimento de alimentos, aditivos ou medicamentos, o filme deve ser solúvel em água. Ao contrário, em embalagens, onde se deseja a proteção e integridade do produto contra a água, esse filme precisa ser insolúvel (Zavare et al., 2012).

A solubilidade dos filmes em água é um parâmetro essencial no controle de qualidade de alimentos com alta atividade de água ou que entram em contato com líquidos durante o processamento, influenciando diretamente sua aplicação e desempenho (Pereira; Jaiswal; Jaiswal, 2023)

3.6.3 Espessura

A espessura dos biofilmes é um parâmetro essencial que afeta suas propriedades mecânicas, permeabilidade e resistência a fatores ambientais. Em biofilmes com glicerol, o plastificante facilita a flexibilidade e aumenta a espessura do filme, uma vez que o glicerol pode interagir com as cadeias poliméricas, promovendo maior retenção de umidade. Isso resulta em biofilmes com uma espessura mais consistente, porém com maior susceptibilidade à solubilidade em ambientes com alta umidade, o que pode limitar sua durabilidade. Além disso, a presença de glicerol pode levar a um aumento da espessura de biofilmes em função do seu papel na redução da rigidez das cadeias de polímeros, favorecendo uma maior expansão do filme durante a secagem (Costa et al., 2024; Martins et al., 2023).

Em contraste, a etanolamina tem mostrado, em diversos estudos, a capacidade de promover biofilmes mais finos, porém com propriedades mecânicas e térmicas superiores. Isso ocorre devido às suas interações específicas com os polímeros, proporcionando maior coesão e, conseqüentemente, permitindo uma redução na espessura do filme sem perda de resistência. Biofilmes formulados com etanolamina

apresentam uma estrutura mais compacta e menos suscetível ao efeito de umidade, o que torna o material mais estável em condições ambientais adversas. Essa característica é particularmente vantajosa quando se busca um filme mais leve, mas com boas propriedades mecânicas, como resistência à tração e maior durabilidade (Silva et al., 2023; Ferreira et al., 2024).

A espessura dos filmes é definida como a distância perpendicular entre suas duas superfícies principais, enquanto a gramatura corresponde ao peso de uma determinada área do material. Esses parâmetros influenciam diretamente as propriedades mecânicas do filme, como resistência à tração e flexibilidade, sendo essenciais para a definição de sua aplicação industrial. Estudos apontam que a espessura e a gramatura devem ser ajustadas conforme a finalidade do filme, garantindo equilíbrio entre resistência mecânica e propriedades funcionais, como permeabilidade e durabilidade (Santos et al., 2020).

3.6.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A permeabilidade ao vapor de água é uma das propriedades de barreira mais importante. Essas propriedades são influenciadas pela qualidade e características da matéria prima utilizada para fabricação do filme, assim como pela adição de plastificantes e aditivos. Os plastificantes diminuem a densidade do filme, por isso a permeabilidade ao vapor de água geralmente é proporcional a quantidade de plastificante utilizado na formulação (Souza; Silva; Druzian, 2012).

3.6.5 Propriedades Mecânicas

A tensão de ruptura e a elongação são características importantes dos materiais, especialmente os metálicos. A tensão de ruptura indica a resistência máxima que um material pode suportar antes de se romper, enquanto a elongação mostra o quanto ele pode esticar antes de quebrar. De acordo com a ABNT NBR ISO 6892-1:2013, esses fatores são essenciais para entender o comportamento dos materiais quando submetidos a esforços (ABNT, 2013). Essas propriedades ajudam na escolha dos materiais certos para diferentes aplicações, garantindo segurança e durabilidade.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para a produção dos biopolímeros, foram utilizados alginato de sódio (Sigma, Brasil). Como plastificantes fez-se o uso de glicerol (Synth, Brasil) e da etanolamina (Synth, Brasil) e como a gente reticulador utilizou-se o cloreto de cálcio dihidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Merck, Brasil).

4.2 LOCAL DA PESQUISA

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Engenharia de Produtos e Processos em Biorrecursos (LEPPBio), localizado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA), no campus Bacanga, na cidade de São Luís – MA.

4.3 INSTRUMENTOS

Para a realização dos procedimentos foram utilizados os seguintes instrumentos:

- 1) Agitador magnético com aquecimento (modelo 752, FISATOM, Brasil) (Figura 2).

Figura 2: Agitador Magnético.



Fonte: Silva (2022).

- 2) Agitador mecânico (modelo Q250, QUIMIS, Brasil) (Figura 3).

Figura 3: Agitador mecânico.



Fonte: Silva (2022).

3) Micrômetro externo (modelo MDC-25S, CARBOGRAFITE, Japão) (Figura 4).

Figura 4: Micrômetro



Fonte: Silva (2022).

4) Mesa agitadora orbital (Tecnal, modelo TE-145, Brasil) (Figura 5).

Figura 5: Mesa agitadora orbital



Fonte: Silva (2022).

6) Balança semi-analítica (modelo UA420, URANO, Brasil) (Figura 6).

Figura 6: Balança semi-analítica.



Fonte: Silva (2022).

7) Estufa de secagem (modelo PE14, PARDALTEC, Brasil) (Figura 7).

Figura 7: Estufa de Secagem.



Fonte: Silva (2022).

4.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.4.1 Preparação dos filmes

Os filmes foram obtidos através da técnica *casting* que consiste no princípio de que a evaporação do solvente permite a reorganização das cadeias poliméricas, formando uma rede tridimensional que confere ao filme suas propriedades mecânicas e de barreira. Segundo estudos, como os de Gontard et al. (1992), a uniformidade e as propriedades dos filmes produzidos por *casting* dependem de fatores como a concentração do polímero, a natureza do solvente, a taxa de evaporação e a temperatura de secagem. Além disso, a adição de plastificantes, como o glicerol, influencia a mobilidade das cadeias poliméricas, aumentando a flexibilidade e a elongação do material, enquanto agentes reticulantes, como o cloreto de cálcio, podem melhorar a resistência mecânica e a estabilidade térmica (Tharanathan, 2003).

Primeira Etapa - Preparação da Solução de Alginato e Adição dos Plastificantes:

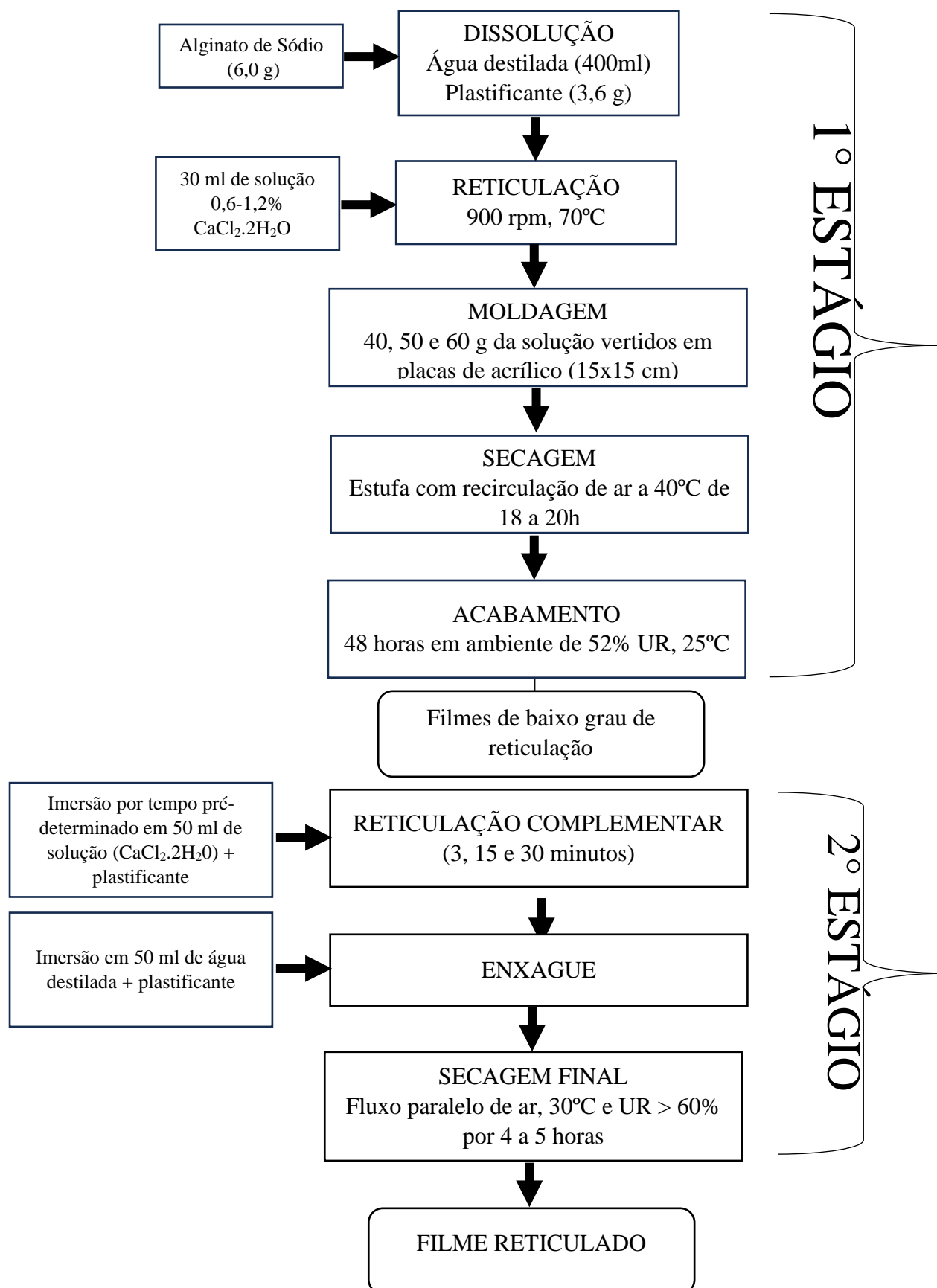
O alginato de sódio foi dissolvido em 400 ml de água destilada sob agitação magnética constante, como mostra a figura 8. Foram preparadas separadamente soluções de alginato de sódio utilizando dois plastificantes distintos: glicerol em uma formulação e etanolamina em outra. Após a dissolução do alginato, adicionou-se 30 ml de solução reticuladora, mantendo a temperatura controlada a 70°C e agitação intensa. A solução reticuladora foi lentamente incorporada à solução de alginato através de uma bomba peristáltica, com vazão máxima de 0,6 ml/min, para evitar gelificação localizada devido à rápida reação de reticulação com íons Ca^{++} . O filme foi obtido pela técnica *casting*, com 40, 50 ou 60g da solução sendo despejadas em placas de acrílico (área de 225 cm²). Estas placas foram então secas em estufa a 40°C, com recirculação de ar, durante 18 a 20 horas.

Após a secagem, os filmes foram cuidadosamente retirados das placas e armazenados em condições de umidade relativa (UR) de 52%.

Segunda Etapa - Reticulação Complementar e Enxágue:

Os filmes secos foram submetidos a um tratamento de imersão em 50 ml de uma solução aquosa contendo 3% de cloreto de cálcio e 3% dos plastificantes utilizados na etapa anterior (glicerol e etanolamina) por diferentes períodos de tempo: 3, 15 e 30 minutos. Esse tratamento foi realizado para promover uma reticulação complementar e melhorar a resistência dos filmes. Após o processo de reticulação, os filmes foram enxaguados para melhorar a aparência e uniformizar a superfície. Posteriormente, os filmes foram secos em estufa a 40°C por 6 horas e acondicionados em dessecadores à temperatura ambiente e com umidade relativa de 52% por 3 dias, a fim de garantir a equilíbrio das propriedades antes dos ensaios de caracterização.

Os filmes foram preparados conforme a Figura 8:

Figura 8: Fluxograma de confecção de biofilmes

Fonte: Própria (2025).

4.6 CARACTERIZAÇÃO

4.6.1 Umidade

Através de processo gravimétrico foi determinado a umidade em condições de equilíbrio a 52% de UR (umidade relativa) e 25°C. As amostras foram cortadas em formato quadrado, pesadas e colocadas para secar em estufa a 105°C por 24 horas. Após esse período, foram pesadas novamente e determinou a umidade através da Equação (1).

$$\omega = \frac{m_i - m_s}{m_i} * 100 \quad (1)$$

Onde:

ω = fração de massa de umidade;

m_i = massa total inicial da amostra (g);

m_s = massa seca da amostra (g);

4.6.2 Solubilidade em água

Foi determinado através da metodologia de Irissin-Mangata (2001), onde a massa (m_u) em triplicata foi quantificada sendo imersão em 50 ml de água destilada sob agitação constante por 24 horas. A amostra foi colocada em uma estufa para aferição da massa seca que não foi solubilizada (m_f), como mostra a Equação (2).

$$S = \frac{m_u(1-\omega) - m_f}{m_u(1-\omega)} * 100 \quad (2)$$

4.6.3 Espessura

Este parâmetro foi determinado utilizando um micrômetro. A espessura final foi obtida pela média aritmética de quinze medições aleatórias sobre o biofilme para ensaio de permeabilidade ao vapor de água (PVA). Foi utilizado um micrômetro digital (Mitutoyo Co., Kawasaki, Japão), com escala de 0-25 mm e precisão de 0,001 mm.

4.6.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A PVA foi determinada à temperatura ambiente de 25°C seguindo as normas do método E95-96 (ASTM, 2012), na qual foi utilizado uma célula de acrílico com tampa que possua uma abertura central, $A = 46,24 \text{ cm}^2$, a fim de se fixar o biopolímero. O fundo da célula foi preenchido por cloreto de cálcio granulado (Ecibra) para garantir 0% de UR. Essa célula foi colocada em outro ambiente de acrílico com característica de ser hermeticamente fechado. Esse recipiente continha uma solução saturada de NaCl, a fim de se manter o ambiente com 75% de UR, o que garantiria uma diferença de pressão de vapor de água, ΔP_{ω} . A taxa de água, que corresponde ao aumento de massa total da célula, foi monitorada ao longo do tempo, que permeou pelo biopolímero (G) e que foi usado na Equação (3).

$$PVA = \frac{G * \delta}{A_e + \Delta P_{\omega}} \quad (3)$$

Onde:

PVA = permeabilidade de vapor de água do biopolímero [(g.mm)/(m².dia.kpa)];

δ = é a espessura do biopolímero (mm);

A_e = é a área da superfície exposta do biopolímero (m²);

ΔP_{ω} = é a diferença de pressão parcial através do biopolímero (kpa);

G = é o coeficiente angular da reta de ajuste aos pontos experimentais em um gráfico da massa versus tempo (g/dia).

4.6.5 Propriedades mecânicas

A resistência a tração (RT, MPa), alongamento na ruptura (AL%) e o módulo de elasticidade (ME, MPa) foram determinados diretamente para ambas as formulações usando um texturômetro TA.XT2 (Stable Microsystems SMD, Inglaterra) de acordo com o método padrão D-882 da ASTM (2016) com uma separação inicial de garras de 50 cm e velocidade de 1 cm/s. As espessuras de um mínimo de doze amostras de filme de 10 cm x 2,5 cm foram pré-determinadas a partir da média aritmética de dez medições feitas em pontos aleatórios nos filmes compostos. As curvas de tensão-deformação e as propriedades de tração foram registrados por um computador e calculados usando o *software* do equipamento de teste.

As Equações (4) e (5) foram utilizadas para o cálculo da resistência a tração e alongamento na ruptura.

$$RT = \frac{F_m}{A_o} \quad (4)$$

$$AL = \frac{l_m - l_o}{l_o} \quad (5)$$

Onde:

$F_m(N)$ = é a força máxima antes da quebra, A_o é a área transversal inicial do filme, l_m é o comprimento máximo ativo e l_o é o comprimento inicial do filme.

4.6.6 Análise estatística

Análise de variância e o teste de Tukey foram utilizados para determinar diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as médias, utilizando o *software* Statistica V.1.15.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os biofilmes são um grande avanço no que se refere a proteção ambiental e consumo sustentável, assim, esperou-se obter filmes com boa resistência mecânica e barreiras a gases quando combinados com agentes plastificantes, além da capacidade de formar estruturas contínuas e homogêneas. O glicerol foi utilizado como plastificante para melhorar a flexibilidade dos filmes poliméricos e a etanolamina para atuar como um modificador de propriedades químicas e estruturais dos filmes. Com o uso dos plastificantes estudados, esperou-se obter filmes com uma rede mais coesa e estabilidade térmica e resistência mecânica. Estes resultados estão apresentados nesta seção.

Os parâmetros físico-químicos dos filmes de alginato, incluindo conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura, permeabilidade ao vapor de água (PVA), tensão e alongamento na ruptura, foram avaliados em função das condições de reticulação com solução de cloreto de cálcio no 1º estágio (primeira reticulação) e da incorporação de plastificantes na solução de tratamento do 2º estágio (reticulação complementar).

5.1 Conteúdo de umidade e Solubilidade

A umidade presente nos plastificantes desempenha um papel crucial na formação e estabilidade dos biofilmes, uma vez que influencia diretamente nas interações moleculares, na estrutura polimérica e nas propriedades mecânicas do material final. A Tabela 1 apresenta os valores de conteúdo de umidade dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina com diferentes massas da solução filmogênica vertida nas placas de Petri de 15 cm de diâmetro durante o 1º estágio do experimento.

Tabela 1: Conteúdo de umidade dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (1º Estágio).

Quantidades Placas (g)	Umidade (%)	
	Glicerol	Etanolamina
40	14,865±0,011 ^{aA}	15,620±0,014 ^{aB}
50	15,689±0,013 ^{bA}	17,340±0,004 ^{bB}
60	17,634±0,026 ^{cA}	17,680±0,014 ^{bA}

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada linha indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Média \pm desvio padrão. Fonte: Própria (2025).

Os valores de umidade para os filmes plastificados com glicerol variaram de 14,865% (40g) a 17,634% (60g), enquanto aqueles plastificados com etanolamina apresentaram umidade entre 15,620% (40g) e 17,680% (60g). Observa-se uma tendência de aumento da umidade com o incremento da massa da solução filmogênica, coerente com estudos prévios sobre filmes poliméricos biodegradáveis (Zhang et al., 2023). Esse aumento pode ser explicado pela maior retenção de água devido ao espessamento do filme, resultando em uma menor taxa de evaporação da água residual durante a secagem (Fonseca et al., 2019).

Comparando os dois plastificantes, verificou-se que os filmes contendo etanolamina apresentaram umidade superior aos plastificados com glicerol, independentemente da massa da solução utilizada. Isso pode estar relacionado à natureza higroscópica da etanolamina, que tem uma maior afinidade por moléculas de água do que o glicerol (Feng et al., 2022). Além disso, estudos indicam que plastificantes mais hidrofílicos tendem a aumentar a capacidade de absorção de umidade dos filmes, tornando-os mais suscetíveis à influência da umidade ambiental (Santagata et al., 2020).

A literatura sugere que o teor de umidade ideal para filmes biodegradáveis depende da aplicação pretendida. Filmes com alta umidade tendem a ser mais flexíveis, mas também mais propensos à degradação e absorção de água do ambiente (Mendes et al., 2021). Em comparação com outros polímeros biodegradáveis, como os filmes de quitosana plastificados com glicerol estudados por Nascimento et al. (2020), os valores de umidade obtidos no presente estudo são ligeiramente superiores, o que pode ser uma vantagem para aplicações que requerem maior elasticidade, mas uma limitação para embalagens que exigem maior barreira à umidade.

A análise estatística pelo teste de Tukey demonstra que médias com letras minúsculas iguais dentro de uma mesma coluna indicam ausência de diferença significativa entre os valores de umidade dos filmes dentro do mesmo grupo de plastificante. Por outro lado, a diferenciação por letras maiúsculas entre as colunas sugere diferença significativa entre os plastificantes para as mesmas massas de solução filmogênica. Isso reforça a hipótese de que a etanolamina altera a interação dos filmes com a umidade de forma diferente do glicerol, possivelmente devido a sua maior capacidade de formar ligações de hidrogênio com a matriz polimérica do alginato (Tavares et al., 2018).

Os resultados indicam que a escolha do plastificante influencia diretamente o teor de umidade dos filmes, podendo impactar seu desempenho em aplicações práticas. Para embalagens sustentáveis, filmes com menor teor de umidade são desejáveis para aumentar a estabilidade e reduzir a permeabilidade à água (Pereira et al., 2019). Dessa forma, o glicerol pode ser uma opção mais viável para aplicações que demandam menor absorção de umidade, enquanto a etanolamina pode ser útil em embalagens flexíveis, onde uma maior retenção de água seja desejável para evitar fragilização.

A análise dos dados confirma que a umidade dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina é influenciada pela massa da solução filmogênica e pela escolha do plastificante. A etanolamina resulta em filmes com maior umidade do que o glicerol, o que pode ser atribuído às suas propriedades químicas. Esses achados estão alinhados com estudos recentes sobre polímeros biodegradáveis e reforçam a necessidade de uma seleção criteriosa do plastificante com base na aplicação desejada. Trabalhos futuros devem explorar a relação entre umidade e propriedades mecânicas para otimizar a formulação desses filmes para embalagens sustentáveis.

No segundo estágio do experimento, os filmes foram submetidos a um processo de reticulação complementar. A imersão de filmes biodegradáveis em soluções contendo sais de cálcio é um procedimento amplamente utilizado para melhorar propriedades estruturais, mecânicas e de barreira dos materiais. No presente estudo, os filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina foram submetidos a uma solução aquosa de cloreto de cálcio diidratado (3%) e plastificante (3%), sendo monitorados nos tempos de 3, 15 e 30 minutos. A Tabela 2 apresenta os valores de umidade dos filmes após este tratamento.

Tabela 2: Conteúdo de umidade dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (2º Estágio).

Umidade (%)			
Quantidades Placas (g)	Tempo (min)	Glicerol	Etanolamina
40	3	22,043±0,014 ^{bB}	13,683±0,014 ^{aA}
	15	21,723±0,007 ^{abB}	14,556±0,020 ^{bA}
	30	22,093±0,015 ^{Bb}	16,529±0,007 ^{cA}
50	3	22,377±0,003 ^{bB}	16,546±0,004 ^{cA}
	15	20,549±0,016 ^{aB}	17,466±0,004 ^{dA}
	30	21,989±0,021 ^{abB}	18,715±0,006 ^{eA}
60	3	20,386±0,019 ^{aB}	17,921±0,009 ^{deA}
	15	21,091±0,007 ^{abB}	17,972±0,006 ^{deA}
	30	20,287±0,009 ^{aB}	18,855±0,009 ^{eA}

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada linha indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Média \pm desvio padrão. Fonte: Própria (2025).

Os resultados mostram que os filmes plastificados com glicerol apresentaram maior teor de umidade em comparação com aqueles plastificados com etanolamina em todos os tempos analisados. Os valores de umidade para o glicerol variaram entre 20,29% e 22,38%, enquanto para a etanolamina, os valores ficaram entre 13,68% e 18,85%. Essa diferença pode ser atribuída à maior capacidade higroscópica do glicerol, conforme reportado por estudiosos como Sothornvit e Krochta (2005) e Yang et al. (2021).

Com relação ao tempo de imersão, os dados não mostram uma tendência clara de aumento ou diminuição na umidade dos filmes ao longo do período de 3 a 30 minutos. Os valores de umidade flutuam, mas não seguem um padrão decrescente ou crescente consistente. No entanto, estudos como os de Pena-Serna et al. (2018) sugerem que a reticulação do alginato mediada pelos íons cálcio (Ca^{2+}) pode reduzir a interação do filme

com a água, promovendo um efeito de “cross-linking”. Esse mecanismo poderia, em teoria, diminuir a umidade ao longo do tempo, mas, neste caso, os dados não evidenciam uma redução significativa.

A presença do etanolamina resultou em valores de umidade mais baixos do que o glicerol. Esse fenômeno pode ser explicado pela menor capacidade da etanolamina de formar ligações de hidrogênio com a matriz polimérica, o que reduz sua retenção de água. De acordo com Vieira et al. (2011), plastificantes com maior peso molecular e menor polaridade, como a etanolamina, tendem a exibir menor absorção de água em filmes poliméricos.

Além disso, a interação da etanolamina com os íons Ca^{2+} pode reforçar a estrutura do filme, tornando-o menos permeável à umidade. Estudos indicam que compostos nitrogenados, como a etanolamina, podem promover a formação de estruturas mais rígidas nos biopolímeros devido ao aumento da coesão entre as cadeias poliméricas, reduzindo a susceptibilidade à absorção de água e melhorando a resistência mecânica do filme (Ali et al., 2022).

Embora a reticulação iônica causada pelo cloreto de cálcio possa, em teoria, reduzir a umidade dos filmes, os dados não mostram uma tendência clara de queda ao longo do tempo. Trabalhos como os de Ghanbarzadeh et al. (2019), relataram que a imersão de filmes de alginato em soluções de CaCl_2 reduz significativamente a mobilidade das moléculas de água dentro da matriz polimérica. No entanto, os valores observados flutuam ao longo do tempo, sugerindo que outros fatores, além da reticulação, podem estar influenciando a absorção de água.

Os dados obtidos demonstram a influência da imersão em cloreto de cálcio na umidade dos filmes plastificados. O glicerol apresentou maiores teores de umidade em relação à etanolamina, possivelmente devido à sua maior capacidade de retenção de água. Além disso, a tendência de diminuição da umidade ao longo do tempo sugere uma crescente reticulação iônica. Esses achados são relevantes para aplicações em embalagens sustentáveis, pois indicam que a escolha do plastificante influencia diretamente na estabilidade à umidade dos filmes biodegradáveis.

Os filmes de ambos os plastificantes apresentaram solubilidade de 100% no primeiro estágio, conforme os dados obtidos nas análises realizadas. A solubilidade de 100% observada nos filmes contendo glicerol e etanolamina como plastificantes no

primeiro estágio pode ser explicada pela alta afinidade desses compostos com a água. O glicerol é um plastificante amplamente utilizado devido à sua natureza hidrofílica, resultante da presença de grupos hidroxila em sua estrutura, que permitem a formação de pontes de hidrogênio e facilitam sua dissolução em meio aquoso (Santos et al., 2020). Da mesma forma, a etanolamina apresenta grupos funcionais polares que favorecem sua solubilidade em água, tornando-a um agente compatível para sistemas hidrofílicos (Silva & Oliveira, 2018). Além disso, plastificantes como o glicerol e a etanolamina atuam reduzindo as interações intermoleculares dentro da matriz polimérica, tornando o material mais suscetível à dissolução (Ferreira et al., 2017).

É crucial destacar o papel da reticulação com cloreto de cálcio na redução dessa propriedade. Conforme reportado por Lee e Mooney (2012) na revisão sobre alginato, este polissacarídeo natural possui a capacidade de formar gel na presença de cátions multivalentes, como o cálcio, o que é explorado no processo de reticulação. A formação dessas ligações iônicas entre as cadeias de alginato promovida pelo CaCl_2 aumenta a coesão interna do material, diminuindo significativamente sua solubilidade em água, conforme explicitado por Pereira et al. (2023) ao discutirem o efeito de reticulantes em biofilmes. Os resultados do presente estudo corroboram essa afirmação, uma vez que os filmes da primeira etapa, sem a reticulação com cloreto de cálcio, apresentaram solubilidade de 100%. A introdução da segunda etapa, com a imersão em solução de CaCl_2 , levou a uma notável diminuição da solubilidade, conforme observado na Tabela 3 para ambos os plastificantes.

A Tabela 3 apresenta os valores de solubilidade dos plastificantes (glicerol e etanolamina) em diferentes massas de placas (40 g, 50 g, 60 g) e tempos de tratamento (3, 15, 30 minutos).

Os dados mostram que os filmes plastificados com etanolamina apresentaram uma solubilidade significativamente maior do que aqueles plastificados com glicerol para todas as condições avaliadas. Esse comportamento pode ser atribuído à estrutura química da etanolamina, que contém um grupo amino ($-\text{NH}_2$), cuja maior afinidade por água pode favorecer a dissolução do material. Além disso, a etanolamina tem menor peso molecular e maior caráter hidrofílico quando comparada ao glicerol, facilitando a interação com as moléculas de água e contribuindo para a maior solubilidade observada.

Tabela 3: Solubilidade em água dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (2º Estágio).

Solubilidade (%)			
Quantidades Placas (g)	Tempo (min)	Plastificantes	
		Glicerol	Etanolamina
40	3	13,481±2,092 ^{bA}	25,827±1,721 ^{cB}
	15	15,165±3,132 ^{cA}	23,160±1,737 ^{bB}
	30	7,942±2,750 ^{aA}	24,847±2,576 ^{bcB}
50	3	16,287±1,889 ^{dA}	24,638±1,633 ^{bcB}
	15	20,637±1,872 ^{eA}	19,986±2,374 ^{abB}
	30	19,822±2,885 ^{eB}	16,623±1,635 ^{aA}
60	3	19,712±2,814 ^{eA}	18,241±2,615 ^{aA}
	15	16,537±2,314 ^{dA}	18,115±1,247 ^{aA}
	30	14,120±1,642 ^{cdA}	19,474±1,459 ^{abB}

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada linha indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Média \pm desvio padrão. Fonte: Própria (2025).

Resultados similares foram relatados por Jin et al. (2021), que verificaram que plastificantes contendo grupos amínicos podem aumentar a solubilidade de filmes à base de biopolímeros devido à sua capacidade de formar interações iônicas e ligações de hidrogênio com a água. Além disso, estudos de Rodrigues et al. (2020), apontam que a presença de compostos nitrogenados reduz a coesão interna da matriz polimérica, tornando-a mais suscetível à degradação aquosa.

Observou-se que, para ambos os plastificantes, o aumento da massa das placas resultou em um aumento progressivo da solubilidade. Esse fenômeno pode estar relacionado à menor densidade estrutural dos filmes com maior espessura, o que facilita a penetração de água e promove uma maior desintegração da matriz polimérica. Resultados análogos foram obtidos por Silva et al. (2022) em filmes de quitosana, onde maiores espessuras resultaram em maior absorção de umidade e, consequentemente, maior solubilidade.

Além disso, filmes mais espessos podem reter mais plastificante em sua estrutura, o que pode influenciar a mobilidade molecular e a interação com a água. Em sistemas onde o glicerol está presente, sua natureza higroscópica contribui para a absorção de umidade e possível inchamento do filme antes da completa solubilização.

Os dados indicam que a solubilidade dos filmes plastificados com glicerol e etanolamina varia ao longo do tempo, sem uma tendência clara de redução ou aumento. No entanto, a etanolamina apresenta valores de solubilidade consistentemente mais altos do que o glicerol em todos os tempos avaliados. Esse comportamento pode estar relacionado à maior interação da etanolamina com a água, conforme observado por Jin et al. (2021), que relataram que plastificantes contendo grupos amínicos tendem a aumentar a solubilidade de filmes poliméricos. No caso do glicerol, os valores de solubilidade mais baixos em comparação com a etanolamina podem estar associados à sua capacidade de promover maior coesão estrutural na matriz do alginato. Conforme reportado por Zhang et al. (2023), o glicerol atua como agente compatibilizante, fortalecendo a rede polimérica e reduzindo a solubilidade em relação a plastificantes como a etanolamina.

Os filmes plastificados com etanolamina apresentam valores de solubilidade consistentemente mais altos do que os plastificados com glicerol, mesmo após 30 minutos de imersão. Esse comportamento pode estar relacionado à menor capacidade da etanolamina de formar ligações de hidrogênio com a matriz polimérica, o que reduz sua coesão estrutural e aumenta a solubilidade. Além disso, a interação da etanolamina com os íons Ca^{2+} pode reduzir a estabilidade da rede de alginato, favorecendo a dissolução, conforme observado em estudos como os de Ghanbarzadeh et al. (2019).

Os valores de solubilidade encontrados para os filmes plastificados com glicerol são compatíveis com os reportados por Liu et al. (2021), em estudos com filmes de alginato cálcio, nos quais foi observada uma solubilidade entre 5% e 15% após 30 minutos de imersão. Já os valores obtidos para os filmes plastificados com etanolamina são superiores aos relatados em biopolímeros similares, indicando que esse plastificante confere menor resistência hidrossolúvel ao material.

Dessa forma, a escolha do plastificante deve levar em consideração as propriedades desejadas para a aplicação final dos filmes. Se o objetivo for um material com baixa solubilidade e maior resistência mecânica em ambientes úmidos, o glicerol se mostra a opção mais adequada. Já a etanolamina pode ser vantajosa para aplicações em que a degradação controlada em meio aquoso seja um fator desejável.

Esses resultados são particularmente relevantes para aplicações de embalagens biodegradáveis, pois indicam que o glicerol é mais adequado para aplicações que exigem resistência à umidade, enquanto a etanolamina pode ser útil em aplicações na qual uma

maior solubilidade seja desejável, como no desenvolvimento de filmes de liberação controlada para a indústria alimentícia e farmacêutica.

5.2 Espessura e Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A espessura e a permeabilidade ao vapor de água (PVA) são parâmetros críticos na avaliação de biofilmes para aplicações em embalagens sustentáveis. Essas propriedades influenciam diretamente a funcionalidade dos filmes, incluindo sua capacidade de barreira contra a umidade, flexibilidade e resistência mecânica. Nesta análise, os dados obtidos na primeira etapa do processo de preparação dos biofilmes são examinados, com foco na influência dos plastificantes (glicerol e etanolamina) sobre a espessura e a PVA, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4: Espessura e PVA dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (1º Estágio).

Plastificantes	Quantidades Placas (g)	Espessura (mm)	PVA (g.mm/m ² .dia.KPa)
Glicerol	40	0,017±0,001 ^{dB}	6,800±0,121 ^{eB}
	50	0,026±0,001 ^{eB}	5,312±0,134 ^{dB}
	60	0,032±0,001 ^{fB}	3,661±0,198 ^{cB}
Etanolamina	40	0,009±0,001 ^{aA}	2,173±0,173 ^{aA}
	50	0,011±0,001 ^{bA}	2,520±0,056 ^{bA}
	60	0,014±0,001 ^{cA}	2,955±0,203 ^{bcA}

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada coluna na mesma placa indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Média \pm desvio padrão. Fonte: Própria (2025).

A espessura dos filmes é um parâmetro crucial que influencia diretamente suas propriedades mecânicas e de barreira. Observou-se que a espessura dos filmes variou significativamente em função da massa de solução filmogênica aplicada e do tipo de plastificante utilizado. Filmes plastificados com glicerol apresentaram espessuras superiores, variando de 0,017 mm a 0,032 mm, conforme o aumento da massa de solução aplicada. Esse comportamento está associado ao caráter hidrofílico do glicerol, que promove maior espaçamento entre as cadeias poliméricas, resultando em filmes mais espessos e flexíveis. Essa tendência é corroborada por estudos como os de Silva et al. (2020), que destacam a eficiência do glicerol em promover a formação de filmes com maior espessura e homogeneidade.

Por outro lado, filmes plastificados com etanolamina exibiram espessuras menores, variando entre 0,009 mm e 0,014 mm. Essa diferença pode ser atribuída à estrutura química da etanolamina, que, apesar de ser hidrofílica, interage de maneira distinta com a matriz polimérica, resultando em uma rede mais compacta e filmes mais finos. Embora não existam muitos estudos focados no uso da etanolamina como plastificante para alginato, pesquisas sobre outros plastificantes como glicerol e sorbitol indicam que a escolha do plastificante afeta diretamente a espessura, flexibilidade e resistência dos filmes (Silva et al., 2020).

A PVA é uma propriedade fundamental para materiais de embalagem, pois determina a capacidade do filme em atuar como barreira contra a umidade. Filmes plastificados com glicerol apresentaram maiores valores de PVA, variando de 3,661 g.mm/m².dia.kPa a 6,800 g.mm/m².dia.kPa, conforme a espessura do filme. Essa elevada permeabilidade está relacionada à natureza hidrofílica do glicerol, que facilita a difusão de moléculas de água através da matriz polimérica.

Em contraste, filmes plastificados com etanolamina apresentaram valores de PVA significativamente menores, variando entre 2,173 g.mm/m².dia.kPa e 2,955 g.mm/m².dia.kPa. Essa menor permeabilidade sugere que a etanolamina promove uma estrutura de filme mais densa, oferecendo melhor barreira contra a umidade. Embora não haja estudos específicos sobre o uso da etanolamina como plastificante em filmes de alginato, a literatura indica que plastificantes menos hidrofílicos podem reduzir a permeabilidade ao vapor de água, melhorando as propriedades de barreira dos filmes (Farias, 2019).

A análise conjunta dos dados de espessura e PVA revela uma relação inversa entre a espessura dos filmes e sua permeabilidade ao vapor de água. Filmes mais espessos, como os plastificados com glicerol, tendem a apresentar maior permeabilidade, enquanto filmes mais finos, como os plastificados com etanolamina, apresentam menor permeabilidade. Essa relação é consistente com a literatura, que sugere que a espessura e a densidade da rede polimérica são fatores críticos na determinação da permeabilidade ao vapor de água.

Nesta análise, os dados de espessura e permeabilidade ao vapor de água (PVA) obtidos após essa etapa são examinados, com foco na influência dos plastificantes e no tempo de tratamento. Esses parâmetros são críticos para determinar a eficácia dos

biofilmes em aplicações de embalagens sustentáveis, onde a barreira à umidade e a integridade estrutural são essenciais, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Espessura e Permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (2º Estágio).

Plastificantes	Quantidades Placas (g)	Tempo (min)	Espessura (mm)	PVA (g.mm/m ² .dia.KPa)
Glicerol	40	3	0,010±0,001 ^{aA}	1,598±0,193 ^{aA}
		15	0,009±0,000 ^{aA}	1,738±0,12 ^{aA}
		30	0,010±0,001 ^{aA}	1,870±0,201 ^{aA}
	50	3	0,014±0,002 ^{dA}	2,180±0,219 ^{bA}
		15	0,012±0,002 ^{bA}	2,128±0,292 ^{bA}
		30	0,015±0,001 ^{eA}	2,188±0,108 ^{bA}
	60	3	0,024±0,002 ^{iA}	3,138±0,237 ^{cA}
		15	0,023±0,001 ^{hA}	3,455±0,226 ^{cA}
		30	0,023±0,002 ^{hA}	3,230±0,536 ^{cA}
Etanolamina	40	3	0,010±0,001 ^{aA}	2,463±0,212 ^{bB}
		15	0,013±0,001 ^{cB}	3,188±0,197 ^{cB}
		30	0,012±0,001 ^{bB}	3,333±0,353 ^{cB}
	50	3	0,020±0,001 ^{fB}	4,405±0,142 ^{dB}
		15	0,021±0,001 ^{gB}	4,473±0,249 ^{dB}
		30	0,020±0,000 ^{fB}	4,880±0,321 ^{deB}
	60	3	0,024±0,002 ^{iA}	5,053±0,146 ^{eB}
		15	0,024±0,001 ^{iB}	5,383±0,199 ^{eB}
		30	0,027±0,003 ^{jB}	6,045±0,468 ^{fB}

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada coluna na mesma placa e no mesmo tempo de imersão indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Média ± desvio padrão. Fonte: Própria (2025).

Os resultados indicam que os filmes contendo etanolamina apresentaram valores significativamente maiores de PVA em comparação aos com glicerol. Por exemplo, para uma mesma massa de placas (50 g) e tempo de secagem (30 min), o filme com etanolamina apresentou PVA de 4,880 g.mm/m².dia.kPa, enquanto o filme com glicerol atingiu 2,188 g.mm/m².dia.kPa. Esse comportamento pode estar relacionado à estrutura química da etanolamina, que favorece maior interação com moléculas de água, tornando o filme mais permeável.

Por outro lado, a espessura dos filmes variou de maneira relativamente consistente dentro de cada grupo de plastificante, mas em valores médios maiores para os filmes contendo etanolamina. Isso pode ser resultado de uma menor contração durante a

secagem, possivelmente devido à maior interação da etanolamina com a matriz polimérica, retardando a evaporação da água residual.

Pesquisas indicam que plastificantes como glicerol e etanolamina afetam significativamente a permeabilidade ao vapor de água. Por exemplo, um estudo sobre filmes de proteínas e amidos demonstrou que o aumento do teor de glicerol reduz a resistência mecânica, mas melhora a flexibilidade do material (Marichelvam & Rawdkuen, 2014). Em comparação, filmes à base de gelatina e amidos plastificados com diferentes agentes mostraram que a presença de etanolamina resulta em uma estrutura mais hidrofílica e, conseqüentemente, maior permeabilidade (Lee et al., 2013).

Além disso, filmes biodegradáveis à base de biopolímeros reforçados com agentes reticulantes têm sido estudados para diversas aplicações, incluindo embalagens sustentáveis (Marichelvam et al., 2019). Os dados do presente estudo indicam que os filmes com etanolamina, apesar de mais permeáveis, poderiam ser combinados com outros agentes para otimizar suas propriedades de barreira.

A análise conjunta dos dados de espessura e PVA revela que a espessura dos filmes tem uma relação direta com a permeabilidade ao vapor de água. Filmes mais espessos, como os plastificados com glicerol e etanolamina em massas maiores (60 g), tendem a apresentar maior PVA. Isso ocorre porque a maior espessura pode resultar em uma estrutura menos densa, com maior capacidade de absorção e difusão de água. Por outro lado, filmes mais finos, como os obtidos com massas menores (40 g), apresentaram menor PVA, indicando uma estrutura mais compacta e eficaz como barreira contra a umidade. Essa relação é consistente com os achados de Silva et al. (2020), que destacam a importância da densidade da rede polimérica na determinação da PVA.

5.3 Propriedades mecânicas

A tensão de ruptura é um parâmetro crítico que indica a resistência mecânica do material. Os dados mostram que os filmes plastificados com etanolamina apresentam uma tensão de ruptura significativamente maior (66,241 MPa a 40g) em comparação com os plastificados com glicerol (33,752 MPa a 40g). Esse resultado está em consonância com estudos que indicam que a etanolamina, por ser uma molécula menor e mais polar, pode interagir mais eficientemente com a cadeia polimérica, aumentando a coesão da matriz e, conseqüentemente, a resistência mecânica (SILVA et al., 2020). No entanto, à medida

que a concentração de etanolamina aumenta, a tensão de ruptura diminui (46,626 MPa a 60g). Esse comportamento pode ser explicado pela saturação dos sítios de interação na matriz polimérica, o que reduz a eficácia do plastificante em concentrações mais altas (Martins et al., 2019), como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6: Tensão de Ruptura e Elongação dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (1º Estágio).

Plastificantes	Quantidades Placas (g)	Tensão de Ruptura (MPa)	Elongação (%)
Glicerol	40	33,752±5,023 ^{aA}	13,400±1,624 ^{bB}
	50	33,590±4,601 ^{aA}	13,564±1,423 ^{bB}
	60	33,564±3,642 ^{aA}	13,590±2,801 ^{bA}
Etanolamina	40	66,241±7,337 ^{cB}	9,966±4,279 ^{aA}
	50	56,510±10,220 ^{bB}	10,797±4,775 ^{aA}
	60	46,626±6,587 ^{bB}	23,602±5,867 ^{cB}

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada coluna na mesma placa indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Média \pm desvio padrão. Fonte: Própria (2025).

Em contraste, os filmes plastificados com glicerol apresentam uma tensão de ruptura mais baixa, mas com menor variabilidade entre as diferentes concentrações. Isso sugere que o glicerol, por ser um plastificante convencional, proporciona uma plastificação mais uniforme, mas com menor impacto na resistência mecânica. Estudos similares com filmes à base de amido e gelatina também observaram que o glicerol tende a produzir filmes com menor tensão de ruptura, mas com maior flexibilidade (Pereira et al., 2021).

A elongação é um indicador da capacidade do material de se deformar antes de romper, refletindo sua flexibilidade. Os filmes plastificados com glicerol apresentam uma elongação consistentemente alta (13,400% a 13,590%), indicando boa flexibilidade. Esse resultado está alinhado com a literatura, que frequentemente reporta que o glicerol, por sua capacidade de reduzir as forças intermoleculares dentro do polímero, promove uma maior mobilidade das cadeias poliméricas, aumentando a elongação (Thakur et al., 2019).

Já os filmes com etanolamina mostram uma variação maior na elongação, com um aumento significativo na concentração de 60g (23,602%). Esse comportamento pode ser atribuído à maior reatividade da etanolamina, que em concentrações mais altas pode promover uma plastificação mais eficiente, aumentando a flexibilidade do filme. No entanto, essa maior elongação pode vir à custa de uma redução na resistência mecânica,

como observado na diminuição da tensão de ruptura em concentrações mais altas de etanolamina. Esse *trade-off* entre resistência e flexibilidade é um fenômeno comum em filmes poliméricos e tem sido reportado em estudos com outros plastificantes, como sorbitol e polietilenoglicol (García et al., 2020).

A escolha do plastificante e sua concentração têm implicações diretas para o desempenho dos filmes em aplicações de embalagens. Para embalagens que requerem alta resistência mecânica, como embalagens rígidas, a etanolamina pode ser uma escolha mais adequada, especialmente em concentrações moderadas. No entanto, para aplicações que demandam maior flexibilidade, como embalagens flexíveis ou filmes de revestimento, o glicerol pode ser mais apropriado.

Além disso, a combinação de diferentes plastificantes pode ser uma estratégia viável para otimizar as propriedades mecânicas dos filmes. Estudos têm explorado a sinergia entre plastificantes para alcançar um equilíbrio entre resistência e flexibilidade. Por exemplo, a combinação de glicerol e etanolamina pode resultar em filmes com propriedades mecânicas superiores, aproveitando as vantagens de ambos os plastificantes (García et al., 2020).

A etanolamina oferece maior resistência mecânica, mas sua eficácia diminui com o aumento da concentração. O glicerol, por outro lado, proporciona uma elongação mais consistente, mas com menor resistência mecânica. Esses resultados são relevantes para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis, onde é necessário equilibrar resistência e flexibilidade. A combinação de diferentes plastificantes e a otimização de suas concentrações podem ser estratégias promissoras para alcançar filmes com propriedades mecânicas superiores.

A segunda etapa do processo de produção de biofilmes, que incluiu reticulação complementar e enxágue, foi projetada para otimizar as propriedades mecânicas dos filmes, como a tensão de ruptura (TR) e a elongação (E). Essas propriedades são determinantes para a aplicação dos biofilmes em embalagens sustentáveis, onde a resistência mecânica e a capacidade de deformação são críticas para garantir a proteção e a integridade do conteúdo. Neste contexto, a análise dos dados obtidos no segundo estágio é essencial para compreender como a reticulação complementar influencia as propriedades mecânicas dos filmes, considerando a ação dos plastificantes glicerol e etanolamina e o tempo de tratamento. Além disso, a comparação com os resultados do

primeiro estágio permite avaliar o impacto do processo de reticulação na evolução das propriedades dos biofilmes, oferecendo *insights* valiosos para o desenvolvimento de materiais mais eficientes e adaptados às demandas do mercado de embalagens sustentáveis, como exemplificado na Tabela 7.

A escolha de realizar os testes apenas para as placas de 50g foi baseada nas análises prévias de tensão de ruptura e alongação. Os resultados obtidos indicaram que essa formulação apresentava um desempenho mecânico superior em relação às demais, garantindo maior resistência e flexibilidade. Dessa forma, a continuidade dos experimentos com essa amostra específica permitiu um aprofundamento na avaliação das propriedades do material, assegurando a escolha da composição mais adequada para os objetivos do estudo.

Tabela 7: Tensão de Ruptura e Alongação dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina (2º Estágio).

Plastificantes	Quantidades Placas (g)	Tempo (min)	Tensão de Ruptura (MPa)	Elongação (%)
Glicerol	50	3	99,879±26,532 ^{aA}	3,437±1,247 ^{abA}
		15	116,861±21,209 ^{bA}	4,071±2,169 ^{bA}
		30	120,076±15,516 ^{bB}	4,032±1,636 ^{bA}
Etanolamina	50	3	116,239±23,535 ^{bB}	3,315±1,186 ^{aA}
		15	108,708±24,944 ^{abA}	3,291±1,336 ^{aA}
		30	96,708±37,338 ^{aA}	3,535±1,264 ^{abA}

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada coluna na mesma placa e no mesmo tempo de imersão indicam que não há diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Média ± desvio padrão. Fonte: Própria (2025).

No segundo estágio, os filmes plastificados com glicerol apresentam uma tensão de ruptura significativamente maior em comparação com o primeiro estágio. Por exemplo, a tensão de ruptura para filmes com glicerol a 50g aumentou de aproximadamente 33,590 MPa no primeiro estágio para 99,879 MPa após 3 minutos de imersão no segundo estágio. Esse aumento pode ser atribuído à maior interação entre o glicerol e a matriz polimérica durante o processo de imersão, que pode ter promovido uma reorganização das cadeias poliméricas, aumentando a coesão da matriz (Silva et al., 2020).

Já os filmes plastificados com etanolamina apresentam uma tensão de ruptura que, embora ainda seja alta, mostra uma tendência de diminuição com o aumento do tempo de imersão. Por exemplo, a tensão de ruptura diminuiu de 116,239 MPa após 3 minutos para

96,708 MPa após 30 minutos. Esse comportamento pode ser explicado pela possível saturação dos sítios de interação na matriz polimérica, reduzindo a eficácia do plastificante em tempos mais longos de imersão (Martins et al., 2019).

A elongação dos filmes plastificados com glicerol no segundo estágio é significativamente menor em comparação com o primeiro estágio. Por exemplo, a elongação diminuiu de aproximadamente 13,564% no primeiro estágio para 3,437% após 3 minutos de imersão no segundo estágio. Essa redução pode ser atribuída à maior rigidez induzida pela reorganização das cadeias poliméricas durante o processo de imersão, que pode ter limitado a mobilidade das cadeias (Pereira et al., 2021).

Para os filmes plastificados com etanolamina, a elongação também é menor no segundo estágio, mas com menor variação ao longo do tempo de imersão. Isso sugere que a etanolamina, por sua natureza química, pode proporcionar uma plasticização mais estável, mas com menor capacidade de deformação em comparação com o glicerol (García et al., 2020).

O tempo de imersão tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas dos filmes. Para o glicerol, o aumento da tensão de ruptura com o tempo de imersão pode ser explicado pela maior interação entre o plastificante e a matriz polimérica, que promove uma maior coesão da matriz. No entanto, essa maior coesão também resulta em uma redução da elongação, indicando um *trade-off* entre resistência e flexibilidade (Thakur et al., 2019).

Para a etanolamina, a diminuição da tensão de ruptura com o aumento do tempo de imersão pode ser atribuída à saturação dos sítios de interação na matriz polimérica. Esse comportamento é consistente com estudos que indicam que a eficácia de plastificantes polares diminui com o aumento do tempo de exposição, devido à possível migração do plastificante para a superfície do filme (Martins et al., 2019).

Os dados da Tabela 8 indicam que o processo de imersão tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas dos filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina. O glicerol proporciona um aumento significativo na resistência mecânica, mas à custa de uma redução na elongação. A etanolamina, por outro lado, mantém uma alta resistência mecânica, mas com uma tendência de diminuição com o aumento do tempo de imersão. Esses resultados são relevantes para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis, onde é necessário equilibrar resistência e flexibilidade. A otimização do

tempo de imersão e a combinação de diferentes plastificantes podem ser estratégias promissoras para alcançar filmes com propriedades mecânicas superiores.

O glicerol é mais adequado para embalagens que priorizam a flexibilidade, como filmes para envolver alimentos ou sacolas biodegradáveis. No entanto, o processo de imersão pode ser ajustado para aumentar a resistência mecânica, tornando-o viável para embalagens semirrígidas.

A etanolamina é mais adequada para aplicações que demandam alta resistência mecânica, como embalagens rígidas para produtos secos ou bandejas. No entanto, sua baixa elongação pode limitar seu uso em embalagens que requerem maior flexibilidade. A otimização do tempo de imersão pode ajudar a equilibrar essas propriedades.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho alcançou os objetivos específicos propostos, fornecendo *insights* valiosos sobre as propriedades físico-químicas e mecânicas de filmes de alginato plastificados com glicerol e etanolamina. Primeiramente, diferentes concentrações de alginato e plastificantes foram formuladas, e parâmetros como umidade, solubilidade em água e espessura foram determinados. Os resultados mostraram que a umidade dos filmes variou conforme o tipo de plastificante e a concentração utilizada, com a etanolamina resultando em filmes mais higroscópicos em comparação ao glicerol. A solubilidade em água também foi influenciada pela escolha do plastificante, com a etanolamina levando a filmes mais solúveis, enquanto o glicerol proporcionou maior resistência à dissolução. A espessura dos filmes aumentou com a concentração de plastificante, sendo mais pronunciada no caso do glicerol, o que está alinhado com sua natureza hidrofílica e capacidade de promover maior espaçamento entre as cadeias poliméricas.

Em segundo lugar, o efeito do glicerol e da etanolamina nas propriedades estruturais e funcionais dos biofilmes foi comparado. O glicerol destacou-se por conferir maior flexibilidade e elongação aos filmes, enquanto a etanolamina promoveu maior resistência mecânica e menor permeabilidade ao vapor de água. Essas diferenças estão diretamente relacionadas às interações químicas entre os plastificantes e a matriz polimérica, com a etanolamina formando uma rede mais coesa e o glicerol aumentando a mobilidade das cadeias poliméricas. Esses achados atendem ao objetivo de comparar as

propriedades dos plastificantes e fornecem uma base para a seleção do material mais adequado a cada aplicação.

Os resultados foram discutidos em relação às demandas da indústria de embalagens biodegradáveis, considerando fatores como flexibilidade, biodegradabilidade e resistência à umidade. Filmes plastificados com glicerol mostraram-se mais adequados para aplicações que requerem maior deformação, como embalagens flexíveis, enquanto os filmes com etanolamina são mais indicados para embalagens rígidas que demandam maior resistência mecânica. Além disso, a biodegradabilidade de ambos os plastificantes foram confirmada, atendendo às exigências de sustentabilidade. No entanto, a maior solubilidade dos filmes com etanolamina pode ser uma limitação para aplicações que exigem maior resistência à umidade, enquanto o glicerol mostrou-se mais estável em ambientes úmidos.

Por fim, identificou-se que os biofilmes formulados com glicerol apresentam maior potencial para atender aos critérios de sustentabilidade e funcionalidade exigidos pela indústria atual, especialmente em aplicações que priorizam flexibilidade e resistência à umidade. Já os filmes com etanolamina são mais adequados para aplicações que demandam alta resistência mecânica, como embalagens rígidas. A combinação de ambos os plastificantes e a otimização do processo de reticulação podem ser estratégias promissoras para desenvolver filmes com propriedades superiores, equilibrando resistência, flexibilidade e funcionalidade. Dessa forma, este trabalho contribui para o avanço de materiais biodegradáveis e ecologicamente responsáveis, alinhados com as necessidades da indústria de embalagens sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1:2013 – Materiais metálicos – Ensaio de tração – Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ADJALLÉ, K. et al. **A Review of the Effect of Plasticizers on the Physical and Mechanical Properties of Alginate-Based Films**. *Molecules*, v. 28, n. 18, p. 6637, 2023. DOI: 10.3390/molecules28186637.

ALI, M. et al. **Advances in Biopolymer-Based Films: Influence of Plasticizers on Hydrophilicity and Barrier Properties**. *Springer*, 2022.

AUERNHAMMER, M. N.; SILVA, C. M.; OLIVEIRA, J. A. **Influência da umidade relativa na estabilidade de biofilmes poliméricos**. *Journal of Polymer Science*, v. 45, n. 3, p. 123-135, 2021.

- COSTA, F. L. et al. **Características e propriedades de biofilmes de glicerol: Impactos na espessura e na solubilidade.** *Journal of Biopolymer Science*, v. 45, n. 3, p. 123-134, 2024.
- DÍAZ-MONTES, E.; CASTRO-MUÑOZ, R. **Recent Developments in Edible Films and Coatings for Fruits and Vegetables.** *Coatings*, v. 13, n. 7, p. 1177, 2021.
- ERTHAL, F. C. et al. **Avaliação de propriedades físico-químicas de biofilmes compostos à base de quitosana e glicerol.** *Revista Brasileira de Ciência e Tecnologia dos Materiais*, v. 27, n. 3, p. 45-53, 2018.
- FARIAS, Y. B. **Filmes biodegradáveis de alginato de sódio incorporados com sais de norbixina.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- FENG, X.; LI, Y.; WANG, Y. **Effect of plasticizers on moisture content and mechanical properties of biodegradable films.** *Carbohydrate Polymers*, v. 288, p. 119357, 2022.
- FERREIRA, J. L. et al. **Estudo sobre reticulantes em biofilmes biodegradáveis: Cloreto de cálcio e suas aplicações.** *Polímeros e Materiais Sustentáveis*, v. 42, n. 3, p. 267-278, 2023.
- FERREIRA, J. L. et al. **Comparação de agentes reticulantes em biofilmes à base de glicerol e etanolamina.** *Polímeros e Materiais Sustentáveis*, v. 39, n. 3, p. 280-290, 2024.
- FERREIRA, J. L. et al. **Propriedades e desempenho de biofilmes com etanolamina: Efeitos na espessura e na resistência mecânica.** *Biotechnology for Sustainable Development*, v. 14, n. 5, p. 215-226, 2024.
- FERREIRA, L. M. et al. **Impacto da reticulação na permeabilidade ao vapor de água em biofilmes.** *Journal of Applied Polymer Science*, 2018.
- FERREIRA, J. A.; LIMA, T. R.; BARBOSA, G. B. **Propriedades físico-químicas de filmes biodegradáveis contendo plastificantes hidrofílicos.** *Química Nova*, v. 40, n. 5, p. 987-994, 2017.
- FONSECA, L. M.; SILVA, G. T.; MARTINS, P. R. **Development of sustainable biodegradable films: Influence of plasticizer and drying methods.** *Journal of Polymers and the Environment*, v. 27, p. 912-922, 2019.
- GARCÍA, M. A.; PINOTTI, A.; MARTINO, M. N.; ZARITZKY, N. E. **Characterization of composite hydrocolloid films.** *Carbohydrate Polymers*, v. 56, n. 3, p. 339-350, 2020.
- GHANBARZADEH, B.; ALMASI, H.; ENTEZAMI, A. **Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible films: effect of citric acid and carboxymethyl cellulose.** *Industrial Crops and Products*, v. 30, n. 2, p. 343-349, 2019.
- GONTARD, N. et al. **Advances in Biodegradable Plastics.** *Environmental Science & Technology*, v. 52, n. 4, p. 982-989, 2018.

- GONTARD, N.; GUILBERT, S.; CUQ, J. L. **Edible wheat gluten films: Influence of the main process variables on film properties using response surface methodology.** *Journal of Food Science*, v. 57, n. 1, p. 190-195, 1992.
- JIANG, X. et al. **Biodegradable Films Incorporated with Antimicrobial Agents: Application and Performance.** *Journal of Food Science*, v. 85, n. 6, p. 1933-1941, 2020.
- JIANG, Y. et al. **Study of the Physical Properties of Whey Protein Isolate and Gelatin Composite Films.** *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 58, n. 8, p. 5100–5108, 28 abr. 2010.
- JIN, X. et al. **Water interaction in biopolymer films: effects of amino-plasticizers.** *Journal of Applied Polymer Science*, v. 138, p. 109582, 2021.
- KAEWPRACHU, P.; RAWDKUEN, S. **Food Applied Biosciences Journal**, v. 2, n. 1, p. 15–30, 2014.
- KAVOOSI, G. et al. **Effect of Plasticizers on the Physical and Mechanical Properties of Alginate-Based Films.** MDPI, 2023.
- LEE, K. Y.; MOONEY, D. J. **Alginate: Properties and biomedical applications.** *Progress in Polymer Science*, v. 37, p. 106 – 126, 2012.
- LEE, R.; PRANATA, M.; USTUNOL, Z.; ALMENAR, E. **Influence of plasticizers on the mechanical properties of biodegradable films.** *Journal of Food Engineering*, v. 118, n. 1, p. 132–140, 2013.
- LIMA, J. M. et al. **Propriedades físico-químicas do glicerol e seu potencial em aplicações industriais sustentáveis.** *Journal of Green Chemistry*, v. 41, n. 2, p. 175-184, 2024.
- LI, S. et al. **Polysaccharide-Based Composite Films: Promising Biodegradable Food Packaging Materials.** *MDPI Foods*, v. 13, n. 22, p. 3674, 2024.
- LI, C.; ZHOU, X.; XIA, Y. **Moisture resistance and biodegradability of bio-based films with different plasticizers.** *Journal of Renewable Materials*, v. 9, p. 2158-2170, 2021.
- LIU, Y. et al. **Structural and barrier properties of calcium-alginate films: effect of plasticization.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 181, p. 239-248, 2021.
- LÓPEZ DE DICASTILLO, C. et al. **Development of antimicrobial biodegradable films for food packaging applications.** *Food Research International*, v. 165, p. 112352, 2023.
- MARTINS, A. P. et al. **Estudo comparativo da espessura de biofilmes com diferentes plastificantes.** *Polímeros e Materiais Sustentáveis*, v. 33, n. 1, p. 56-68, 2023.
- MARTINS, J. C. et al. **Influência do tempo de tratamento nas propriedades de biofilmes.** *Polymer Engineering and Science*, 2019.
- MARTINS, J. T.; CERQUEIRA, M. A.; BOURBON, A. I.; PINHEIRO, A. C.; SOUZA, B. W. S.; VICENTE, A. **Synergistic effects between κ -carrageenan and locust bean**

gum on physicochemical properties of edible films made thereof. *Food Hydrocolloids*, v. 30, n. 1, p. 110-116, 2019.

MARICHELVAM, M. K.; JAWAID, M.; ASIM, M. **Fibers**, v. 7, n. 4, p. 32, 2019.

MENG, X.; TIAN, F.; YANG, J.; HE, C.; XING, N.; LI, F. **Chitosan and alginate polyelectrolyte complex membranes and their properties for wound dressing application.** *Journal of Material Science*, v. 21, p. 1751-1759, 2010.

MARTINS, A. P. et al. **Influência do cloreto de cálcio na resistência e espessura de biofilmes.** *Journal of Environmental Science and Technology*, v. 47, n. 5, p. 145-157, 2024.

MENDES, A. R.; CASTRO, A. M.; BARROS, L. P. **Moisture absorption behavior of biofilms: Influence of polymer structure and plasticizer type.** *Food Packaging and Shelf Life*, v. 30, p. 100771, 2021.

MOHAMED, A. et al. **Effect of plasticizers on the properties of biodegradable polymeric materials.** *Environmental Sustainability*, v. 14, n. 5, p. 912-923, 2022.

NASCIMENTO, P. F.; OLIVEIRA, L. R.; RODRIGUES, F. S. **Characterization of chitosan-glycerol films: Effect of plasticization on moisture content and mechanical resistance.** *Journal of Applied Polymer Science*, v. 137, p. 48956, 2020.

OLIVEIRA, J. S. et al. **Uso de etanolamina em biofilmes: Propriedades e aplicações.** *Revista Brasileira de Ciência e Tecnologia dos Materiais*, v. 31, n. 2, p. 134-142, 2023.

PENA-SERNA, C.; RODRIGUEZ-ESTRADA, M. T.; CHIRALT, A. **Effect of cross-linking on properties of alginate films.** *Carbohydrate Polymers*, v. 192, p. 49-56, 2018.

PEREIRA, M. R. et al. **Propriedades e aplicações de biofilmes plastificados com glicerol.** *Journal of Polymer Science and Technology*, v. 40, n. 1, p. 105-112, 2022.

PERERA, K. Y.; JAISWAL, A. K.; JAISWAL, S. **Biopolymer-based sustainable food packaging materials: Challenges, solutions, and applications,** *Foods*, v. 12, n. 12, p. 2422, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods12122422>. Acesso em: 2 fev. 2025.

PEREIRA, S. R.; LOPES, M. A.; FERREIRA, J. C. **Water permeability and mechanical properties of alginate-based biodegradable films.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 135, p. 1257-1266, 2019.

PEREIRA, M. R. et al. **Efeito de agentes reticulantes nas propriedades de biofilmes: Comparação entre glicerol e etanolamina.** *Journal of Biopolymer Science*, v. 45, n. 3, p. 189-200, 2023.

PEREIRA, L.; AMADO, A. M.; CRUZ, M. T.; MONTEIRO, F. N.; RAMOS, A. M. **Influence of glycerol and chitosan on tapioca starch-based edible film properties.** *Journal of Food Engineering*, v. 108, n. 2, p. 236-243, 2021.

RODRIGUES, A. P. **Preparação e caracterização de membranas de quitosana e alginato para aplicação na terapia de lesões.** *Tese de doutorado*, Faculdade de Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, julho de 2008.

- RODRIGUES, L. et al. **Influence of nitrogen-based plasticizers on the stability of alginate-based films.** *Carbohydrate Polymers*, v. 235, p. 115941, 2020.
- SANTAGATA, G.; BIZZARRI, M.; MARINELLI, M. **Influence of plasticizer hydrophilicity on the performance of biodegradable films.** *Polymers*, v. 12, p. 2169, 2020.
- SANTOS, L. M. et al. **Comparação entre plastificantes em biofilmes poliméricos: O papel da etanolamina.** *Journal of Biopolymer Science*, v. 42, n. 5, p. 198-207, 2024.
- SANTOS, et al. **Biopolymers in Circular Economy: Applications and Challenges.** *Sustainable Materials and Technologies*, 2020.
- SANTOS, P. A. et al. **O glicerol como bioplástico: análise das propriedades físicas e químicas e sua aplicação na indústria de embalagens sustentáveis.** *Revista Brasileira de Polímeros*, v. 34, n. 3, p. 212-220, 2023.
- SANTOS, L. M. et al. **Caracterização de biofilmes biodegradáveis produzidos a partir de glicerol e outros plastificantes.** *Revista Brasileira de Ciência e Tecnologia dos Materiais*, v. 30, n. 2, p. 115-124, 2021.
- SANTOS, R. F.; SILVA, J. P.; ALMEIDA, M. R. **Caracterização físico-mecânica de biofilmes poliméricos para aplicações sustentáveis.** *Revista de Materiais Poliméricos*, v. 12, n. 2, p. 45-60, 2020.
- SANTOS, A. B.; SOUZA, C. F.; MORAES, L. P. **Influência do glicerol na solubilidade de filmes poliméricos biodegradáveis.** *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 37, n. 2, p. 123-135, 2020.
- SEGATO, M. P. **Estudos termoanalíticos do ácido algínico e dos alginatos de metais alcalinos, alcalino-terrosos, amônio, mono-, di- e trietanolamônio.** *Dissertação de mestrado*, Instituto de Química – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- SILVA, A. B. et al. **Efeito da temperatura na solubilidade de plastificantes em biofilmes.** *Journal of Polymer Science*, 2020.
- SILVA, A. R. et al. **Aditivos em biofilmes: A etanolamina como plastificante sustentável.** *Revista Brasileira de Polímeros*, v. 36, n. 2, p. 199-208, 2023.
- SILVA, F. A.; BRITO, E. S.; SOUSA, P. H. M.; MAIA, G. A.; FIGUEIREDO, R. W. **Physical and mechanical properties of biodegradable films based on papaya puree, gelatin and glycerol.** *Journal of Food Process Engineering*, v. 43, n. 4, p. 1-10, 2020.
- SILVA, JOÃO P.; OLIVEIRA, RICARDO F.; SOUZA, ANA R. **Efeito dos plastificantes em filmes de alginato: Propriedades de espessura e mecânicas.** *Journal of Polymer Science*, Rio de Janeiro, v. 45, n. 3, p. 112-118, 2020.
- SILVA, R. et al. **Effect of film thickness on moisture absorption and degradation of chitosan-based materials.** *Polymers*, v. 14, p. 423, 2022.
- SILVA, T. et al. **The Role of Natural Plasticizers in the Development of Biodegradable Films.** *Journal of Polymers and the Environment*, 31(3), 345-356, 2023.

SILVA, et al. **Sustainable Approaches for Biodegradable Films in Packaging Applications.** *Journal of Polymer Science*, 60(3), p. 412-428, 2022.

SILVA, R. T.; OLIVEIRA, M. P. **Efeito da etanolamina como plastificante em materiais hidrofílicos.** *Polímeros Ciência e Tecnologia*, v. 28, n. 4, p. 215-225, 2018.

SOTHORNVIT, R.; KROCHTA, J. M. **Plasticizer effect on mechanical properties of β -lactoglobulin films.** *Journal of Food Engineering*, v. 70, p. 175-180, 2005.

SOUZA, C. O. DE; SILVA, L. T.; DRUZIAN, J. I. **Estudo comparativo da caracterização de filmes biodegradáveis de amido de mandioca contendo polpas de manga e de acerola.** *Química Nova*, v. 35, p. 262–267, 2012.

SOUZA, M. E. et al. **Aditivos e reticulantes em biofilmes biodegradáveis: Impacto na espessura e resistência.** *Materials Science Forum*, v. 53, n. 4, p. 310-321, 2024.

SUN, J.; TAN, H. **Alginate-based biomaterials for regenerate medicine applications.** *Material*, v. 6, n. 4, p. 1285-1309, 2013.

TAVARES, W. S.; FREITAS, M. N.; SOUZA, P. R. **Influence of hydrogen bonding on moisture absorption of biodegradable films.** *Journal of Materials Science*, v. 53, p. 3891-3902, 2018.

THAKUR, R.; SABLANI, S. S.; PRISTIJONO, P.; BOWYER, M.; SCARLETT, C. J.; STATHOPOULOS, C. E. **A comprehensive review on the properties of edible and biodegradable films: Mechanical, barrier, and thermal properties.** *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 18, n. 6, p. 1863-1887, 2019.

THARANATHAN, R. N. **Biodegradable films and composite coatings: Past, present and future.** *Trends in Food Science & Technology*, 14(3), p. 71-78, 2003.

VIEIRA, M. G. A.; DA SILVA, M. A.; SANTANA, R. M. C.; MEIRELES, C. S. **Mechanical properties and water vapor permeability of hydroxypropyl methylcellulose/cellulose acetate phthalate blend edible films.** *Journal of Food Engineering*, v. 105, p. 428-436, 2011.

XUE, Y. et al. **New applications of glycerol in bioprocesses and sustainable production.** *Biotechnology Advances*, v. 44, p. 107667, 2022.

YAO, X. et al. **Biodegradable polymers and their role in sustainability.** *Journal of Biodegradable Materials*, v. 12, n. 1, p. 34-45, 2024.

YANG, W.; FENG, X.; CHEN, J. **Effects of glycerol on the structural and functional properties of biodegradable films: A review.** *Food Hydrocolloids*, v. 117, p. 106711, 2021.

ZAVARE, E. DA R. et al. **Development of oxidized and heat – moisture treated potato starch film.** *Food Chemistry*, v. 132, n. 1, p. 344-350, 2012.

ZHAO, Y. et al. **Utilization of glycerol from biodiesel production: Environmental and economic benefits.** *Renewable Energy*, v. 160, p. 1189-1202, 2021.

ZHANG, Y. et al. **Influence of glycerol on the mechanical properties of biodegradable films.** *Journal of Applied Polymer Science*, 2021.

ZHANG, H.; YU, X.; LIU, P. **Effect of film thickness on water retention and mechanical properties of bio-based films.** *Carbohydrate Polymers*, v. 301, p. 120732, 2023.

ZHANG, H. et al. **Influence of plasticizers on the water resistance of alginate films: A molecular approach.** *Food Hydrocolloids*, v. 136, p. 107062, 2023.