



**HELENA VICTÓRIA ARAUJO SOARES**

**CARACTERIZAÇÃO DE BIOPOLÍMEROS DE ALGINATO  
DE SÓDIO PLASTIFICADOS COM GLICEROL  
E SORBITOL COM DUPLA RETICULAÇÃO UTILIZANDO  
CLORETO DE CÁLCIO**

**HELENA VICTÓRIA ARAUJO SOARES**

**CARACTERIZAÇÃO DE BIOPOLÍMEROS DE ALGINATO  
DE SÓDIO PLASTIFICADOS COM GLICEROL  
E SORBITOL COM DUPLA RETICULAÇÃO UTILIZANDO  
CLORETO DE CÁLCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Colegiado de Curso da Engenharia Química  
do Centro de Ciências 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

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Soares, Helena Victória Araujo.

Caracterização de Biopolímeros de Alginato de Sódio  
Plastificados com Glicerol e Sorbitol com Dupla  
Reticulação Utilizando Cloreto de Cálcio / Helena Victória  
Araujo Soares. - 2025.

52 f.

Orientador(a): Audirene Amorim Santana.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química,  
Universidade Federal do Maranhão, São Luís - Ma, 2025.

1. Biopolímero. 2. Biodegradável. 3. Alginato. 4.  
Glicerol. 5. Sorbitol. I. Santana, Audirene Amorim. II.  
Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

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

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO PERREIRA RODRIGUES  
DEEQ/CCET/UFMA

Mestre CASI SANTOS DOS SANTOS  
RENORBIO/CCBS/UFMA

**20 de fevereiro de 2025**

**DADOS CURRICULARES****HELENA VICTÓRIA ARAUJO SOARES****NASCIMENTO** 05/10/1999 – SÃO JOÃO BATISTA / MA**FILIAÇÃO** Carlos Henrique Costa Soares  
Plácida Deusélia Araujo Soares**2013/2018** Curso de Graduação  
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, ao  
meu amado Silas e à Helena de 15 anos!*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela dádiva da minha vida e por ter me dado pessoas a quem agradecer. Força e graça que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Carlos e Plácida, cujo apoio incondicional e incentivo foram fundamentais em todos os momentos. Agradeço por serem fontes constantes de inspiração e por compartilharem comigo a alegria das conquistas e a superação dos desafios. Obrigada Senhor, por me agraciar com pais maravilhosos.

Irmãos, Mateus e Carlos Emanuel, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo suporte emocional e compreensão durante todo o percurso acadêmico. Fizeram e fazem os meus dias os melhores!

A minha amiga de longa data, Stefany, cuja amizade é um pilar sólido em minha vida. Seu apoio constante, presença nos momentos alegres e difíceis foram inestimáveis. Agradeço por ser uma fonte de companheirismo.

À minha amiga de faculdade, Ana Caroline, cuja parceria e colaboração foram essenciais. Juntas, enfrentamos desafios acadêmicos, celebramos conquistas e compartilhamos aprendizados valiosos. Agradeço por essa jornada enriquecedora que trilhamos juntas.

A minha profunda gratidão ao meu marido, Silas Pacheco Jr. Seu amor, paciência e compreensão foram a âncora que sustentou minha jornada acadêmica. Agradeço por estar ao meu lado, compartilhando não apenas as alegrias, mas também as dificuldades, tornando cada desafio mais leve. Te amaria em qualquer universo possível!

Agradeço a minha orientadora Audirene Amorim Santana pelo suporte prestado em todo o desenvolvimento do trabalho.

A todos vocês, minha mais profunda gratidão. Este trabalho é não apenas meu, mas também um reflexo do apoio e amor que recebi ao longo dessa jornada. Muito obrigada!

*“Mas, em todas as coisas somos mais que vencedores, por meio daquele que nos amou. Pois estou convencido de que nem a morte nem a vida, nem anjos nem demônios, nem o presente nem o futuro, nem quaisquer poderes, nem altura nem profundidade, nem qualquer outra coisa na criação será capaz de nos separar do amor de Deus que está em Cristo Jesus, nosso Senhor.”*

*Romanos: 08: 37-39.*

SOARES, H.V.A. **Caracterização de biopolímeros de alginato de sódio plastificados com glicerol e sorbitol com dupla reticulação utilizando cloreto de cálcio**. 2025. 52 folhas. 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 tem gerado sérios problema ambientais devido a sua lenta degradação no ambiente, tornando essencial a busca por alternativas sustentáveis para contornais tais problemas. Nesse contexto, há um grande interesse no desenvolvimento de materiais biodegradáveis, como os filmes à base de alginato de sódio, com intuito de reduzir o acúmulo de resíduos plásticos na natureza. Este trabalho objetiva avaliar o comportamento de filmes de alginato de sódio, utilizando glicerol e sorbitol como plastificantes, testando três variações de massa filmogênica (40 g, 50 g e 60 g) e analisar os efeitos da reticulação complementar com solução de cloreto de cálcio (3%) em três tempos de imersão (3 min, 15 min e 30 min) nas caracterizações desses filmes. Os resultados mostraram que o plastificante impacta diretamente as propriedades dos filmes: os plastificados com sorbitol apresentaram menor solubilidade e permeabilidade ao vapor de água, conferindo maior estabilidade estrutural, enquanto os plastificados com glicerol apresentaram maior flexibilidade e alongação. A reticulação complementar reduziu a solubilidade dos filmes, tornando-os mais compactos, e tempos prolongados de imersão (15 e 30 min) diminuíram sua flexibilidade. Filmes com glicerol demonstraram maior flexibilidade enquanto filmes com sorbitol apresentam filmes mais rígidos, destacando a importância da seleção dos parâmetros conforme a aplicação desejada.

**Palavras-chave:** Biopolímero, Biodegradável, Alginato, Glicerol, Sorbitol

SOARES, H. V.A. **Characterization of sodium alginate biopolymers plasticized with glycerol and sorbitol with double crosslinking using calcium chloride**. 2025. 52 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) - Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

### ABSTRACT

The excessive use of plastic packaging has generated serious environmental problems due to its slow degradation in the environment, making it essential to search for sustainable alternatives to overcome such problems. In this context, there is great interest in the development of biodegradable materials, such as sodium alginate-based films, in order to reduce the accumulation of plastic waste in nature. This work aims to evaluate the behavior of sodium alginate films, using glycerol and sorbitol as plasticizers, testing three variations of film-forming mass (40 g, 50 g and 60 g) and analyzing the effects of complementary crosslinking with calcium chloride solution (3%) in three immersion times (3 min, 15 min and 30 min) on the characterization of these films. The results showed that the plasticizer directly impacts the properties of the films: those plasticized with sorbitol presented lower solubility and permeability to water vapor, conferring greater structural stability, while those plasticized with glycerol presented greater flexibility and elongation. Complementary crosslinking reduced the solubility of the films, making them more compact, and prolonged immersion times (15 and 30 min) decreased their flexibility. Films with glycerol demonstrated greater flexibility, while films with sorbitol presented more rigid films, highlighting the importance of selecting the parameters according to the desired application.

**Keywords:** Biopolymer, Biodegradable, Alginate, Glycerol, Sorbitol

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> – Estrutura da molécula do alginato.....                                                                                      | 6  |
| <b>Figura 2</b> – Fórmula estrutural do glicerol.....                                                                                         | 8  |
| <b>Figura 3</b> – Fórmula estrutural do sorbitol.....                                                                                         | 8  |
| <b>Figura 4</b> – (a) Estrutura química em blocos G do gel de alginato. (b) Representação esquemática da estrutura tipo “caixa de ovos” ..... | 11 |
| <b>Figura 5</b> – Balança semi-analítica (modelo UA420, URANO, Brasil).....                                                                   | 15 |
| <b>Figura 6</b> – Agitador Mecânico (modelo 752, FISATOM, Brasil).....                                                                        | 15 |
| <b>Figura 7</b> – Agitador Magnético com aquecimento (modelo 752, FISATOM, Brasil).....                                                       | 16 |
| <b>Figura 8</b> – Micrômetro externo (modelo MDC-25S, CARBOGRAFITE, Japão).....                                                               | 16 |
| <b>Figura 9</b> – Mesa agitadora orbital Tecnal, modelo TE-145, Brasil .....                                                                  | 16 |
| <b>Figura 10</b> – Fluxograma da confecção de filmes de alginato.....                                                                         | 17 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> – Propriedades do glicerol e sorbitol. ....                                                                                            | 9  |
| <b>Tabela 2</b> – Conteúdo de umidade ( $\omega$ ) e solubilidade em água (S) no 1º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol. .... | 22 |
| <b>Tabela 3</b> – Conteúdo de umidade e solubilidade em água no 2º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol. ....                  | 24 |
| <b>Tabela 4</b> – Espessura e permeabilidade ao vapor de água no 1º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol.. ....                | 25 |
| <b>Tabela 5</b> – Espessura e permeabilidade ao vapor de água no 2º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol. ....                 | 28 |
| <b>Tabela 6</b> – Tensão na ruptura e alongamento na ruptura no 1º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol. ....                  | 30 |
| <b>Tabela 7</b> – Tensão na ruptura e alongamento na ruptura no 2º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol .....                  | 31 |

## SUMÁRIO

|            |                                            |           |
|------------|--------------------------------------------|-----------|
|            | FOLHA DE APROVAÇÃO.....                    | ii        |
|            | DADOS CURRICULARES.....                    | iii       |
|            | DEDICATÓRIA.....                           | iv        |
|            | AGRADECIMENTOS.....                        | v         |
|            | EPÍGRAFE.....                              | vi        |
|            | RESUMO.....                                | vii       |
|            | ABSTRACT.....                              | viii      |
|            | LISTA DE FIGURAS.....                      | ix        |
|            | LISTA DE TABELAS.....                      | x         |
|            | SUMÁRIO.....                               | xi        |
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                     | <b>1</b>  |
| <b>2</b>   | <b>OBJETIVOS.....</b>                      | <b>3</b>  |
| 2.1        | Objetivos gerais.....                      | 3         |
| 2.2        | Objetivos específicos.....                 | 3         |
| <b>3</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>          | <b>4</b>  |
| <b>3.1</b> | <b>Biopolímeros.....</b>                   | <b>4</b>  |
| <b>3.2</b> | <b>Alginato de Sódio.....</b>              | <b>6</b>  |
| <b>3.3</b> | <b>Agentes Plastificantes.....</b>         | <b>7</b>  |
| 3.3.1      | Glicerol e Sorbitol.....                   | 7         |
| <b>3.4</b> | <b>Reticulante.....</b>                    | <b>10</b> |
| 3.4.1      | Cloreto de Cálcio.....                     | 10        |
| <b>3.5</b> | <b>Caracterização dos filmes.....</b>      | <b>11</b> |
| 3.5.1      | Conteúdo de Umidade.....                   | 12        |
| 3.5.2      | Solubilidade em Água.....                  | 12        |
| 3.5.3      | Espessura.....                             | 13        |
| 3.5.4      | Permeabilidade ao Vapor de Água (PVA)..... | 13        |
| 3.5.5      | Tensão e Elongação.....                    | 13        |
| <b>4</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>             | <b>14</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Material.....</b>                       | <b>14</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Local de pesquisa.....</b>              | <b>14</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Formulações Filmogênicas.....</b>       | <b>14</b> |

|            |                                                         |           |
|------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.4</b> | <b>Instrumentos Utilizados.....</b>                     | <b>14</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Metodologia Experimental.....</b>                    | <b>17</b> |
| 4.5.1      | Elaboração dos Biopolímeros.....                        | 17        |
| 4.5.2      | Processo de confecção dos biopolímeros.....             | 18        |
| <b>4.6</b> | <b>Caracterização dos Biopolímeros.....</b>             | <b>19</b> |
| 4.6.1      | Conteúdo de Umidade.....                                | 19        |
| 4.6.2      | Solubilidade em Água.....                               | 19        |
| 4.6.3      | Espessura.....                                          | 20        |
| 4.6.4      | Permeabilidade ao vapor de água (PVA).....              | 20        |
| 4.6.6      | Propriedades mecânicas.....                             | 21        |
| <b>4.7</b> | <b>Análise Estatística.....</b>                         | <b>21</b> |
| <b>5</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                      | <b>22</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Conteúdo de umidade e solubilidade em água.....</b>  | <b>22</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Espessura e permeabilidade ao vapor de água.....</b> | <b>25</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Propriedades Mecânicas.....</b>                      | <b>29</b> |
| <b>6</b>   | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                   | <b>32</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                 | <b>33</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Amplamente utilizada na indústria global, os plásticos derivados de petróleo têm levado a uma crise ambiental expressiva devido a sua persistência no meio ambiente e à sua dificuldade de degradação. Segundo a Oceana Brasil (2024), cerca de 11 milhões de toneladas de plástico são descartadas nos mares anualmente, representando 85% do lixo marinho. No Brasil, esse número chega a 1,3 milhão de toneladas, colocando o país entre os dez maiores poluidores globais. Além dos impactos na fauna e flora marinhas, microplásticos já foram detectados em órgãos vitais humanos, como pulmões, coração e cérebro, além de estarem presentes no sangue e no leite materno. Esses resíduos comprometem não apenas os ecossistemas aquáticos, mas também solos, rios e a saúde humana, reforçando a necessidade de alternativas sustentáveis como possível solução para esse problema.

Novos padrões de consumo estão surgindo como resposta a este problema crescente, há um empenho contínuo por alternativas que possam reduzir a dependência de plásticos convencionais e reduzir seu impacto ambiental. A substituição dos plásticos sintéticos por materiais biodegradáveis surge como uma solução promissora, que pode aliviar os efeitos prejudiciais dos resíduos plásticos. Nesse contexto diversos setores, como por exemplo, o alimentício e o farmacêutico, têm investido na pesquisa e no desenvolvimento de materiais sustentáveis, que não apenas limitam-se às necessidades funcionais, mas também forneçam benefícios ambientais ao serem capazes de se decompor de forma segura e eficiente após seu uso (SHEN et al, 2020; ZHANG et al, 2022).

Impulsionado pela demanda por soluções sustentáveis e pela legislação ambiental mais rigorosa em diversos países, o mercado de biopolímeros tem mostrado crescimento significativo nos últimos anos, devido à sua versatilidade, biodegradabilidade e segurança ambiental.

Os benefícios dos biopolímeros incluem sua capacidade de proteger alimentos contra umidade e contaminantes, melhorar a qualidade e a segurança dos produtos embalados, além de reduzir o desperdício e a pegada de carbono associada à produção de plásticos convencionais. Eles são materiais formados por polímeros naturais, como proteínas, polissacarídeos e lipídios, que podem ser utilizados como embalagens, revestimentos e outros produtos funcionais (ARAFAT et al, 2021; FARHAN e HANI, 2020).

A formação dos biofilmes ocorre na presença de macromoléculas que envolve a criação de uma matriz polimérica. Essa matriz é responsável por conferir estrutura e

estabilidade ao material, sendo composta por polímeros que interagem entre si para formar uma rede tridimensional. O alginato de sódio, é um dos polímeros mais propícios para a produção de biofilmes, ele é amplamente utilizado devido às suas propriedades gelificantes e filmogênicas, formando filmes com boa resistência mecânica e permeabilidade ao vapor de água (COSTA et al, 2018).

Plastificantes são adicionados a produção para melhorar as propriedades do produto proporcionando maior flexibilidade e redução da fragilidade dos filmes. Dentre os plastificantes mais utilizados, destacam-se o glicerol e o sorbitol, que, devido às suas características hidrofílicas, interagem com a matriz polimérica, afetando diretamente as propriedades finais dos biofilmes, como a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a permeabilidade (SANYANG et al, 2016).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito dos plastificantes glicerol e sorbitol nas propriedades dos biofilmes de alginato de sódio, considerando a influência da pré-reticulação e da reticulação complementar. A reticulação complementar será realizada por imersão dos filmes em solução de cloreto de cálcio com tempos de 3, 10 e 15 minutos. Além disso, serão analisadas as diferentes massas das soluções filmogênicas, de 40g, 50g e 60g, aplicadas nas duas etapas de reticulação. A partir dessa abordagem, o estudo buscará compreender como essas variáveis impactam as propriedades mecânicas, físicas e de estabilidade dos filmes, visando aprimorar a produção de materiais biodegradáveis

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos dos plastificantes glicerol e sorbitol e da reticulação complementar nas propriedades mecânicas e físicas dos biopolímeros de alginato de sódio, visando identificar o impacto na performance destes filmes e os benefícios potenciais de sua aplicação.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Formular biopolímeros à base de alginato de sódio plastificados com glicerol ou sorbitol, utilizando a técnica de *casting* com cloreto de cálcio a 1% (1º estágio), distribuindo a solução filmogênica em placas em massas de 40g, 50g e 60g para avaliar o impacto dessa variação na formação e nas propriedades dos filmes;
- Realizar a reticulação complementar (2º estágio) nos filmes por imersão em solução de cloreto de cálcio a 3% e plastificantes a 3% por 3, 10 e 15 minutos, visando avaliar os efeitos desse processo e a influência do tempo de imersão na estrutura e nas propriedades dos filmes;
- Analisar a influência do glicerol e do sorbitol na estrutura e comportamento dos filmes de alginato de cálcio (1º estágio), considerando propriedades como espessura, umidade, solubilidade em água, resistência mecânica e permeabilidade ao vapor de água (PVA);
- Analisar os efeitos do processo de reticulação complementar (2º estágio) nos biopolímeros de alginato de cálcio e avaliar utilizando as mesmas propriedades aplicadas nos filmes do 1º estágio.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 BIOPOLÍMEROS

Polímeros naturais ecologicamente corretos estão ganhando cada vez mais destaque no mercado industrial em detrimento da utilização de plásticos sintéticos. Essa mudança é uma estratégia necessária para reduzir os impactos ambientais gerados pelos materiais poliméricos derivados de petróleo (AYYUBI e PURBASARI, 2022).

Embora os materiais sintéticos desempenhem um papel crucial na dinâmica diária, apenas no Brasil foram produzidas mais de 11,3 milhões de toneladas de plásticos em 2019. Este dado sinaliza uma tendência alarmante, uma vez que os plásticos de origem fóssil possuem alta estabilidade e apresentam grande dificuldade para se decompor na natureza (WWF, 2019).

As embalagens representam uma tecnologia fundamental para assegurar a integridade, a segurança e a qualidade dos produtos durante o transporte e armazenamento, viabilizando sua entrega aos consumidores finais a preços acessíveis. Esse papel assume uma importância particular na preservação de produtos alimentícios, permitindo que sejam produzidos em determinados locais e posteriormente disponibilizados para consumidores em outras regiões, mesmo após dias ou meses desde a manufatura inicial (PRYADARSHI e RHIM, 2020).

Os materiais tradicionalmente utilizados para embalagens são poluentes, motivando o surgimento de novas tendências para minimizar seu impacto ambiental. Diante dessa necessidade, a indústria alimentícia objetiva evoluir, adotando fontes renováveis e práticas de produção ambientalmente sustentáveis. Essa mudança é impelida pela crescente conscientização e demanda dos consumidores por opções mais amigáveis ao meio ambiente.

As embalagens biodegradáveis podem ser projetadas na forma de filmes ou revestimentos comestíveis, onde polímeros são incorporados formando uma película para criar uma camada fina superficial que protege os alimentos, sem afetar suas características organolépticas. Materiais que se decompõem em compostos simples sob a influência de leveduras, bactérias ou fungos são utilizados para a produção das embalagens biodegradáveis (JAMRÓZ et al., 2022).

A produção de biofilmes se baseia na preparação de uma solução em que materiais biodegradáveis são dissolvidos em um solvente como água, etanol ou ácidos orgânicos, com a adição de plastificantes. A junção desses componentes forma uma solução homogênea que, ao ser aquecida, resulta em uma solução filmogênica em forma de gel. Após essa etapa, os filmes são submetidos a um processo de secagem do solvente. Esse método é conhecido como *casting*,

uma técnica amplamente empregada na pesquisa e desenvolvimento de materiais biodegradáveis (MIGUEL, 2023).

Independentemente do método de produção adotado, a transformação da mistura filmogênica em filme resulta de interações moleculares. Conforme Henrique et al. (2015) a formulação deve conter, no mínimo, um componente capaz de formar uma matriz contínua e coesa. A força de coesão de um filme está ligada à estrutura química do polímero, ao tipo de solvente utilizado, à presença de aditivos, como agentes de ligação cruzada, e às condições do ambiente durante a fabricação dos filmes. O nível de coesão impacta a resistência, a flexibilidade e a permeabilidade dos filmes.

Em seu estudo, Silva et al. (2020) destacam que durante a formação de filmes a partir de amido, ocorreu a formação uma rede semirrígida que influenciou as propriedades mecânicas e de barreiras dos biofilmes, influenciando diretamente em suas características de desempenho, resistência e permeabilidade. A formação de biopolímeros ocorre através da combinação de seus componentes, levando a interações intermoleculares e intramoleculares ou ligações cruzadas entre cadeias poliméricas, permitindo a retenção do solvente.

Segundo Nogueira (2019), os principais mecanismos de formação dos filmes incluem precipitação simples, precipitação complexa e gelificação térmica. Entre os polissacarídeos utilizados na produção de filmes estão derivados de celulose, amido, alginatos, quitosana, pectinas e diversas gomas. utilização desses polissacarídeos na produção de biofilmes oferece alternativas sustentáveis aos plásticos convencionais, contribuindo para a redução do impacto ambiental (GALUS; KADZIŃSKA, 2015).

Os requisitos de barreira para filmes e revestimentos comestíveis dependem da aplicação específica e das propriedades do alimento a ser protegido. No caso de revestimentos para frutas e vegetais frescos, é crucial ter baixa permeabilidade ao vapor de água para reduzir a dessecação, ao passo que a permeabilidade ao oxigênio deve ser controlada para retardar a respiração, evitando condições anaeróbicas que poderiam levar à produção de etanol e à formação de sabores indesejados (VIANA et al., 2018).

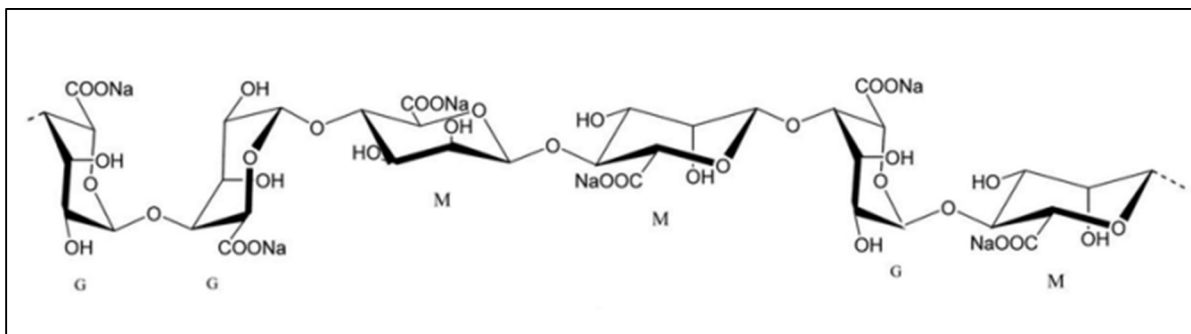
Uma alternativa viável para reduzir os custos de produção de filmes comestíveis e valorizar os subprodutos alimentares é o uso de resíduos do processamento de frutas e vegetais, conforme discutido na literatura (OTONI et al., 2017). Os sistemas de embalagem de alimentos desempenham diversas funções, incluindo contenção, fornecimento de informações nutricionais e marketing (PIRSA et al., 2020). Esses sistemas têm como objetivo não apenas assegurar a segurança dos alimentos, mas também estender seu tempo de armazenamento e reduzir o impacto ambiental dos polímeros sintéticos (OTONI et al., 2017).

### 3.2 ALGINATO DE SÓDIO

O alginato de sódio, um sal do ácido algínico, é derivado de algas marinhas marrons e possui uma estrutura poliurônica linear composta por ligações  $\alpha$ -1-4, extraído da parede celular e do espaço intercelular das algas. Para obter esse biopolímero, as algas marinhas marrons passam por um processo de lavagem e maceração. Em seguida, o alginato é extraído utilizando carbonato de sódio. O extrato é filtrado e adiciona-se cloreto de sódio ou cálcio ao filtrado, o que resulta na formação de um precipitado fibroso de alginato de sódio ou cálcio. Esse sal de alginato pode ser convertido em ácido algínico por meio de tratamento com ácido clorídrico diluído. Depois de passar por diversos processos de purificação, o alginato é seco e pulverizado em diferentes formas iônicas (SZEKALSKA et al., 2016).

O alginato, um polímero natural, é polianiônico, mucoadesivo e semicristalino (WU et al., 2017). Composto de uma mistura de carboidratos L-guluronato (G) e D-manuronato (M) formando blocos do tipo GGGGG, MMMM ou GMGM em ligações  $\alpha$  ou  $\beta$  (1,4) (TONG et al., 2017). Sua estrutura molecular é apresentada na Figura 1.

**Figura 1:** Estrutura da molécula do alginato



Fonte: Adaptado de CAO et al. (2020).

Os alginatos demonstram a capacidade de gerar biofilmes por meio de estruturas de géis com propriedades específicas, tornando-os úteis para revestir diversos materiais. O processo de gelificação envolve associações intermoleculares ou ligações cruzadas na cadeia do polímero, resultando em uma matriz tridimensional semirrígida que retém e imobiliza o solvente. O alginato de sódio exibe características como ação espessante e gelificante, além disso, propriedades como biocompatibilidade, biodegradabilidade e ausência de toxidez, conferindo-lhe um perfil atrativo para diversas aplicações (SUN; TAN, 2013).

Como os filmes de alginato são matrizes hidrofílicas, o processo de reticulação com cátions polivalentes tem sido usado para melhorar suas propriedades de barreira à água,

resistência mecânica, coesão e rigidez. A incorporação de óleos nessa matriz depende da utilização de um componente emulsificante (PARREIDT; MULLER; SCHMID, 2018).

### **3.3 AGENTES PLASTIFICANTES**

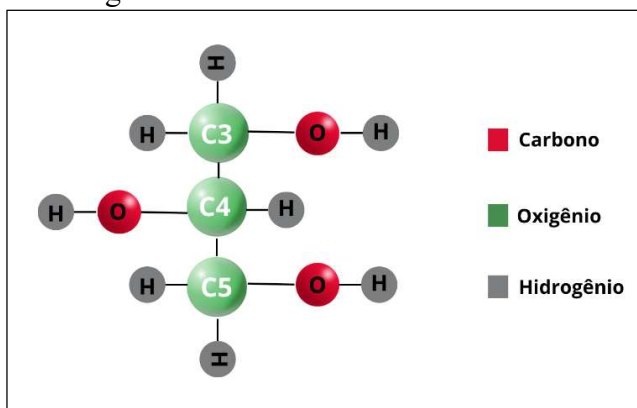
Os plastificantes correspondem ao material adicionado aos plásticos contribuindo para melhorar suas propriedades mecânicas e flexibilidade. Esses biopolímeros, muitas vezes derivados de materiais poliméricos como amidos, proteínas ou polissacarídeos, podem apresentar rigidez ou fragilidade em sua forma inicial. A adição de plastificantes visa modificar essas características, proporcionando benefícios significativos, conforme trabalho apresentado por Edhirej, A. et al. (2017)

Os plastificantes por apresentarem caráter hidrofílico e baixo peso molecular inserem-se facilmente entre as cadeiras poliméricas. A atuação em biopolímeros leva a mudanças nas propriedades físicas, químicas e mecânicas, por alterarem a organização tridimensional da rede polimérica, enfraquecendo a atração intermolecular e aumentando o volume livre ou a mobilidade das moléculas do polímero. Como resultado, a rede se torna menos densa, o que diminui as forças de atração e melhora a flexibilidade e a extensibilidade dos filmes (MADALENO et al., 2009).

A escolha do plastificante a ser adicionado à formulação deve ser compatível com o polímero base utilizado no biofilme, garantindo uma mistura homogênea e eficaz. A compatibilidade afeta diretamente a distribuição do plastificante na matriz polimérica, essencial para melhorar a flexibilidade e reduzir a fragilidade do filme. A miscibilidade do plastificante no polímero e no solvente, as propriedades desejadas para os filmes, são alguns critérios que devem ser observados para a adoção do plastificante (GAO et al., 2017).

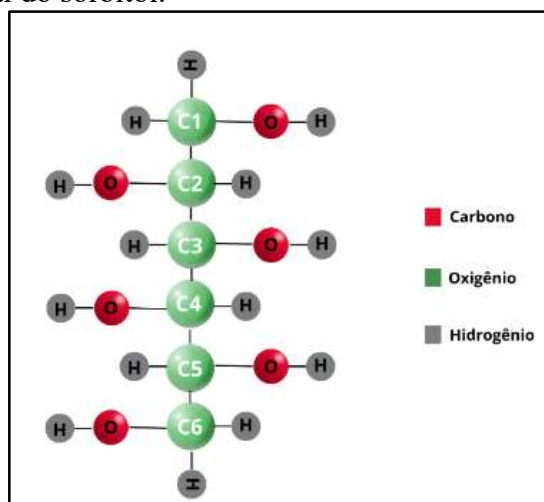
#### **3.3.1 Glicerol e sorbitol**

Líquido viscoso, incolor e inodoro, com um sabor ligeiramente doce, o glicerol, é um composto orgânico de cadeia curta, classificado como um álcool poliol, com três grupos hidroxila (-OH). A estrutura química, como observada na Figura 2, desse poliál permite que ele interaja facilmente com outras moléculas polares, como a água, devido à presença dos grupos hidroxila (BEATRIZ et al., 2011).

**Figura 2:** Fórmula estrutural do glicerol.

Fonte: Próprio autor (2025)

O sorbitol, também conhecido como glucitol, é um poliol com a fórmula molecular  $C_6H_{14}O_6$ , como ilustrado na Figura 3. Apresenta-se como um pó cristalino branco, inodoro e higroscópico, com sabor doce, porém menos intenso que o da sacarose. Naturalmente encontrado em frutas como maçã e ameixa, o sorbitol é produzido comercialmente por hidrogenação da glicose. Além de suas propriedades como edulcorante, é utilizado como umectante, estabilizante e veículo em diversas indústrias, incluindo a alimentícia, farmacêutica e cosmética (EMFAL, 2022).

**Figura 3:** Fórmula estrutural do sorbitol.

Fonte: Próprio autor (2025).

Os plastificantes, como o glicerol e o sorbitol, possuem propriedades físicas distintas que influenciam diretamente o comportamento dos filmes biopoliméricos. O glicerol, com uma massa molecular de 92,09 g/mol, apresenta uma densidade de 1,26 g/cm<sup>3</sup> e um ponto de fusão em torno de 18,1°C, o que lhe confere boa solubilidade em água e características higroscópicas

que impactam na flexibilidade e na plasticidade dos filmes. Já o sorbitol, com uma massa molecular de 182,17 g/mol e densidade de 1,49 g/cm<sup>3</sup>, possui um ponto de fusão mais elevado, cerca de 94°C, e uma menor tendência à absorção de água, o que resulta em maior estabilidade dimensional dos filmes. A Tabela 1, mostra algumas propriedades dos plastificantes, permitindo uma comparação detalhada entre o glicerol e o sorbitol.

**Tabela 1:** Propriedades do glicerol e sorbitol.

| Propriedades      | Glicerol                 | Sorbitol               |
|-------------------|--------------------------|------------------------|
| Massa Molecular   | 92,09 g/mol              | 182,17 g/mol           |
| Densidade         | 1,2613 g/cm <sup>3</sup> | 1,49 g/cm <sup>3</sup> |
| Ponto de Fusão    | 18,1°C                   | 94°C                   |
| Ponto de Ebulição | 290 °C                   | 295 °C                 |
| Ponto de Fulgor   | 199 °C                   | 283,6 °C (vaso aberto) |

Fonte: MENDES (2024) e CETESB (2024).

Plastificantes como o glicerol e o sorbitol, desempenham um papel crucial na otimização de plásticos biodegradáveis. O plastificante, uma molécula de baixa volatilidade e natureza química semelhante ao polímero do filme, é capaz de modificar a organização molecular da rede amilácea ao ser adicionado à solução filmogênica. Essa modificação resulta em um aumento no volume livre na molécula, causando mudanças significativas nas propriedades do plástico biodegradável (GONÇALVES, et al., 2019).

A incorporação de glicerol na matriz de alginato resulta em uma diminuição da resistência à tração e do módulo de Young e um aumento do alongamento à ruptura de filmes de alginato, sendo o plastificante mais popular utilizado para a plastificação do alginato de sódio (GAO et al., 2017). Essa modificação estrutural é essencial para aplicações em que o filme precisa ser flexível e resistente à quebra, como embalagens biodegradáveis e revestimentos comestíveis. No entanto, a quantidade utilizada deve ser cuidadosamente controlada, pois um excesso pode causar uma perda significativa de resistência mecânica, tornando o filme muito pegajoso ou menos resistente a tensões mecânicas.

O sorbitol é um poliol amplamente utilizado como plastificante na formulação de biopolímeros devido à sua capacidade de interagir com a matriz polimérica, reduzindo a rigidez e aumentando a flexibilidade dos materiais. Além de melhorar as propriedades mecânicas dos filmes, o sorbitol também influencia sua estabilidade e permeabilidade, sendo frequentemente empregado na produção de embalagens biodegradáveis e revestimentos comestíveis. Sua

aplicação é vantajosa por apresentar baixa toxicidade e boa compatibilidade com polímeros naturais, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis (PCC GROUP, 2025).

### **3.4 RETICULANTE**

O processo de reticulação ocorre por meio de ligações covalente e iônicas, pelo qual as cadeias poliméricas são unidas formando uma rede tridimensional mais coesa e estável. A elevada solubilidade em água se torna uma desvantagem na utilização de polímeros naturais para a produção de filmes. A reticulação provoca um aumento da rigidez da estrutura que leva a redução da afinidade do biofilme por água (SILVA et al., 2011).

O principal efeito da reticulação é a criação de uma rede polimérica mais densa e interconectada, que leva a uma maior estabilidade estrutural do biofilme. Isso aumenta a resistência, tanto em termos de tração quanto de ruptura. A presença de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas impede que elas se movam livremente, conferindo maior rigidez e durabilidade ao biofilme.

A reticulação complementar é uma técnica utilizada para melhorar as propriedades dos filmes biopoliméricos, consistindo na formação de ligações adicionais entre as cadeias poliméricas após a fase inicial de preparação. Esse processo geralmente é realizado por imersão dos filmes em soluções contendo agentes reticulantes, como o cloreto de cálcio, que formam pontes cruzadas entre as moléculas, criando uma rede tridimensional mais estável (OLIVEIRA FC, 2023).

A reticulação complementar é capaz de conferir aos filmes maior resistência mecânica, reduzindo sua solubilidade em água e aumentando a estabilidade dimensional, características importantes para aplicações em embalagens biodegradáveis e outros produtos sustentáveis. Estudos demonstram que, ao promover a formação dessas ligações adicionais, a técnica contribui para o aumento da integridade estrutural do filme, o que é essencial para garantir a funcionalidade do material em diferentes condições de uso (OLIVEIRA FC, 2023; VIEIRA et al., 2019).

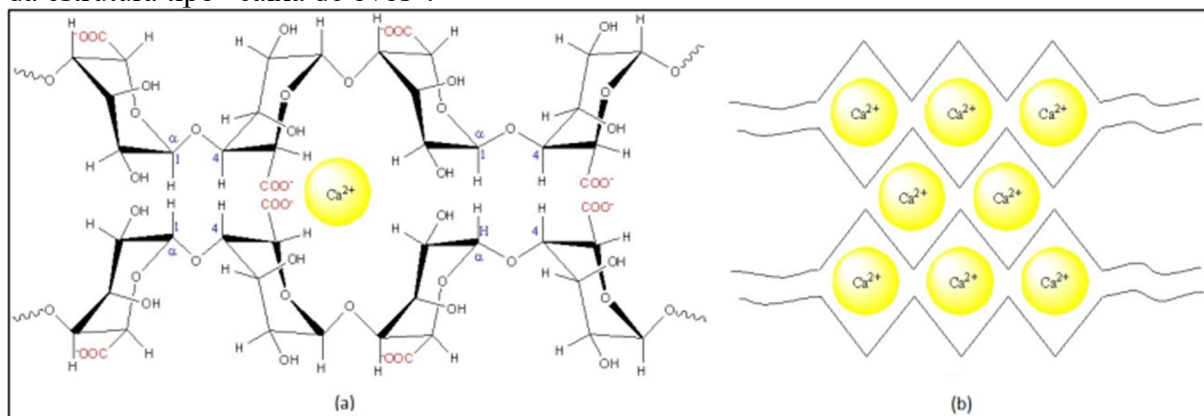
#### **3.4.1 Cloreto de cálcio**

O cloreto de cálcio é um composto químico amplamente utilizado em processos de mudança de fase de materiais, como agente de secagem, resfriamento ou desumidificação, além de ser empregado como agente reticulante em produtos poliméricos. Este composto é

valorizado por sua fácil obtenção, não toxicidade, baixa variação de volume durante a transição de fase e menor corrosividade em comparação com outros sais hidratados. Devido à sua alta higroscopicidade, o cloreto de cálcio deve ser armazenado em recipientes hermeticamente fechados (N'TSOUKPOE et al., 2015).

A seletividade iônica e a resistência mecânica do gel de alginato formado dependem diretamente da quantidade e disposição dos monômeros G. Quanto maior essa quantidade e mais bloqueada ela for, mais seletivo e resistente será o gel. Além disso, essa gelificação, causada pelo excesso de blocos G interagindo com íons polivalentes, forma uma estrutura tridimensional conhecida como ‘caixa de ovos’, com o cloreto de cálcio adicionado às membranas como apresentada na Figura 4. O alginato de sódio reage com o cloreto de cálcio, formando um gel termo irreversível. Isso acontece porque os íons cálcio se ligam aos grupos carboxilato do alginato, criando uma rede tridimensional. Essa estrutura é insolúvel em água e permanece estável até 100°C (ABDUL KHALIL ET AL., 2017).

**Figura 4:** (a) Estrutura química em blocos G do gel de alginato. (b) Representação esquemática da estrutura tipo “caixa de ovos”.



Fonte: Adaptado de ABDUL KHALIL et al. (2017).

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES

A caracterização abrangente dos biofilmes é crucial para garantir sua adequação às aplicações específicas, seja na indústria de embalagens, medicina, ou outras áreas na qual esses materiais são empregados. Cada propriedade avaliada fornece informações valiosas sobre o desempenho e a qualidade dos biopolímeros.

### 3.5.1 Conteúdo de umidade

Segundo Farhan e Hani (2017), o conteúdo de umidade em biofilmes refere-se à quantidade de água presente no material, expressa como uma porcentagem do peso total da amostra. Essa medida é fundamental para avaliar a qualidade e a estabilidade dos biofilmes, pois a umidade excessiva pode favorecer o crescimento de microrganismos e reações químicas indesejadas, enquanto a umidade insuficiente pode comprometer as propriedades físicas e mecânicas do material.

Filmes secos sob maiores umidades relativas apresentam estruturas com maior grau de cristalinidade e maior teor de umidade residual, características que tornam os filmes mais susceptíveis a alterações durante o seu armazenamento e utilização (RINDLAV - WESTLING, 1998). 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).

A presença de umidade pode acelerar processos de manipulação ou modificar a interação entre os componentes do biofilme, afetando sua estabilidade e funcionalidade ao longo do tempo. Com isso, o controle e a análise da umidade são essenciais para garantir o desempenho desejado dos biofilmes em suas diversas aplicações (SILVA et al., 2023).

### 3.5.2 Solubilidade em água

Segundo Silva et al. (2011), a solubilidade em água de biofilmes refere-se à capacidade do material de se dissolver ou dispersar quando em contato com a água, resultando na perda de integridade estrutural do filme. Essa propriedade é crucial para determinar a aplicabilidade dos biofilmes em ambientes aquosos, como em embalagens alimentícias, onde a resistência à dissolução é desejável para manter a integridade do produto embalado.

A solubilidade dos filmes é uma propriedade essencial na caracterização de biofilmes. Sua relação com a água pode ser desejável, em situações como encapsulamento ou revestimento de alimentos. Por outro lado, em embalagens onde a proteção e a integridade do produto contra a água são essenciais, o filme deve ser insolúvel (ZAVAREZE et al., 2012).

Segundo Azeredo et al. (2017), a solubilidade é um fator crítico para determinar a aplicabilidade dos biofilmes, especialmente em contextos em que o material precisa ser resistente à umidade, como embalagens para alimentos com alto teor de água.

### 3.5.3 Espessura

Medir a espessura é um parâmetro fundamental que influencia diretamente propriedades do biofilme conforme as exigências específicas da aplicação. Em seus estudos, Santos et al. (2023) indicaram que a espessura pode ser influenciada pela concentração dos polímeros e plastificantes na formulação, tornando sua análise necessária para a padronização e otimização dos biofilmes destinados a diferentes aplicações. a espessura dos filmes como sendo a distância perpendicular entre as duas superfícies principais do material e a gramatura como peso de uma determinada área do material, estando ambas diretamente relacionadas a resistência mecânica dos filmes.

### 3.5.4 Permeabilidade ao Vapor de Água (PVA)

Segundo Tosati (2020), a permeabilidade refere-se ao processo no qual o vapor difunde-se de um lado do filme para o outro. Bertan et al. (2003) complementaram dizendo que essa permeabilidade é influenciada pela morfologia, densidade, estrutura química, cristalinidade e orientação polimérica do material do filme.

Segundo Sothornvit e Krochta (2005), a PVA é um parâmetro importante para ser avaliado pois controla a transferência de umidade do biofilme que impacta na qualidade e conservação dos alimentos a serem embalados.

### 3.5.5 Tensão e Elongação

Segundo Marques (2016), a resistência à tração é a capacidade de um material resistir a forças que tendem a alongá-lo até o ponto de ruptura. Em biofilmes, essa propriedade é importante para determinar sua integridade e durabilidade sob tensões mecânicas.

A resistência à tração dos biofilmes é diretamente influenciada por fatores como a composição química, a presença de plastificantes e o grau de reticulação. Através da análise dessa propriedade, é possível avaliar a viabilidade do biofilme para aplicação industrial considerando sua resistência a ruptura, de acordo com os estudos de Krochta e De Mulder-Johnston (1997).

De acordo com Souza et al. (2019), a elongação é a capacidade de um material se deformar antes de romper. Em biofilmes, esse parâmetro está relacionado à flexibilidade e resistência do material sob estiramento. A sua avaliação é um parâmetro crítico para aplicações que requerem flexibilidade, suporte as deformações sem comprometer a integridade estrutural do material garantindo a funcionalidade do biofilme (CALLISTER e RETHWISCH, 2014).

Avaliar as propriedades mecânicas dos biofilmes é de grande importância para compreender sua funcionalidade e viabilidade em diferentes aplicações, especialmente em embalagens biodegradáveis. Através da caracterização de tensão e elongação, é avaliado a capacidade do biofilme de resistir a forças aplicadas e de se deformar antes de romper.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 MATERIAL**

Os materiais utilizados para a confecção dos biopolímeros foram o alginato de sódio, o glicerol (Isofar, Dinâmica Química Contemporânea, Brasil) e sorbitol (Synth, Brasil) como agentes plastificantes e como agente reticulador utilizou-se o cloreto de cálcio dihidratado (Merck, Brasil).

### **4.2 LOCAL DA PESQUISA**

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia de Produtos e Processos em Biorrecursos (LEPPBio) do curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), no campus do Bacanga, na cidade de São Luís-MA.

### **4.3 FORMULAÇÕES FILMOGÊNICAS**

A matriz polimérica foi determinada de acordo com o seguinte planejamento:

a) Formulação 1:

Composta com 6 g de alginato de sódio, 3,6 g do plastificante glicerol, 30 mL de solução reticuladora de cloreto de cálcio e 400mL de água destilada.

b) Formulação 2:

Composta com 6 g de alginato de sódio, 3,6 g do plastificante sorbitol, 30 mL de solução reticuladora de cloreto de cálcio e 400mL de água destilada.

### **4.4 INSTRUMENTOS UTILIZADOS**

Os instrumentos utilizados para a elaboração dos filmes de alginato através do método de casting estão nas imagens a seguir:

**Figura 5:** Balança semi-analítica (modelo UA420, URANO, Brasil)



Fonte: Próprio Autor (2025)

**Figura 6:** Agitador Mecânico (modelo 752, FISATOM, Brasil)



Fonte: Próprio Autor (2025)

**Figura 7:** Agitador Magnético com aquecimento (modelo 752, FISATOM, Brasil)



Fonte: Próprio Autor (2025)

**Figura 8:** Micrômetro externo (modelo MDC-25S, CARBOGRAFITE, Japão)



Fonte: Próprio Autor (2025)

**Figura 9:** Mesa agitadora orbital (Tecnal, modelo TE-145, Brasil)



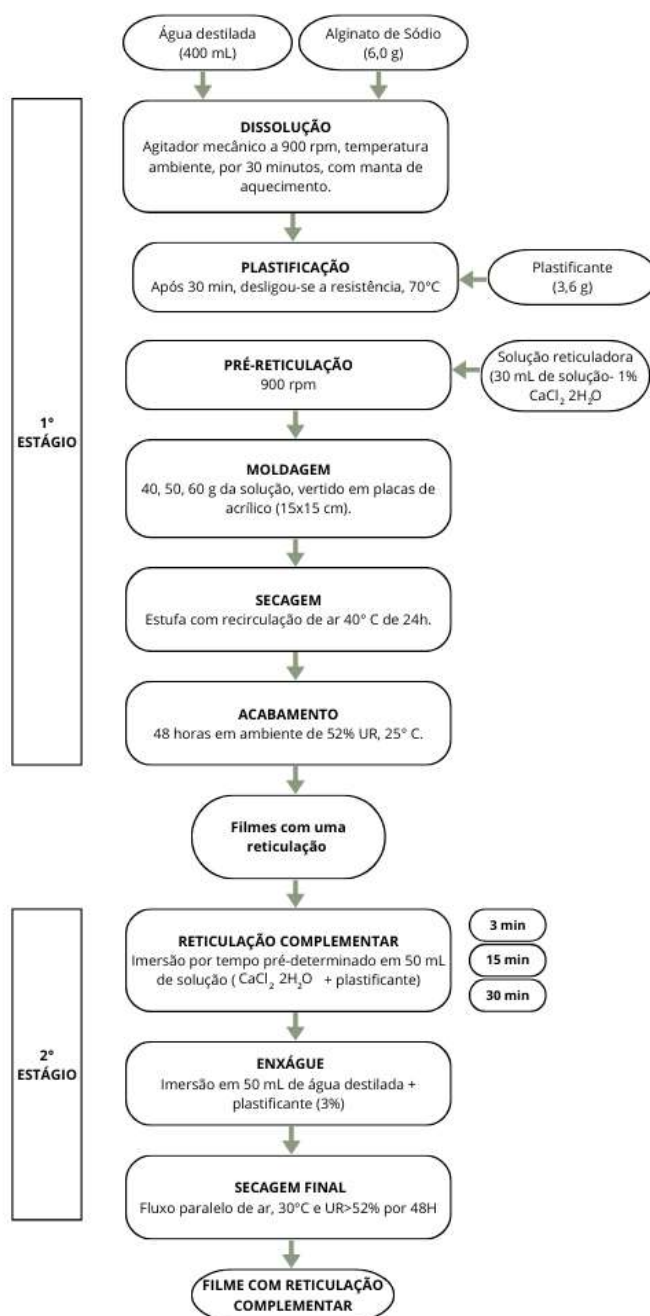
Fonte: Próprio Autor (2025)

## 4.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 4.5.1 Elaboração dos biopolímeros

A etapa de confecção dos biopolímeros se deu a partir do fluxograma apresentado na Figura 10.

**Figura 10:** Fluxograma da confecção de filmes de alginato.



#### 4.5.2 Processo de confecção dos biopolímeros

Os filmes foram preparados utilizando a técnica de *casting*, a metodologia comumente empregada na produção de biofilmes. Nesse método a solução aquosa é espalhada uniformemente nas placas acrílicas para posterior secagem.

Conforme a Figura 10, para o primeiro estágio de produção utilizou-se concentração de 3% dos plastificantes, glicerol e sorbitol, mantendo-se fixo a sua massa e do alginato de sódio na solução filmogênica. Foram realizadas duas linhas de produção, uma com glicerol e outra com o sorbitol, para flexibilizar a matriz polimérica.

Para o preparo da solução filmogênica, foram pesadas na balança analítica (Figura 5) 6 g do alginato de sódio que foi dissolvido em água destilada sob agitação magnética (Figura 6) constante, garantindo uma distribuição homogênea do polímero na solução. Após 30 minutos de agitação, desligou-se a resistência do agitador magnético (Figura 7) e adicionou-se 3,6 g do plastificante à solução a uma temperatura de 70°C e agitou-se a solução por mais 30 minutos. Após isso, deu-se início ao processo de reticulação com gotejamento de 30 mL da solução de cloreto de cálcio dihidratado ( $\text{CaCl}_2$  - 1%, m/v) a solução. Devido à rápida reação de reticulação do  $\text{Ca}^{2+}$  com o alginato, a solução reticuladora foi introduzida de forma lenta e controlada através de uma bomba peristáltica, com vazão máxima de 0,6 mL/min, evitando a formação de gelificação localizada e garantindo uma reticulação uniforme (YANG et al, 2020). Essa etapa finalizou em aproximadamente 30 minutos.

Gramaturas de 40, 50 e 60 g da solução foram distribuídas em placas de Petri de acrílico com área de 225 cm<sup>2</sup> e, em seguida, secas a 40°C em estufa com recirculação de ar durante 24 horas, garantindo a eliminação gradual do solvente e a formação de uma matriz coesa (MARTINS et al, 2018). Após a secagem, os filmes foram cuidadosamente removidos das placas de acrílico e armazenados em um ambiente com umidade relativa controlada de 52%, evitando a absorção de umidade e alterações indesejadas em suas propriedades físicas.

No 2º estágio, os filmes foram submetidos a um tratamento adicional de imersão em 50 mL de uma solução aquosa contendo 3% de cloreto de cálcio dihidratado e 3% dos plastificantes selecionados (glicerol ou sorbitol), e no decorrer do tempo de imersão, foram coletadas amostras dos filmes para os tempos de 3, 15 e 30min. Este tratamento complementar visou promover uma reticulação adicional, aumentando a coesão estrutural dos filmes e melhorando sua resistência mecânica e estabilidade ao longo do tempo (GUILBERT et al, 2021). Após a reticulação, foi realizada uma etapa de enxágue para remover excessos de reagentes e plastificantes da superfície.

Finalmente, todos os filmes foram acondicionados em um dessecador à temperatura ambiente e umidade relativa de 52% durante dois dias, para alcançar o equilíbrio higroscópico antes de serem submetidos aos ensaios de caracterização mecânica e de permeabilidade (TURBIANI, 2007). Essa etapa é fundamental para garantir que os resultados dos ensaios reflitam com precisão as propriedades dos filmes sob condições de uso real.

## 4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS

A caracterização dos biopolímeros envolve a avaliação de várias propriedades físicas, químicas, mecânicas e microestruturais para determinar sua qualidade, adequação para aplicações específicas. Os filmes são caracterizados quanto ao conteúdo de umidade, solubilidade, espessura, permeabilidade ao vapor de água (PVA) e propriedades mecânicas.

### 4.6.1 Conteúdo de umidade

Através do método gravimétrico de amostras dos biofilmes foi determinado o conteúdo de umidade dos biopolímeros em condições de equilíbrio a 52% de UR (umidade relativa) e temperatura de 25°C. Para o 1º e 2º estágio, foram coletadas 3 amostras em formatos retangulares para cada gramatura dos filmes produzido. Essas amostras foram pesadas, colocadas em placas de vidro e submetidas ao processo de secagem durante 24 horas a temperatura de 105°C. Após a secagem, as amostras foram retiradas da estufa e posteriormente pesadas novamente para registro das suas massas finais. Com essas informações, foi obtido o teor de umidade das amostras usando a Equação 1:

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

Onde:

$\omega$ =teor de umidade do biopolímero;

$m_i$ =massa inicial da amostra;

$m_s$ =massa seca da amostra.

### 4.6.2 Solubilidade em água

Foi determinado a solubilidade através da metodologia de Irissin-Mangata (2001), onde a massa ( $m_u$ ) do filme em triplicata é quantificada, sendo imersa em 50 mL de água destilada sob agitação constante por 24 horas. Após a imersão, as soluções e os discos foram

retirados e secos novamente em estufa a 105°C por 24 horas e pesados para determinação da quantidade de matéria seca não solubilizada ( $m_f$ ). Calculou-se a massa do filme que solubilizou em água, ou seja, o teor de matéria insolúvel, utilizando a Equação 2:

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

Onde:

$S$ : porcentagem de material solubilizado (%);

$m_{u(1-\omega)}$ : massa inicial do material seco (g);

$m_f$ : massa final do material seco não solubilizado (g).

#### 4.6.3 Espessura

Essa medida foi determinada a partir de um micrômetro digital (Mitutoyo Co., Kawasaki, Japão), com escala de 0-25 mm e precisão de 0,01 mm. A utilização desse equipamento é uma das maneiras mais comuns e diretas de medir a espessura de um filme. A espessura final foi obtida pela média aritmética de 15 medições aleatórias sobre o biofilme para ensaio de PVA.

#### 4.6.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

O PVA foi realizado a uma temperatura ambiente de 25°C seguindo as normas do método E95-96 (ASTM, 2012), onde utilizou-se uma célula de barreira projetada para manter condições controladas e medir o fluxo de vapor de água através do filme. Essa célula possui duas câmaras, uma câmara do lado seco e uma câmara do lado úmido, na qual a amostra foi posicionada entre elas. O fundo da célula foi preenchido por cloreto de cálcio granulado (Isofar, Dinâmica Química Contemporânea, Brasil) 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 (Isofar, Dinâmica Química Contemporânea, Brasil) a fim de se manter o ambiente com 75% de UR, o que garantiria uma diferença de pressão de vapor de água,  $\Delta P_w$ . Uma mudança na massa da célula, causada pelo ganho de água, que permeou pelo biopolímero (G) corresponde a taxa de água que é monitorada ao longo do tempo (cerca de 72 horas). Com base nos dados de ganho de massa ao longo do tempo, é possível calcular a permeabilidade ao vapor de água do material com a

Equação 3.

$$PVA = \frac{24}{A_e + \Delta P_{\omega} * UR} * G * \delta \quad (3)$$

Onde:

$PVA$  = permeabilidade de vapor de água do biopolímero [(g.mm) / (m<sup>2</sup>.dia.kpa)]

$\delta$  = é a espessura do biopolímero (mm);

$A_e$  = é a área da superfície exposta do biopolímero (m<sup>2</sup>)

$\Delta P_{\omega}$  = 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);

$UR$  = é a umidade relativa do segundo recipiente.

#### 4.6.5 Propriedades mecânicas

A resistência a tração (RT, MPa) e alongação na ruptura (EL, %) foram medidas 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. A espessura de um mínimo de doze amostras de filme de 10 × 2,5 cm foi predeterminada pela média aritmética de dez medições feitas em pontos aleatórios nos filmes. Um computador foi usado para registrar as curvas de tensão-deformação. A tensão de tração (TS) do filme foi calculada dividindo a força máxima na ruptura pela área da seção transversal (espessura × comprimento). A alongação na ruptura (EL) foi determinada dividindo a distância de separação final entre as garras pela distância de separação inicial e multiplicando por 100. Para os filmes com reticulação complementar, foi avaliado apenas filmes com 50g de massa de solução filmogênica.

#### 4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O teste de Tukey foi usado para estudar e comparar as propriedades físicas dos filmes usando a função “multicompare”. A função “multicompare” permite determinar a diferença entre as médias de um grupo de dados determinado com  $\alpha = 95\%$  ( $p < 0,05$ ).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas subseções a seguir, serão apresentados os resultados das análises propostas na metodologia acompanhando de comparações de resultados que outros autores reportaram na literatura para filmes semelhantes ao do presente trabalho.

### 5.1 Conteúdo de umidade e solubilidade em água

Os resultados referentes ao conteúdo de umidade e solubilidade em água dos biopolímeros de alginato adicionados de diferentes plastificantes variando a massa na placa, estão apresentados na tabela 2, os resultados referentes a segunda reticulação se encontram na tabela 3.

**Tabela 2:** Conteúdo de umidade ( $\omega$ ) e solubilidade em água (S) no 1º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol.

| MS<br>(g)       | Conteúdo de umidade<br>(%) | Solubilidade em água<br>(%) |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Glicerol</b> |                            |                             |
| <b>40</b>       | 14,87±0,01 <sup>c</sup>    | 100                         |
| <b>50</b>       | 15,70±0,01 <sup>d</sup>    | 100                         |
| <b>60</b>       | 17,63±0,03 <sup>e</sup>    | 100                         |
| <b>Sorbitol</b> |                            |                             |
| <b>40</b>       | 13,70±0,01 <sup>a</sup>    | 100                         |
| <b>50</b>       | 14,53±0,02 <sup>b</sup>    | 100                         |
| <b>60</b>       | 15,80±0,04 <sup>d</sup>    | 100                         |

MS = é a massa da solução filmogênica vertida nas placas de Petri de 15 cm de diâmetro (1º estágio). Médias com a mesma letra em cada coluna indicam que não há diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey. Média  $\pm$  desvio padrão.

Fonte: Próprio Autor (2025).

Na Tabela 3, pode-se observar que os valores do conteúdo de umidade dos filmes plastificados com glicerol variaram de 14,87% a 17,63%, enquanto os filmes plastificados com sorbitol apresentaram umidade entre 13,7% e 15,80%. Conforme indicado pelas diferentes letras do teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), os resultados indicam um aumento significativo à medida que a massa da solução na placa foi aumentada. Em seu estudo com filmes de alginato Nery (2014) obteve valores de umidade de 16,2% para filmes plastificados com glicerol, enquanto os filmes com sorbitol obtiveram umidade de 14,5%, valores que estão em conformidade com os encontrados nesse estudo.

Esses resultados estão em concordância com os estudos de Lima et al. (2018) onde mostram que plastificantes hidrofílicos, aumentam a retenção de umidade nos biofilmes. Além disso, segundo Silva et al. (2020) o aumento da umidade conforme o aumento da gramatura do filme na placa, é justificado pela matriz mais espessa formada, dificultando a evaporação da água durante o processo de secagem.

Segundo o estudo de Santos et al. (2017), o plastificante glicerol apresenta um caráter higroscópico ligeiramente mais alto que o sorbitol, esse comportamento corrobora com os resultados encontrados, onde filmes com glicerol apresentaram teores de umidade mais altos. Oliveira et al. (2011) completam salientando que filmes com sorbitol tendem a apresentar menor conteúdo de umidade devido à sua menor tendência de absorção de água.

A solubilidade em água dos biofilmes apresentou valores de 100% para ambos plastificantes. Em seus estudos Iwak et al. (2010), apontaram que filmes de alginato plastificados com glicerol apresentam altos índices de solubilidade, muitas vezes superiores a 90%, devido à alta camada de glicerol por moléculas de água fator este que pode limitar suas aplicações em ambientes úmidos. Janjarasskul et al. (2020) realçaram que biofilmes com alto teor de solubilidade pode ser utilizados em embalagens para aplicações específicas, como por exemplo, embalagens que necessitam de uma rápida degradação, ou que apresentam menor atividade em água. Com isso, esse fator reforça a necessidade de estudos adicionais para aprimorar as propriedades funcionais desses filmes.

Para o segundo estágio, os valores de umidade para filmes com glicerol apresentaram uma diminuição conforme o tempo de imersão aumentava na solução reticuladora. Essa redução pode ser atribuída ao aumento da densidade da rede polimérica promovida pela reticulação com íons cálcio, que limita a capacidade de absorção de umidade pelos filmes. Estudos anteriores apontam que a formação de ligações cruzadas mais intensas entre as cadeias de alginato reduz os espaços intermoleculares disponíveis para a retenção de água, tornando os filmes menos suscetíveis à umidificação (OLIVEIRA, 2011). Esperava-se após o processo de reticulação completar, uma menor umidade dos filmes comparados com o 1º estágio. Entretanto, não ocorreu, pelo processo metodológico utilizado de lavagem desses filmes após a imersão na solução reticuladora.

Para os filmes com sorbitol a umidade variou de 15,75% a 21%, mas obteve uma umidade média menor em comparação com o glicerol. Esse comportamento pode ser explicado pela maior reticulação da matriz polimérica, que restringe a capacidade de retenção de água ao tornar a rede polimérica mais densa e menos permeável (PEREIRA et al. 2020). Essa característica torna os filmes com sorbitol mais adequados para aplicações em ambientes com

menor umidade relativa ou onde a manutenção da integridade estrutural em condições de umidade controlada seja importante.

Com o aumento da massa da solução filmogênica (40, 50 e 60 g), os filmes formados tendem a ser mais espessos, isso pode influenciar a retenção de umidade, pois filmes mais espessos dificultam a perda de água para o ambiente, resultando em valores de umidade mais elevados.

**Tabela 3:** Conteúdo de umidade e solubilidade em água no 2º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol.

| MS<br>(g)       | Tempo*<br>(min) | Conteúdo de umidade<br>(%)  | Solubilidade em água<br>(%) |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Glicerol</b> |                 |                             |                             |
| <b>40</b>       | 3               | 22,50±0,01 <sup>bG</sup>    | 15,66±2,7 <sup>abcB</sup>   |
|                 | 15              | 19,89±0,01 <sup>aDE</sup>   | 13,48±2,1 <sup>aA</sup>     |
|                 | 30              | 22,00±0,01 <sup>bG</sup>    | 17,61±0,7 <sup>abcB</sup>   |
| <b>50</b>       | 3               | 20,50±0,003 <sup>aEF</sup>  | 15,52±2,8 <sup>abcAB</sup>  |
|                 | 15              | 20,50±0,02 <sup>aEF</sup>   | 14,12±1,6 <sup>abAB</sup>   |
|                 | 30              | 21,50±0,02 <sup>abF</sup>   | 19,21±2,8 <sup>abcC</sup>   |
| <b>60</b>       | 3               | 20,25±0,02 <sup>aE</sup>    | 19,85±2,2 <sup>bcC</sup>    |
|                 | 15              | 21,09±0,01 <sup>abF</sup>   | 16,29±1,9 <sup>abcB</sup>   |
|                 | 30              | 20,00±0,01 <sup>aE</sup>    | 20,62±2,8 <sup>cC</sup>     |
| <b>Sorbitol</b> |                 |                             |                             |
| <b>40</b>       | 3               | 18,25±0,01 <sup>abcC</sup>  | 29,87±3,0 <sup>bcDE</sup>   |
|                 | 15              | 16,75±0,01 <sup>abB</sup>   | 26,10±0,9 <sup>abcD</sup>   |
|                 | 30              | 18,50±0,01 <sup>abcC</sup>  | 30,65±2,1 <sup>cE</sup>     |
| <b>50</b>       | 3               | 19,25±0,01 <sup>bcD</sup>   | 30,65±2,1 <sup>cE</sup>     |
|                 | 15              | 19,25±0,01 <sup>bcD</sup>   | 23,41±3,1 <sup>abC</sup>    |
|                 | 30              | 21,00±0,01 <sup>cF</sup>    | 28,11±4,0 <sup>bcD</sup>    |
| <b>60</b>       | 3               | 18,75±0,01 <sup>abcCD</sup> | 28,70±1,9 <sup>bcD</sup>    |
|                 | 15              | 15,75±0,01 <sup>aA</sup>    | 20,61±3,5 <sup>aC</sup>     |
|                 | 30              | 20,00±0,01 <sup>cE</sup>    | 27,10±0,7 <sup>abcD</sup>   |

MS = é a massa da solução filmogênica vertida nas placas de Petri de 15 cm de diâmetro (1º estágio). \* Tempo de imersão na solução reticuladora no 2º estágio. Médias com a mesma *letra minúscula* em cada coluna indicam que não há diferença significativa ( $p<0,05$ ) pelo teste de Tukey para os filmes com glicerol ou sorbitol em diferentes tempos de imersão na solução reticuladora no 2º estágio. Médias com a mesma *letra maiúscula* em cada coluna indicam que não há diferença significativa ( $p<0,05$ ) pelo teste de Tukey para os filmes com glicerol e sorbitol e nos diferentes tempos de imersão na reticulação complementar (2º estágio). Média ± desvio padrão.

Fonte: Próprio Autor (2025).

A solubilidade em água dos biofilmes apresentou valores menores em comparação com os resultados obtidos no primeiro estágio para ambos plastificantes. Para os filmes

plastificados com glicerol, a solubilidade variou de 13,48% a 20,62% e para os filmes com sorbitol, a solubilidade apresentou valores mais elevados, de 21,10% a 27,10%. Esse comportamento pode ser explicado conforme Carvalho et al. (2018) onde apontam que plastificantes com menor afinidade com a matriz polimérica podem criar zonas de descontinuidade estrutural, favorecendo a penetração da água e a solubilização do filme.

A drástica redução na solubilidade dos filmes plastificados com glicerol e sorbitol no segundo estágio, em comparação ao primeiro, deve-se à reticulação promovida pelo cloreto de cálcio, que fortalece a rede tridimensional do alginato, tornando-a mais resistente à dissolução em água. Esse processo reduz a mobilidade das moléculas plastificantes e forma ligações iônicas entre os grupos carboxilato do alginato, resultando em uma matriz mais compacta e estável (RHIM, 2004; SANNINO et al, 2009). Dessa forma, a reticulação complementar altera significativamente as propriedades físico-químicas dos filmes, diminuindo sua solubilidade em meio aquoso.

## 5.2 Espessura e permeabilidade ao vapor de água

Os resultados de espessura e permeabilidade ao vapor de água dos biopolímeros de alginato plastificados com glicerol e sorbitol no 1º estágio são apresentados na tabela 4:

**Tabela 4:** Espessura e permeabilidade ao vapor de água no 1º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol.

| MS<br>(g)       | Espessura<br>(mm)        | Permeabilidade ao vapor de<br>água [(g.mm)/(m <sup>2</sup> .dia.kPa)] |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Glicerol</b> |                          |                                                                       |
| <b>40</b>       | 0,017±0,001 <sup>a</sup> | 6,80±0,1 <sup>d</sup>                                                 |
| <b>50</b>       | 0,026±0,001 <sup>d</sup> | 5,31±0,1 <sup>c</sup>                                                 |
| <b>60</b>       | 0,032±0,001 <sup>c</sup> | 3,66±0,2 <sup>b</sup>                                                 |
| <b>Sorbitol</b> |                          |                                                                       |
| <b>40</b>       | 0,019±0,001 <sup>b</sup> | 3,31±0,2 <sup>b</sup>                                                 |
| <b>50</b>       | 0,024±0,003 <sup>c</sup> | 2,48±0,2 <sup>a</sup>                                                 |
| <b>60</b>       | 0,034±0,002 <sup>c</sup> | 2,10±0,1 <sup>a</sup>                                                 |

MS = é a massa da solução filmogênica vertida nas placas de Petri de 15 cm de diâmetro (1º estágio). Médias com a mesma letra em cada coluna indicam que não há diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey. Média ± desvio padrão.

Fonte: Próprio Autor (2025).

Os valores dos ensaios experimentais de espessura forneceram valores variando de 0,017 a 0,032mm para os biofilmes com glicerol e 0,019 a 0,034mm para biofilmes com sorbitol, valores correspondentes com os encontrados por Ferreira et al. (2020), onde os filmes

de alginato plastificados com glicerol e sorbitol obtiveram uma espessura variando de 0,018 mm a 0,035mm, dependendo da massa da solução filmogênica. Já Pereira et al. (2019), em seu estudo sobre a confecção de biofilmes de alginato com glicerol e sorbitol, relataram variação de espessura de 0,025mm a 0,032mm nos filmes de sorbitol, ligeiramente superior aos plastificados com glicerol, 0,020mm a 0,029mm. Essa diferença foi observada nos dados do presente trabalho. Esse comportamento corrobora com os estudos de Santos et al. (2017) e Pereira et al. (2019) na qual relataram que o sorbitol apresenta menor volatilidade e menor migração para a superfície durante a etapa de secagem, favorecendo a robustez da estrutura polimérica e um aumento na espessura final.

O aumento da espessura dos filmes com o acréscimo da massa da solução filmogênica no primeiro estágio ocorre devido à maior disponibilidade de material polimérico depositado na superfície da placa durante a secagem. Com um maior volume de solução, há uma maior quantidade de alginato e plastificante distribuída na matriz, formando uma camada mais espessa após a evaporação da água (PÉREZ-GALLARDO et al, 2014). Além disso, a viscosidade da solução filmogênica influencia a formação da estrutura final, favorecendo a retenção de material e resultando em um filme mais espesso (ROJAS-GRAÜ et al, 2007). O teste de Tukey confirmou que as diferenças observadas na espessura entre os tratamentos foram estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ), reforçando a influência da espessura e do plastificante na permeabilidade dos filmes, conforme evidenciado pelas literaturas.

Para a resposta PVA, a variação foi de 3,66 a 6,80 (g.mm)/(m<sup>2</sup>.dia.kPa) para os filmes de alginato com glicerol e 2,10 a 3,31 (g.mm)/(m<sup>2</sup>.dia.kPa) para os filmes de alginato com sorbitol. De acordo com Krochta e Mulder-Jonhston (1997), valores de PVA entre 10-100 é considerado pobre, de 0,10 a 10 é considerado moderado e boa de 0,01 a 0,10 (g.mm)/(m<sup>2</sup>.dia.kPa). A partir dessa análise, os valores de PVA obtidos nesse estudo se apresentaram na faixa moderado, indicando que os filmes desenvolvidos apresentam resistência intermediária à passagem de vapor d'água.

Valores de PVA obtidos por Rodrigues et al. (2021) para filmes a base de alginato com glicerol apresentaram valores entre 4,2 a 7,1 (g.mm)/(m<sup>2</sup>.dia.kPa) bem próximos e na mesma faixa encontrados nesse estudo. E para filmes com sorbitol, Oliveira et al. (2019) encontraram valores entre 2,5 a 3,8 (g.mm)/(m<sup>2</sup>.dia.kPa). Esses resultados são consistentes com os do presente estudo, reforçando a influência do plastificante na permeabilidade.

Filmes com sorbitol apresentaram permeabilidade ao vapor de água significativamente menor pelo teste de Tukey, o que reforça os estudos de Carvalho et al. (2018) e Oliveira et al. (2019) onde relatam que esse comportamento pode ser explicado pelo aumento na mobilidade

da matriz polimérica devido à natureza higroscópica do glicerol, facilitando a difusão ao vapor de água do biofilme. Em contraste, o sorbitol, devido à sua menor interação com a umidade ambiente, resulta em filmes mais resistentes à passagem de vapor d'água. Esses resultados indicam que, para aplicações em embalagens, o sorbitol pode ser uma escolha mais adequada do que o glicerol, pois proporciona filmes menos permeáveis à umidade, aumentando sua eficácia como barreira contra a umidade externa (Costa et al, 2022).

A diminuição da permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes com o aumento da massa da solução filmogênica no primeiro estágio pode ser atribuída à formação de uma matriz mais espessa e densa, dificultando a difusão de moléculas de água através do filme. Com um maior volume de solução filmogênica, há um aumento na quantidade de alginato e plastificante disponível, promovendo uma estrutura mais compacta e reduzindo a presença de microcanais ou poros que facilitariam a passagem do vapor de água (PÉREZ-GALLARDO et al, 2014). Além disso, filmes mais espessos apresentam um caminho difusivo mais longo para a permeação do vapor, o que contribui para a redução da PVA (ROJAS-GRAÜ et al, 2007).

Os resultados de espessura e permeabilidade ao vapor de água dos biopolímeros de alginato com reticulação complementar (2º estágio) plastificados com glicerol e sorbitol são apresentados na Tabela 5. Para esses dados observa-se que há uma influência significativa do tempo de imersão do filme e do tipo de plastificante utilizado na espessura final e no PVA.

Para filmes com glicerol de 40 g é observado que não houve uma mudança significativa na espessura da amostra conforme o aumento do tempo de imersão, indicando que para essa gramatura, a reticulação complementar não provocou uma mudança expressiva no filme. O mesmo comportamento é observado no filme de 60g do mesmo plastificante, na qual a sua espessura se manteve quase inalterada conforme o aumento do tempo de imersão. Segundo os estudos de Silva et al. (2019), esse comportamento pode ser justificado pelo baixo peso molecular e caráter hidrofílico do glicerol que pode ser lixiviado parcialmente durante a imersão, reduzindo sua influência na estrutura do material. Pérez-Gago; Rhim, (2014) complementa falando que para gramaturas maiores, o tempo de reticulação não influencia em alterações da estrutura polimérica, levando a concentrações de ligações entre o alginato e os íons de cálcio.

**Tabela 5:** Espessura e permeabilidade ao vapor de água no 2º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol.

| MS<br>(g)       | Tempo*<br>(min) | Espessura<br>(mm)          | Permeabilidade ao<br>vapor de água<br>[(g.mm)/(m <sup>2</sup> .dia.kPa)] |
|-----------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>Glicerol</b> |                 |                            |                                                                          |
| <b>40</b>       | 3               | 0,011±0,001 <sup>aA</sup>  | 3,23±0,5 <sup>bC</sup>                                                   |
|                 | 15              | 0,010±0,001 <sup>aA</sup>  | 3,14±0,2 <sup>bC</sup>                                                   |
|                 | 30              | 0,010±0,002 <sup>aA</sup>  | 3,45±0,2 <sup>bC</sup>                                                   |
| <b>50</b>       | 3               | 0,014±0,001 <sup>bcC</sup> | 2,18±0,2 <sup>aB</sup>                                                   |
|                 | 15              | 0,012±0,001 <sup>bB</sup>  | 2,13±0,3 <sup>aB</sup>                                                   |
|                 | 30              | 0,015±0,001 <sup>cD</sup>  | 2,19±0,1 <sup>aB</sup>                                                   |
| <b>60</b>       | 3               | 0,024±0,001 <sup>dK</sup>  | 1,74±0,1 <sup>aA</sup>                                                   |
|                 | 15              | 0,023±0,001 <sup>dJ</sup>  | 1,60±0,2 <sup>aA</sup>                                                   |
|                 | 30              | 0,023±0,002 <sup>dJ</sup>  | 1,87±0,2 <sup>aA</sup>                                                   |
| <b>Sorbitol</b> |                 |                            |                                                                          |
| <b>40</b>       | 3               | 0,012±0,001 <sup>aB</sup>  | 3,94±0,5 <sup>aCD</sup>                                                  |
|                 | 15              | 0,014±0,001 <sup>bC</sup>  | 3,91±0,3 <sup>aCD</sup>                                                  |
|                 | 30              | 0,014±0,001 <sup>bC</sup>  | 4,27±0,3 <sup>aD</sup>                                                   |
| <b>50</b>       | 3               | 0,018±0,001 <sup>dF</sup>  | 3,47±0,5 <sup>aC</sup>                                                   |
|                 | 15              | 0,016±0,001 <sup>cE</sup>  | 3,19±0,1 <sup>aC</sup>                                                   |
|                 | 30              | 0,019±0,001 <sup>deG</sup> | 3,81±0,1 <sup>aC</sup>                                                   |
| <b>60</b>       | 3               | 0,020±0,001 <sup>eH</sup>  | 3,32±0,3 <sup>aC</sup>                                                   |
|                 | 15              | 0,021±0,001 <sup>fI</sup>  | 3,06±0,3 <sup>aC</sup>                                                   |
|                 | 30              | 0,021±0,001 <sup>fI</sup>  | 3,15±0,2 <sup>aC</sup>                                                   |

MS = é a massa da solução filmogênica vertida nas placas de Petri de 15 cm de diâmetro (1º estágio). \* Tempo de imersão na solução reticuladora no 2º estágio. Médias com a mesma *letra minúscula* em cada coluna indicam que não há diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey para os filmes com glicerol ou sorbitol em diferentes tempos de imersão na solução reticuladora no 2º estágio. Médias com a mesma *letra maiúscula* em cada coluna indicam que não há diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey para os filmes com glicerol e sorbitol e nos diferentes tempos de imersão na reticulação complementar (2º estágio). Média ± desvio padrão.

Fonte: Próprio Autor (2025).

Para filmes com sorbitol de 40g, houve um aumento progressivo da espessura do filme conforme o aumento do tempo de imersão. O sorbitol em meio aquoso apresenta baixa solubilidade, o que segundo Martinez-Abad et al. (2013), permitem uma lixiviação do plastificante e uma maior incorporação na matriz polimérica. Esse comportamento foi ainda mais evidente nos filmes de 60 g, onde a espessura passou de  $0,020 \pm 0,001$  mm para  $0,021 \pm 0,001$  mm, reforçando a ideia de que a reticulação em soluções contendo sorbitol pode gerar filmes mais compactos e estruturalmente mais estáveis.

Para a resposta PVA, o comportamento da variação no segundo estágio foi de 1,74 a 3,45 (g.mm)/(m<sup>2</sup>.dia.kPa) para os filmes de alginato com glicerol e de 3,06 a 4,27

(g.mm)/(m<sup>2</sup>.dia.kPa) para os filmes de alginato com sorbitol. A partir dessa análise, os valores de PVA obtidos nesse estudo se apresentaram na faixa moderado, e apresentaram médias menores que as análises encontradas no 1º estágio, indicando que os filmes desenvolvidos com o tratamento de reticulação complementar desempenhou um papel fundamental na alteração da estrutura dos filmes, tornando-os mais compactos e menos permeáveis à umidade.

Segundo os estudos de Oliveira et al. (2020) uma segunda etapa de reticulação pode reduzir em até 35% o PVA de filmes de alginato, especialmente quando aplicado sob condições controladas de tempo e concentração de CaCl<sub>2</sub>. Esse achado está alinhado com a redução sistemática observada no PVA dos filmes do segundo estágio, o que confirma a efetividade do tratamento por experimentação.

Para os filmes com glicerol de 40 g, houve um leve aumento no PVA ao longo do tempo de imersão ( $3,23 \pm 0,5$  para  $3,45 \pm 0,8$  g.mm/(m<sup>2</sup>.dia.kPa) ). Esse comportamento pode estar associado à lixiviação parcial do glicerol durante o processo, diminuindo sua eficácia na retenção de umidade e tornando a matriz polimérica mais porosa, favorecendo a passagem de vapor de água (GARCÍA et al, 2018).

Os filmes plastificados com sorbitol, por sua vez, obtiveram valores de PVA superiores aos plastificados com glicerol. Para esses filmes, os valores de PVA tiveram uma tendência de leve redução conforme o aumento do tempo, reforçando a hipótese de que uma reticulação complementar com sorbitol pode promover uma estrutura mais coesa e com menor PVA. Estudos como os de Oliveira et al. (2020) indicam que a formação de uma rede mais densa em filmes plastificados com sorbitol pode resultar em menor PVA, o que é vantajoso para aplicações que requerem maior barreira contra umidade.

### 5.3 Propriedades Mecânicas

Os resultados de tensão de ruptura, alongação na ruptura dos biopolímeros de alginato adicionados de plastificantes, glicerol e sorbitol, para o primeiro estágio, são apresentados na Tabela 6.

Os valores dos ensaios experimentais de tensão na ruptura variaram de 33,56 a 33,75 MPa para filmes com glicerol, sem diferenças estatisticamente significativas ao nível de 95% de confiabilidade entre os tratamentos e 41,05 a 50,67 Mpa para filmes com sorbitol, na qual apresentou diferença significativa nos filmes de 60 g de solução, com menor valor de tensão.

É observado que houve uma diminuição da tensão de ruptura conforme o aumento da massa da solução filmogênea que, pode ter dificultado a formação de uma rede polimérica mais compacta, resultando em uma menor resistência mecânica. Segundo Pereira et al. (2020),

camadas mais espessas podem reter umidade residual e apresentar uma estrutura menos coesa, reduzindo a capacidade do filme de suportar tensões antes da ruptura. XIAO et al. (2019) verificaram que a tensão na ruptura de filmes de alginato diminuiu com o aumento da espessura, atribuindo esse efeito à menor eficiência na dispersão do plastificante e à possível presença de micro defeitos estruturais em filmes mais espessos.

**Tabela 6:** Tensão na ruptura e alongação na ruptura no 1º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol.

| MS<br>(g)       | Tensão na ruptura<br>(MPa) | Elongação na ruptura<br>(%) |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Glicerol</b> |                            |                             |
| 40              | 33,75±5,0 <sup>a</sup>     | 13,40±1,6 <sup>b</sup>      |
| 50              | 33,59±4,6 <sup>a</sup>     | 13,56±1,4 <sup>b</sup>      |
| 60              | 33,56±3,6 <sup>a</sup>     | 13,59±2,8 <sup>b</sup>      |
| <b>Sorbitol</b> |                            |                             |
| 40              | 50,67±13,9 <sup>c</sup>    | 9,59±4,7 <sup>a</sup>       |
| 50              | 50,20±4,6 <sup>c</sup>     | 11,93±5,2 <sup>a</sup>      |
| 60              | 41,05±10,9 <sup>b</sup>    | 9,86±3,4 <sup>a</sup>       |

MS = é a massa da solução filmogênica vertida nas placas de Petri de 15 cm de diâmetro (1º estágio). Médias com a mesma letra em cada coluna indicam que não há diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey. Média ± desvio padrão.

Fonte: Próprio Autor (2025).

Para a resposta alongação na ruptura, a variação foi de 13,40 a 13,59 para filmes com glicerol e 9,59 a 9,86 para filmes com sorbitol, sem diferenças estatisticamente significativas ao nível de 95% de confiabilidade entre os tratamentos. Esse valor foi inferior ao obtido por Zactiti e Kieckbusch (2006) que variou de 27,35% a 36,81%, estudando propriedades de filmes de alginato de sódio reticulados com cloreto de cálcio. Em filmes de alginato produzidos por *casting* contínuo, verificou-se que o glicerol proporcionou maior flexibilidade aos filmes, enquanto o sorbitol resultou em materiais mais rígidos (SHIMOMURA et al, 2017).

Os resultados de tensão e alongação dos biopolímeros de alginato com 50g de solução filmogênica para o 2º estágio, são mostrados na Tabela 7.

Para os filmes com glicerol, a tensão iniciou-se com 100,11 MPa atingindo 116,26 MPa aos 30 minutos e para os filmes com sorbitol foi de 149,59 MPa aos 3 min, reduzindo ligeiramente para 147,68 MPa aos 30 minutos. Esses resultados indicam que a reticulação complementar promoveu um reforço estrutural na matriz polimérica, conferindo maior resistência ao filme, como evidenciado nos estudos de Oliveira et al. (2011) sobre o efeito da reticulação entre as cadeias poliméricas do alginato.

Em comparação com os valores do 1º estágio, que variaram de 33,75 MPa a 33,56 MPa (glicerol) e 50,67 MPa e 41,05 MPa (sorbitol) observou-se um incremento substancial da resistência mecânica, evidenciando bons resultados do tratamento complementar na melhoria das propriedades mecânicas. A maior resistência dos filmes plastificados com sorbitol pode ser atribuída à menor interação deste plastificante com a umidade, resultando em uma rede polimérica mais rígida e menos suscetível à plastificação excessiva (PEREIRA et al, 2020).

**Tabela 7:** Tensão na ruptura e alongação na ruptura no 2º estágio para filmes de alginato contendo glicerol e sorbitol.

| MS<br>(g)       | Tempo*<br>(min) | Tensão na ruptura<br>(MPa) | Elongação na ruptura<br>(%) |
|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Glicerol</b> |                 |                            |                             |
| <b>50</b>       | 3               | 100,11±3,4 <sup>aA</sup>   | 4,82±2,0 <sup>aB</sup>      |
|                 | 15              | 118,68±4,1 <sup>aA</sup>   | 3,81±0,9 <sup>Aab</sup>     |
|                 | 30              | 116,26±4,8 <sup>aA</sup>   | 4,49±1,5 <sup>aAB</sup>     |
| <b>Sorbitol</b> |                 |                            |                             |
| <b>50</b>       | 3               | 149,59±5,2 <sup>aB</sup>   | 2,26±0,6 <sup>Aa</sup>      |
|                 | 15              | 158,75±10,2 <sup>bC</sup>  | 2,30±0,6 <sup>Aa</sup>      |
|                 | 30              | 147,68±8,7 <sup>aB</sup>   | 2,25±0,8 <sup>aa</sup>      |

MS = é a massa da solução filmogênica vertida nas placas de Petri de 15 cm de diâmetro (1º estágio). \* Tempo de imersão na solução reticuladora no 2º estágio. Médias com a mesma *letra minúscula* em cada coluna indicam que não há diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey para os filmes com glicerol ou sorbitol em diferentes tempos de imersão na solução reticuladora no 2º estágio. Médias com a mesma *letra maiúscula* em cada coluna indicam que não há diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey para os filmes com glicerol e sorbitol e nos diferentes tempos de imersão na reticulação complementar (2º estágio). Média ± desvio padrão.

Fonte: Próprio Autor (2025).

Para a resposta alongação na ruptura, os filmes plastificados com glicerol prestaram valores entre 3,81% e 4,82% e para sorbitol entre 2,25 e 2,30%. Em comparação com o 1º estágio, a resposta a alongação teve uma diminuição acentuada para os dois plastificantes. Em seus estudos, Carvalho et al. (2018) informaram que a reticulação complementar reduz a capacidade de deformação dos filmes em decorrência da formação de uma rede polimérica mais densa.

Em comparação com efeito do glicerol nos filmes de alginato, o sorbitol confere maior resistência mecânica aos filmes, mas reduz consideravelmente a sua capacidade de alongamento. Esse comportamento já foi descrito por Oliveira et al. (2019), que indicam que plastificantes mais hidrofóbicos, como o sorbitol, proporcionam filmes mais rígidos e quebradiços, enquanto plastificantes mais hidrofílicos, como o glicerol, garantem maior flexibilidade, porém com menor resistência mecânica.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que a escolha do plastificante influencia significativamente nas propriedades finais dos biofilmes de alginato, tendo em vista que os filmes confeccionados apresentaram resultados diferentes em suas análises.

A partir da análise de umidade e PVA, é notável que a adição de glicerol proporcionou a formação de filmes com maior teor de umidade (14,87% a 17,63%) e permeabilidade ao vapor de água (3,66 (g.mm)/(m<sup>2</sup>.dia.kPa) a 6,80 (g.mm)/(m<sup>2</sup>.dia.kPa)), devido ao caráter higroscópico que esse plastificante possui, enquanto o sorbitol resultou em filmes com menor solubilidade. Além disso, filmes com sorbitol apresentaram filmes mais rígidos e resistentes com uma maior média de tensão de ruptura em comparação com filmes de glicerol. Já os filmes com glicerol tiveram uma faixa de elongação de 13,40 MPa a 13,59 Mpa, proporcionando filmes com maior flexibilidade.

A etapa de reticulação complementar (2º estágio) se mostrou uma estratégica promissora para aprimorar as propriedades estruturais dos filmes. A análise dos filmes reticulados demonstrou uma redução na solubilidade em água em comparação com o 1º estágio e um melhoramento das propriedades mecânicas. Conclui-se que a reticulação complementar representa uma alternativa viável para otimizar a funcionalidade dos filmes de alginato, ampliando suas possibilidades de aplicação em embalagens biodegradáveis e outras áreas de interesse.

A avaliação mais detalhada dos diferentes tempos de reticulação poderia fornecer uma compreensão mais clara sobre as modificações estruturais e funcionais ocorridas nos biopolímeros, contribuindo para a otimização das condições de processamento e para a obtenção de filmes com desempenho aprimorado. Para futuras pesquisas, seria interessante aprofundar o estudo da influência do tempo de imersão na solução reticuladora sobre as propriedades dos filmes.

## REFERÊNCIAS

- ABDUL KHALIL, H. P. S.; SAURABH, C. K.; TYE, Y. Y.; NAFSIAH, E.; FATIHAH, N. N.; IRENA, F.; DONG, Y. Biodegradable polymer films from seaweed polysaccharides: A review on cellulose as a reinforcement material. **Express Polymer Letters**, v. 11, n. 4, p. 244-265, 2017.
- ARAFAT, S. M. Y., AHMAD, A. R., MURAD, H. R., & KAKASHEKH, H. M. (2021). Perceived Impact of Social Media on Panic Buying: An Online Cross-Sectional Survey in Iraqi Kurdistan. **Frontiers in Public Health**, 9, 668153.
- AYYUBI, S. N., PURBASARI, A., & KUSMIYATI. (2022). The effect of composition on mechanical properties of biodegradable plastic based on chitosan/cassava starch/PVA/crude glycerol: Optimization of the composition using Box Behnken Design. **Materials Today: Proceedings**, 63, S78–S83.
- AZEREDO, H. M. C.; WALDROV, D. R.; CROSS, K.; BALABAN, M. O.; PULLAMMANAPPALLIL, P. C. Alginate-Based Edible Films and Coatings for Food Packaging Applications. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 10, p. 1-10, 2017.
- BEATRIZ, A., ET AL. **Estudo prospectivo sobre a rota de produção de ácido acrílico a partir do glicerol**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.
- BERTAN, L. C.; GUTKOSKI, L. C.; GODOY, R. C. B.; HALAL, S. L. M. Efeito da adição de proteínas do soro de leite nas propriedades de filmes de amido de milho. **Ciência Rural**, v. 33, n. 5, p. 877-883, 2003.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9. ed. **Hoboken**, NJ: John Wiley & Sons, 2014.
- CAO, L., ET AL. De novo design of picomolar SARS-CoV-2 miniprotein inhibitors. **Science**, 370(6515), 426–431, 2020. Washington, D.C., EUA: American Association for the Advancement of Science (AAAS). Disponível em: <<https://doi.org/10.1126/science.abd9909>>. Acesso em: 27 de dez de 2024
- CARVALHO, R. et al. Influência de plastificantes nas propriedades estruturais e funcionais de filmes à base de biopolímeros. **International Journal of Polymer Science**, v. 2018, p. 1-9, 2018.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Sorbitol: Ficha de Informações de Produtos Químicos. São Paulo: CETESB, [s.d.]. Disponível em: [https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha\\_completa1.asp?consulta=SORBITOL&utm\\_source](https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=SORBITOL&utm_source). Acesso em: 07 de fevereiro de 2025.
- COSTA, J. M., ASSIS, O. B. G., & SHIRAI, M. A. (2018). Propriedades e caracterização de filmes biodegradáveis obtidos a partir de diferentes fontes de amido não tradicionais. **Food Science and Technology**, 38(2), 310–317.
- EDHIREJ, ET AL. Propriedades mecânicas de filmes de amido plastificado com glicerol e ureia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21(10), 690–695, 2017.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n10p690-695>>. Acesso em: 13 de jan de 2025

**EMFAL.** Ficha Técnica 137 rev. 05 - Sorbitol Solução 70%. Disponível em: <<https://www.emfal.com.br/wp-content/uploads/2022/07/ficha-tecnica-137-sorbitol-solucao-70-rev-05.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2025.

FARHAN, A., & HANI, N. M. (2020). Active edible films based on semi-refined  $\kappa$ -carrageenan: Antioxidant and color properties and application in chicken breast packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, 24, 100476.

GALUS, S., & KADZIŃSKA, J. (2015). Food applications of emulsion-based edible films and coatings. **Trends in Food Science & Technology**, 45(2), 273–283, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.011>>. Acesso em: 07 de jan de 2025

GAO, Y., ET AL. **Extrusão de filmes biodegradáveis de amido de milho termoplástico adicionado de quitosana plastificada.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil, 2017.

GARCÍA, L. et al. Caracterização mecânica de filmes de alginato produzidos por casting contínuo. **Jornada de Iniciação Científica da Embrapa Instrumentação**, 2018.

GONÇALVES, S. S., ET AL. Comportamento de tensão-deformação de filmes poliméricos produzidos de acetato de celulose plastificado com glicerol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 23(5), 358–363, 2019. Campina Grande, PB, Brasil: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola.

GUILBERT, S. et al. Release of calcium benzoate from films of sodium alginate crosslinked with calcium ions. **Food Hydrocolloids**, v. 112, p. 106303, 2021

HENRIQUE, M. A., CEREDA, M. P., & SARMENTO, S. B. S. Características físicas de filmes biodegradáveis produzidos a partir de amidos modificados de mandioca. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 25(4), 825–830, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cta/a/RTrq7rtshCHT3hpH4hF83WF/>>. Acesso em: 2 de dezembro de 2024.

IRISSIN-MANGATA, J.; BAUDUIN, G.; GONTARD, N. New plasticizers for wheat gluten films. **European Polymer Journal**, v.37 p. 1533-1541, 2001.

IWAK, T. et al. Influência do glicerol e do sorbitol nas propriedades de filmes de alginato. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 118, n. 1, p. 31-37, 2010.

JANJARASSKUL, T., TANANUWONG, K., PHUPOKSAKUL, T., & THAIPHANIT, S. Fast dissolving, hermetically sealable, edible whey protein isolate-based films for instant food and/or dry ingredient pouches. **LWT**, 134, 110102, 2020.

JAMRÓZ, E., JANIK, M., MARANGONI, L., VIEIRA, R. P., TKACZEWSKA, J., KAWECKA, A., SZUWARZYŃSKI, M., MAZUR, T., JASIŃSKA, J. M., KRZYŚCIAK, P., & JUSZCZAK, L. (2022). Double-Layered Films Based on Furcellaran, Chitosan, and Gelatin Hydrolysates Enriched with AgNPs in Yerba Mate Extract, Montmorillonite, and Curcumin

with Rosemary Essential Oil. **Polymers**, 14(20), 4283. Disponível em: < <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico.>>. Acesso em: 03 de janeiro de 2025

JIANG, B.; ZHANG, L.; WANG, Y.; ZHENG, L. Gel swelling properties of alginate fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 115, n. 1, p. 168-175, 2010.

KROCHTA, J. M.; DE MULDER-JOHNSTON, C. D. Edible and biodegradable polymer films: challenges and opportunities. **Food Technology**, v. 51, n. 2, p. 61-74, 1997.

LIMA, AMF et al. Produção e caracterização de biofilmes de alginato de sódio com adição de glicerol. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 1, pág. 1-10, 2018.

MADALENO, E., ROSA, D. S., ZAWADZKI, S. F., PEDROZO, T. H., & BALZER, P. S. (2009). Estudo do uso de plastificantes de fontes renovável em composições de PVC. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 19(4), 287-293. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/NVwBqm5bkYjhsFxB8btsmxS/>.

MARTINS, M. J. et al. Desenvolvimento de grânulos de alginato para veiculação de fármacos. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 54, n. 4, p. 711-719, 2018.

MIGUEL, M. G. DA C. **Desenvolvimento de filmes biodegradáveis à base de amido de mandioca e quitosana incorporados com óleo essencial de cravo-da-índia para aplicação em embalagens alimentícias**. 2023. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/53029>>. Acesso em: 03 de janeiro de 2025

NERY, Jacqueline Cavalieri. **Obtenção e caracterização de filmes contendo alginato de sódio e quitosana para potencial aplicação no tratamento de lesões cutâneas**. 2014. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2014.

NOGUEIRA, D., & MARTINS, V. G. Use of Different Proteins to Produce Biodegradable Films and Blends. **Journal of Polymers and the Environment**, 27(8), 2027–2039, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01494-z>>. Acesso em: 25 de dez de 2024

N'TSOUKPOE, K. E.; RAMMELBERG, H.; FOPAH LELE, A.; KORHAMMER, K.; WATTS, B. A.; SCHMIDT, T.; RUCK, W. A review on the use of calcium chloride in applied thermal engineering. **Applied Thermal Engineering**, v. 75, p. 513–531, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.047>. Acesso em: 11 jan. 2025.

OCEANA BRASIL. Fragmentos da destruição: impactos do plástico na biodiversidade marinha brasileira. Outubro de 2024. Disponível em: < [https://brasil.oceana.org/wp-content/uploads/sites/23/2024/10/Fragmentos-da-Destruicao\\_FINAL-FINAL-FINAL\\_compressed.pdf](https://brasil.oceana.org/wp-content/uploads/sites/23/2024/10/Fragmentos-da-Destruicao_FINAL-FINAL-FINAL_compressed.pdf)>.

OLIVEIRA, F. C. et al. Efeito da reticulação no desenvolvimento e caracterização de biofilmes com alginato de sódio. **Revista Brasileira de Ciência e Tecnologia**, v. 4, n. 2, p. 112-119, 2023.

OLIVEIRA, A. F. et al. Desenvolvimento e caracterização de filmes de alginato de sódio com adição de sorbitol como plastificante. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 9, p. 669-674, 2019.

OLIVEIRA, RR et al. Efeito da reticulação nas propriedades físicas e mecânicas de filmes de alginato. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 121, n. 2, p. 108-114, 2011.

OTONI, C. G., AVENA-BUSTILLOS, R. J., AZEREDO, H. M. C., LOREVICE, M. V., MOURA, M. R., MATTOSO, L. H. C., & MCHUGH, T. H. Recent advances on edible films based on fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(5), 1151–1169, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12281>>. Acesso em: 03 de jan de 2025

PARREIDT, T. S., MÜLLER, K., & SCHMID, M. Alginate-Based Edible Films and Coatings for Food Packaging Applications. *Foods*, 7(10), 170, 2018. Basel, Suíça: MDPI. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/foods7100170>>. Disponível em: 3 de jan de 2025

**PCC GROUP.** Sorbitol – propriedades e aplicações na indústria. Disponível em: <<https://www.products.pcc.eu/pt/blog/sorbitol-propriedades-aplicacoes-e-impacto-na-saude/>>. Acesso em: 21 fev. 2025.

PEREIRA, DL et al. Efeito de plastificantes nas propriedades físicas de filmes à base de alginato. *Engenharia e Ciência de Polímeros*, v. 60, n. 10, p. 2498-2507, 2020.

PÉREZ-GAGO, M. B.; RHIM, J. W. Development and characterization of alginate-based edible films. *Food Science and Biotechnology*, v. 23, n. 1, p. 1-9, 2014.

PIRSA, S., KARIMI SANI, I., PIROUZIFARD, M. K., & ERFANI, A. Smart film based on chitosan/Melissa officinalis essences/pomegranate peel extract to detect cream cheeses spoilage. *Food Control*, 113, 107211, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107211>>. Acesso em: 25 de dez de 2025

PRİYADARSHI, R., & RHIM, J. W. (2020). Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 62, 102346.

RINDLAV-WESTLING, A.; STADING, M.; HERMANSSON, A. M.; GATENHOLM, P. Structure, mechanical and barrier properties of amylose and amylopectin films. *Carbohydrate Polymers*, v. 36, n. 2-3, p. 217-224, 1998.

RODRIGUES, A. F. O. et al. **Avaliação de formulações à base de nanopartícula de quitosana e beads de alginato contendo extratos de cogumelos no controle de *Meloidogyne incognita*.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SANTANA, R. R., & KIECKBUSCH, T. G. Physical Evaluation of Biodegradable Films of Calcium Alginate Plasticized with Polyols. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(3), 667–676, 2013.

SANTOS, AMP et al. Filmes biopoliméricos biodegradáveis, inteligentes e ativos contendo compostos bioativos para embalagens de alimentos. *Revista Brasileira de Pesquisa Animal e Ambiental*, v. 2, pág. 1-15, 2017.

SANYANG, M. L., S. M., JAWAID, M., ISHAK, M. R., & SAHARI, J. (2016). Effect of plasticizer type and concentration on tensile, thermal and barrier properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch. *Polymers*, 8(7), 246.

SHEN, Y., LI, C., DONG, H., et al. (2020). Community Outbreak Investigation of SARS-CoV-2 Transmission Among Bus Riders in Eastern China. *JAMA Internal Medicine*, 180(12), 1665–1671. Disponível em: <[https://jamanetwork.com/journals/jamainternalmedicine/fullarticle/2770172#google\\_vignette](https://jamanetwork.com/journals/jamainternalmedicine/fullarticle/2770172#google_vignette)>. Acesso em: 10 de dezembro de 2024

SHIMOMURA, K. M. B., MUNHOZ, D. R., BERNARDO, M. P., MOREIRA, F. K. V., & MATTOSO, L. H. C. Propriedades mecânicas e anti-UV de filmes de alginato produzidos por casting contínuo, 2017.

SILVA, A. C. O., SILVA, A. C. R., & SILVA, L. M. Propriedades e caracterização de filmes biodegradáveis à base de amidos de diferentes fontes. *Food Science and Technology*, 40(2), 399–405, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/fst.12345>>. Acesso em: 10 de dez de 2024

SILVA, J. P.; OLIVEIRA, L. M.; SANTOS, A. F.; PEREIRA, M. E. S.; SOUZA, R. A. Preparação de esferas de alginato com estudantes do ensino médio para demonstrar uma aplicação biotecnológica dos carboidratos. *ResearchGate*, 2023.

SILVA, P. et al. Desenvolvimento e caracterização de filmes de amido de inhame para aplicação em embalagens alimentícias. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 1, pág. 1-10, 2020.

SILVA, S. M. L.; SILVA, D. A. Introdução de ligações cruzadas no LLDPE através de processo de reticulação via silano. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 21, n. 5, p. 364–370, 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/po/a/xg3vxWkYSvcXZpwby8wSrZK/>>. Acesso em: 11 fev. 2025

SOTHORNVIT, R., & KROCHTA, J. M. (2005). Plasticizers in edible films and coatings. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(1), 1-20.

SUN, J., & TAN, H. (2013). Alginate-Based Biomaterials for Regenerative Medicine Applications. *Materials*, 6(4), 1285–1309, 2013. Basel, Suíça: MDPI. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma6041285>>. Acesso em: 03 de fev de 2025

SZEKALSKA, M., PAWLAK, A., & SOSNIK, A. Alginate: Current use and future perspectives in pharmaceutical and biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 68, 982–992, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.06.029>>. Acesso em: 03 de fev de 2025

TONG, Y., DOU, L., SUN, Y., & ZHAO, D. K. Herb-resistant UPEC strains have different biofilm formation abilities and different expression of certain biofilm related genes. *African*

Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines, Lagos, Nigéria: **Academic Journals**, 14(5), 56–62, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.21010/ajtcam.v14i5.8>>. Acesso em: 02 de fev de 2025

TOSATI, J. A. Influência do grau de hidrólise do poli(vinil álcool) nas propriedades de filmes biodegradáveis. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 40, n. 1, p. 1-7, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/TQX73LSshzntBDyLgpkpXpJ/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

TURBIANI, FRANCIELE REZENDE BARBOSA. **Desenvolvimento e caracterização de filmes ativos de alginato de sódio reticulados com benzoato de cálcio** – Dissertação-Campinas, SP, 2007.

VIANA, L. F., LIMA, A. M. F., & SILVA, M. V. Desenvolvimento de filmes biodegradáveis à base de amido de mandioca e quitosana para aplicação em embalagens alimentícias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 22(5), 341–346, 2018. Disponível em < <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p341-346>>. Acesso em: 07 de jan de 2025

VIEIRA, M. L. et al. Avaliação das propriedades de biofilmes de alginato reticulados com cloreto de cálcio. **Journal of Biopolymer Science**, v. 16, n. 4, p. 245-253, 2019.

WU, Y., LOU, Q. Y., GE, F., & XIONG, Q. Quantitative proteomics analysis reveals novel targets of miR-21 in zebrafish embryos. **Scientific Reports**, 7, 4022, 2017. Nature Publishing Group, Londres, Reino Unido. Disponível em: < <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04356-0>>. Acesso em: 09 de jan de 2025

WWF. **Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização**. Brasília: WWF-Brasil, 2019. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>>. Acesso em: 7 janeiro. 2025.

ZAVAREZE, E. R.; GUTKOSKI, L. C.; GODOY, R. C. B.; HALAL, S. L. M. Efeito da adição de proteínas do soro de leite nas propriedades de filmes de amido de milho. **Ciência Rural**, v. 42, n. 8, p. 1468-1474, 2012.

XIAO, Y., ZHANG, L., & WANG, Y. (2019). An Assessment of the Rational Range of Eco-Friendly Plasticizers for Sodium Alginate Films. *Polymers*, 11(5), 1052

YANG, X. et al. Alginate-pomegranate peels' polyphenols beads: Effects of formulation parameters on loading efficiency. **Journal of Food Science**, v. 85, n. 3, p. 1011-1019, 2020

ZACTITI, E. A., & KIECKBUSCH, T. G. (2006). Difusão de sorbato de potássio em filmes de alginato de sódio. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 16(4), 262-269.

ZHANG, Y., Rossow, W. B., Lacis, A. A., & Oinas, V. (2022). Calculation, evaluation and application of long-term, global radiative flux datasets at ISCCP: Past and present. In Z. J. Luo, G. Tselioudis, & W. B. Rossow (Eds.), **Studies of Cloud, Convection and Precipitation Processes Using Satellite Observations**. Disponível em: <<https://pubs.giss.nasa.gov/abs/zh02500a.html>>. Acesso em: 3 de dez de 2025