



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO ACADÊMICO DO RECIFE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ALICE MARIA ZEFERINO DOS SANTOS**

**DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGEM ATIVA À BASE DE ALGINATO E ÓLEO  
ESSENCIAL DE LARANJA PARA CONSERVAÇÃO DE QUEIJO MUÇARELA**

**RECIFE**

**2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

**CENTRO ACADÊMICO DO RECIFE**

**ENGENHARIA QUÍMICA**

**ALICE MARIA ZEFERINO DOS SANTOS**

**Desenvolvimento de embalagem ativa à base de alginato e óleo essencial de laranja para conservação de queijo muçarela**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Recife, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia química.

**Orientador(a):** Profa. Dra. Glória Maria Vinhas

**Coorientador(a):** Ms. Marina Gomes Silva

**RECIFE**

**2025**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Alice Maria Zeferino dos.

Desenvolvimento de embalagem ativa à base de alginato e óleo essencial de laranja para conservação de queijo muçarela / Alice Maria Zeferino dos Santos. - Recife, 2025.

50 p. : il., tab.

Orientador(a): Glória Maria Vinhas

Coorientador(a): Marina Gomes Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

10.

1. Embalagens ativas. 2. Biopolímeros. 3. Alginato de sódio. 4. Óleo essencial de laranja. 5. Conservação de alimentos. 6. Sustentabilidade. I. Vinhas, Glória Maria. (Orientação). II. Silva, Marina Gomes. (Coorientação). IV. Título.

660 CDD (22.ed.)

ALICE MARIA ZEFERINO DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGEM ATIVA À BASE DE ALGINATO E ÓLEO  
ESSENCIAL DE LARANJA PARA CONSERVAÇÃO DE QUEIJO MUÇARELA**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Recife, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia química.

Aprovado em: 02/04/2025.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **GLORIA MARIA VINHAS**  
Data: 09/07/2025 16:22:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profª. Dr. Glória Maria Vinhas (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente  
 **PEDRO FERREIRA DE SOUZA FILHO**  
Data: 23/07/2025 15:28:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profª. Dr. Pedro Ferreira de Souza Filho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente  
 **IVO DIEGO DE LIMA SILVA**  
Data: 23/07/2025 15:14:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Ivo Diego de Lima Silva (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais, Adriana Santos e Manoel Zeferino por todo o amor, apoio e inspiração que sempre me deram. Esta conquista é nossa.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser minha luz e fortaleza em todos os momentos. Pela força nos dias difíceis, pela esperança renovada e por me guiar até aqui, tornando possível cada conquista.

Aos meus pais, Adriana Santos e Manoel Zeferino, pelo amor incondicional, apoio e incentivo incansável. Por acreditarem em mim até mesmo quando eu duvidei, e por me ensinarem, com cada gesto e palavra, o verdadeiro valor da dedicação e do esforço.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup>. Dra. Glória Maria Vinhas, pela paciência, orientação precisa e dedicação, fundamentais para a realização deste trabalho. À minha coorientadora, Marina Silva, pelos conselhos valiosos e contribuições enriquecedoras.

Ao Laboratório de Microbiologia Industrial e ao Laboratório de Processos Químicos (LPQ) do Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (LITPEG), pela colaboração e por me ajudarem nas análises necessárias.

À Gisely Alves e Maria da Conceição, que estiveram ao meu lado no dia a dia do laboratório, tornando cada desafio mais leve e colaborativo.

Aos meus amigos que compartilharam essa jornada acadêmica, Matheus Leonardo, Glenda Maria, Thaisa Maria, Eduardo Silva, Antônio Santos, Danilo Santos, Jhonatas Santos e Guilherme Henrique, pela amizade, apoio e por tornarem essa caminhada mais especial. Agradecimento especial ao Matheus, que sempre esteve ao meu lado quando precisei.

Às minhas amigas do ensino médio, Karolina Vitória e Bruna Fidelis, por estarem sempre ao meu lado, independentemente do tempo e da distância. Vocês são e sempre serão especiais na minha vida.

Ao meu irmão, Vinícius Zeferino, uma das minhas maiores inspirações para seguir lutando e a sua mãe, Kátia Leandro, por ter me ajudado com a impressão de livros no início do curso.

À minha tia, Regina Zeferino, por cada conselho valioso, pelo carinho constante e por sempre me fortalecer com suas palavras sábias.

A todos os amigos e professores que conheci no laboratório e que, de alguma forma, contribuíram para meu crescimento acadêmico e pessoal.

À FACEPE, pelo incentivo à pesquisa e pela oportunidade de continuar estudando.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Departamento de Engenharia Química, por todo conhecimento adquirido e pelas experiências que moldaram minha trajetória acadêmica.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado, oferecendo apoio, incentivo e palavras de encorajamento, minha mais sincera gratidão. Essa conquista não é apenas minha, mas de todos que fizeram parte dessa jornada.

“Somos prisioneiros de uma sociedade “descartável”. A única maneira de escapar é criar um design sustentável” (Philippe Starck).

## RESUMO

As embalagens ativas (EA) são sistemas inovadores que, além de protegerem os alimentos do meio externo, promovem interações benéficas, como a liberação de compostos antimicrobianos e antioxidantes, prolongando sua vida útil. Dentre os constituintes ativos utilizados nessas embalagens, os óleos essenciais se destacam por serem naturais e considerados seguros. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar filmes poliméricos à base de alginato de sódio, aditivados com óleo essencial de laranja doce (OEL), visando sua aplicação na conservação de queijo muçarela. Inicialmente, foi avaliada a atividade antimicrobiana do OEL para *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. Em seguida, os filmes foram produzidos pela técnica de *casting*, variando-se as concentrações de plastificante (2% e 20% de glicerol) e do óleo essencial. A caracterização dos filmes incluiu análises físico-químicas, mecânicas e microbiológicas. A partir das análises de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) e termogravimétrica (TGA), observou-se que a presença do OEL não comprometeu a estrutura química e nem a estabilidade térmica da matriz polimérica. Além disso, ensaios mecânicos de tração indicaram que os filmes plastificados com maior teor de glicerol apresentaram maior flexibilidade e alongamento, enquanto aqueles com menor teor apresentaram melhor resistência mecânica. Após a caracterização, os filmes foram aplicados no armazenamento de queijo muçarela, e a atividade antimicrobiana foi quantificada por unidades formadoras de colônia (UFC) ao longo de 9 dias de armazenamento refrigerado. Os resultados demonstraram que os filmes com 15% de OEL apresentaram redução significativa do crescimento microbiano, sugerindo que os compostos antimicrobianos migraram para o ambiente interno da embalagem, inibindo a proliferação de bactérias. Dessa forma, conclui-se que os filmes desenvolvidos possuem potencial para aplicação como embalagens ativas, contribuindo para aumentar a vida útil dos alimentos e reduzir o desperdício. O uso de biopolímeros reforça a proposta sustentável deste estudo, alinhando-se às crescentes demandas por embalagens biodegradáveis e funcionais.

**Palavras-chave:** Embalagens ativas; Biopolímeros; Alginato de sódio; Óleo essencial de laranja; Conservação de alimentos; Atividade antimicrobiana; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Active packaging (AP) systems provide beneficial interactions, such as the release of antimicrobial and antioxidant compounds, extending food shelf life. Among the active constituents used in these packages, essential oils stand out for being natural and non-toxic. In this context, this study aims to develop and characterize polymeric films based on sodium alginate, incorporated with orange essential oil (OEO), for application in mozzarella cheese preservation. Initially, the antimicrobial activity of OEO against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* was evaluated. Then, the films were produced using the casting technique, varying the concentrations of plasticizer (glycerol) and essential oil. The film characterization included physicochemical, mechanical, and microbiological analyses. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) and Thermogravimetric Analysis (TGA) indicated that the presence of OEO did not compromise the thermal stability of the films. Additionally, tensile mechanical tests showed that films with a higher glycerol content exhibited greater flexibility and elongation, while those with lower glycerol content demonstrated higher mechanical strength. After characterization, the films were applied to mozzarella cheese storage, and the antimicrobial activity was quantified by colony-forming units (CFU) over 9 days of refrigerated storage. The results showed that films containing 15% OEO significantly reduced microbial growth, suggesting that antimicrobial compounds migrated to the internal environment of the packaging, inhibiting bacterial proliferation. Thus, it is concluded that the developed films have great potential for application as active packaging, helping to increase food shelf life and reduce waste. The use of biopolymers reinforces the sustainable approach of this study, meeting the growing demand for biodegradable and functional packaging.

**Keywords:** Active packaging; Biopolymers; Sodium alginate; Orange essential oil; Food preservation; Antimicrobial activity; Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Teste de disco-difusão do OC para as bactérias: a) <i>Staphylococcus aureus</i> e b) <i>Escherichia coli</i>	27
Figura 2 - Embalagens ativas: a) sem OEL e b) com OEL	28
Figura 3 - Análise termogravimétrica (TGA) dos filmes de alginato puro e alginato + 15% OEL	31
Figura 4 - Espectros FT-IR para os filmes de alginato puro e com 15% de OEL	32
Figura 5 - Sistemas experimentais para análise da cinética de crescimento microbiano em queijo muçarela para: a) <i>Staphylococcus aureus</i> e b) <i>Escherichia coli</i>	34
Figura 6 - Índice de crescimento de <i>Escherichia coli</i> (6a) e <i>Staphylococcus aureus</i> (6b) no queijo muçarela em contato com os filmes de alginato puro e alginato + 15% de OE	35
Figura 7 - Análise microbiológica do queijo muçarela durante embalado 3, 6 e 9 dias, nas embalagens de alginato puro e alginato + 15% de OE para: a) <i>Escherichia coli</i> e b) <i>Staphylococcus aureus</i>	36

## LISTA DE ABREVIACÕES

AEL	Arginato de Etil Lauroil
AN	Ágar Nutritivo
CP	Corpos de Prova
DPPH	2,2-Difenil-1-Picrilhidrazil
DTG	Derivada Termogravimétrica
EPS	Poliestireno Expandido
FT-IR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
GRAS	Geralmente Reconhecidos como seguros
LPQ	Laboratório de Petroquímica
OEL	Óleo Essencial de Laranja
OMS	Organização Mundial da Saúde
PBAT	Poli (Butileno Adipato Co-Tereftalato)
PCL	Policaprolactonas
PEBD	Embalagens Plásticas de Polietileno de Baixa Intensidade
PHB	Polihidroxibutirato
PHB-HV	Polihidroxibutirato-Co-Valerato
PLA	Ácido Polilático
PVA	Poliacetato de Vinila
SF	Solução Filmogênica
TGA	Análise Termogravimétrica
UFC	Unidades Formadoras de Colônia
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UV	Radiação Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Embalagens convencionais .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Embalagens ativas .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Óleo essencial .....</b>	<b>18</b>
<i>2.3.1 Óleo essencial de laranja .....</i>	<i>20</i>
<b>2.4 Polímeros biodegradáveis .....</b>	<b>22</b>
<i>2.4.1 Alginato de sódio.....</i>	<i>22</i>
<b>23 OBJETIVOS .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>24</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 Avaliação das atividades antimicrobianas do óleo essencial de laranja doce .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 Preparação das embalagens ativas.....</b>	<b>25</b>
<b>4.3 Caracterização dos filmes poliméricos .....</b>	<b>26</b>
<i>4.3.1 Ensaios mecânico sde tração .....</i>	<i>26</i>
<i>4.3.2 Análise termogravimétrica .....</i>	<i>27</i>
<i>4.3.3 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR).....</i>	<i>27</i>
<b>4.4 Crescimento do microrganismo no queijo muçarela .....</b>	<b>28</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 Avaliação das atividades antimicrobianas do óleo essencial de laranja doce .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2 Preparação das embalagens ativas.....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 Caracterização dos filmes poliméricos .....</b>	<b>31</b>
<i>5.3.1 Ensaios mecânico sde tração .....</i>	<i>31</i>
<i>5.3.2 Análise termogravimétrica .....</i>	<i>32</i>

<i>5.3.3 Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)</i> .....	34
<b>5.4 Crescimento do microrganismo no queijo muçarela</b> .....	<b>35</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos minimamente processados e de alta qualidade tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para embalagens. Nesse cenário, as embalagens ativas (EA), que interagem diretamente com os alimentos para prolongar sua vida útil, destacam-se como alternativas promissórias. Esses sistemas permitem a liberação controlada de compostos ativos, como antimicrobianos e antioxidantes, essenciais para a manutenção da qualidade e segurança dos alimentos (Martinazzo *et al.*, 2020).

As embalagens ativas, além de exercerem as funções das embalagens convencionais, interagem com o produto e o ambiente, desempenhando um papel essencial na preservação e segurança dos alimentos. Essas embalagens prolongam a vida útil e mantêm as características físico-químicas e sensoriais dos produtos, alinhando-se a estratégias inovadoras e sustentáveis no setor de alimentos (Braga; Silva, 2017).

Entre os materiais poliméricos utilizados na produção dessas embalagens, o alginato se destaca por sua biodegradabilidade, biocompatibilidade e excelente capacidade de formar filmes. Derivado de algas marrons, esse biopolímero tem sido amplamente explorado nas indústrias alimentícias e farmacêuticas. Classificado como um polissacarídeo, o alginato desempenha funções importantes, como agente espessante, estabilizante, emulsificante, quelante, encapsulante e expansor, além de ser utilizado na formação de géis, filmes e membranas (Bhargava *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2022).

Os aditivos alimentares são substâncias adicionadas aos alimentos com o objetivo de preservar o sabor, melhorar a textura e prolongar a vida útil e podendo ser de origem química natural ou sintética. A utilização de aditivos alimentares industrialmente é aprovada por legislação e é recomendada pelo *Codex Alimentarius* (Codex Alimentarius, 2019; Tomaska, 2014), no que diz respeito à segurança alimentar, os aditivos se destacam entre assuntos controversos quando o assunto é saúde. Sendo assim, uma das formas de avaliação e controle do uso de aditivos alimentares no âmbito mundial é baseada no controle da Ingestão Diária Aceitável (IDAs), desenvolvida pelo Comitê do Códex em Aditivos Alimentares da Organização Mundial da Saúde (OMS)/Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) (Honorato *et al.*, 2013).

Para o desenvolvimento de embalagens ativas, algumas pesquisas buscam utilizar aditivos ativos naturais, como os óleos essenciais, devido às suas propriedades antimicrobianas e antioxidantes. Esses compostos, extraídos de fontes vegetais, podem atuar na preservação de alimentos, prolongando sua vida útil e diminuindo a necessidade de

conservantes sintéticos. Além disso, a incorporação de óleos essenciais em matrizes poliméricas tem sido desenvolvida como uma estratégia sustentável para minimizar o desperdício alimentar e atender à demanda por embalagens ecológicas e seguras para o consumo (Czakert *et al.*, 2024). Dentre os óleos essenciais, o óleo essencial de laranja (OEL), rico em compostos como limoneno e ácidos fenólicos, é conhecido por suas propriedades antimicrobianas e antioxidantes, tornando-o um aditivo eficaz em sistemas de embalagem ativas. Estudos recentes indicam que a combinação de biopolímeros e óleos essenciais oferece uma solução eficaz para reduzir o crescimento microbiano em alimentos altamente perecíveis, como o queijo muçarela (Ferronato; Rossi, 2018).

O queijo é um dos derivados lácteos mais consumidos mundialmente. Em 2019, o mercado global desse produto registou um crescimento de 2,3%, marcando o terceiro ano consecutivo de alta após dois anos de declínio. Entre 2013 e 2019, o valor de mercado apresentou um crescimento médio anual de 1,1%, mantendo uma tendência estável, com pequenas variações ao longo do período. O aumento mais significativo ocorreu em 2017, quando o valor do mercado registrou um crescimento de 7,1%. Em 2019, o mercado global atingiu seu maior nível no período analisado (Milkpoint, 2021).

Os Estados Unidos lideraram o *ranking* dos maiores consumidores de queijo, com um consumo de 5,3 milhões de toneladas, representando 24% do volume global. O consumo norte-americano é mais que o dobro do registrado pela Alemanha, o segundo maior consumidor, com 2,2 milhões de toneladas, seguido pela França, com 2,0 milhões de toneladas e uma participação de 6,4%. Entre 2013 e 2019, o consumo nos EUA apresentou uma taxa média anual de crescimento de 2,5%, enquanto a Alemanha registrou 4,4% e a França 1,3% (ABIQ, 2021). Impulsionado pela crescente demanda global por queijos, o mercado deve continuar a se expandir nas próximas décadas, com previsões proporcionais a uma Taxa de Crescimento Anual Composta de 1,8% entre 2019 e 2030, elevando o volume global para 31 milhões de toneladas até o final do período (ABIQ, 2021).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e caracterizar embalagens ativas à base de alginato de sódio, incorporado com OEL, para a conservação de queijos. Essa iniciativa buscou atender à crescente demanda por soluções sustentáveis, promovendo o uso de materiais biodegradáveis e funcionais que contribuam para a redução do desperdício de alimentos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Embalagens convencionais

O conceito de embalagem é dinâmico e varia ao longo da cadeia de produção e distribuição. Para o comprador, é um meio de satisfazer o desejo de consumo; para o *marketing*, uma ferramenta para atrair a compra do produto; para o *design*, uma solução para preservar a integridade do item; e, para a engenharia industrial, um recurso essencial para garantir a segurança durante o armazenamento e transporte (Landin *et al.*, 2016). As embalagens podem ser classificadas em três tipos: primárias, que entram em contato direto com o alimento; secundárias, utilizadas para agrupar e proteger as embalagens primárias contra vibrações e choques; e terciárias, destinadas ao transporte e proteção das embalagens primárias e secundárias ao longo da distribuição (Landin *et al.*, 2016; Santos; Yoshida, 2011).

Segundo Roy *et al.* (2022), entre as abordagens tecnológicas para esterilização empregadas na criação de embalagens modernas, destacam-se os tratamentos químicos, métodos baseados em plasma, radiação ultravioleta (UV) e a aplicação de revestimentos e filmes específicos. Em especial, as tecnologias de embalagens ativas (EA) e embalagens inteligentes ganharam amplo reconhecimento por suas funções avançadas. De acordo com o Decreto-Lei N° 986/69, embalagem é qualquer forma pela qual o alimento seja guardado, acondicionado, envasado ou empacotado (BRASIL, 1969). Em dicionários, embalagem é definida como o que se adequa para embalar, ou seja, uma proteção externa ao produto destinada à sua apresentação no mercado (Michaelis, 2015; Dicio, 2022). Já para a Vigilância Sanitária, embalagem refere-se ao recipiente, embalagem ou pacote destinado a garantir a conservação e facilitar o manuseio e transporte dos alimentos (BRASIL, 2002).

### 2.2 Embalagens ativas

As embalagens ativas interagem diretamente com o alimento ou o ambiente interno da embalagem, promovendo melhorias em sua qualidade, prolongando a vida útil e economizando desperdícios, enquanto as embalagens inteligentes monitoram condições de temperatura, umidade ou frescor, fornecendo informações essenciais sobre o estado do produto, o que contribui para uma melhor gestão logística e maior confiança do consumidor (Amin *et al.*, 2022).

O conceito de “embalagem ativa” foi introduzido por Labuza e Breene em 1989, para designar embalagens que desempenham funções adicionais às tradicionais, auxiliando na preservação dos alimentos (Almada *et al.*, 2022). Elas não apenas protegem contra fatores externos, mas também interagem com o alimento, retardando processos de deterioração através de mecanismos específicos, como liberação ou absorção de substâncias (Santos; Yoshida, 2011).

As embalagens ativas (EA) desempenham um papel importante na extensão do frescor e da qualidade dos alimentos, atuando por meio de interações diretas ou indiretas. No contato direto, o alimento interage diretamente com o revestimento ativo da embalagem, que pode liberar ou absorver compostos benéficos. Já na interação indireta, ocorre a liberação ou absorção de compostos pelo headspace, que é o espaço de ar entre o alimento e o interior da embalagem. Esse espaço permite que os compostos voláteis ativos se difundam, contribuindo para a preservação do produto sem contato físico direto (Almada *et al.*, 2022; Landin *et al.*, 2016; Severo *et al.*, 2021). Essas tecnologias aumentam a vida útil do produto enquanto mantêm suas características sensoriais, qualidade e segurança, sendo desenvolvidas de forma a atender à legislação vigente e às especificidades de cada alimento (Martinazzo *et al.*, 2020).

Essas embalagens podem ser classificadas em sistemas de absorção (absorvedores) e sistemas de liberação (emissores). Os emissores incluem embalagens liberadoras de agentes antioxidantes, antimicrobianos e emissores de CO<sub>2</sub> (Flórez *et al.*, 2022). Esses sistemas buscam minimizar os efeitos deletérios, como a oxidação de alimentos causada pela exposição ao oxigênio, luz ou calor. A oxidação afeta a qualidade sensorial e pode estar associada ao desenvolvimento de doenças crônicas, como câncer e distúrbios cardiovasculares (Nawaz *et al.*, 2022).

Ademais, a contaminação microbiana também representa um desafio significativo. Dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) indicam que aproximadamente 600 milhões de pessoas adoecem e 420 mil morrem anualmente devido ao consumo de alimentos contaminados (Pandey *et al.*, 2022). Bactérias como *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Campylobacter jejuni*, *Salmonella* spp., e *Clostridium* spp., são frequentemente responsáveis por contaminações, especialmente em produtos frescos e de origem animal (Pandey *et al.*, 2022).

Além disso, as EA atendem às exigências do mercado por produtos de alta qualidade e maior durabilidade. Um exemplo é o filme de embalagem ativa desenvolvido por Jiang *et al.* (2022), elaborado a partir de uma matriz de quitosana e goma guar, enriquecida com extrato da casca verde de noz. Esse material foi utilizado na conservação de maçãs minimamente

processadas, com o extrato atuando como substância ativa para potencializar a atividade antioxidante dos filmes. O resultado foi uma melhora no desempenho na inibição do escurecimento e no controle do crescimento microbiano do alimento, durante um período de armazenamento de 10 dias.

As embalagens ativas antimicrobianas utilizam compostos antimicrobianos que interagem diretamente com os alimentos, prevenindo alterações na qualidade dos produtos. Esses compostos podem ser obtidos de fontes naturais, como extratos vegetais e óleos essenciais, incluindo os de orégano, tomilho, alecrim e gengibre. Além disso, também são amplamente utilizados compostos de origem sintética, como nanopartículas de prata, ouro, zinco e dióxido de enxofre (Ongaratto; Vital; Prado, 2022; Sarantópoulos; Cofcewicz, 2016; Sary *et al.*, 2022).

No estudo conduzido por Maciel *et al.* (2025), foi avaliado o uso de embalagens biodegradáveis e ativas para o armazenamento de carne bovina da posta branca (*Semitendinosus*). Os resultados mostraram que os filmes biodegradáveis e ativos, compostos por alginato de sódio e papaína, não apenas preservaram a textura da carne, mas também influenciaram a maturação de forma significativa. As carnes acondicionadas com esses filmes apresentaram diferenças significativas em relação ao processo natural de tenderização, o que indicou que a presença da enzima papaína contribuiu para a redução da firmeza, resultando em uma carne mais macia. Esse estudo sugere que embalagens ativas, além de exercerem funções de preservação, podem ser eficazes no controle da textura e qualidade dos produtos cárneos durante o armazenamento.

Silva *et al.* (2021) avaliaram a potencialidade da aplicação de extratos vegetais do cajueiro (*Anacardium occidentale* Linn) e da jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) em embalagens de poli (butileno adipato co-tereftalato) – (PBAT) como aditivo antimicrobiano e antioxidante, chegando à conclusão de que a incorporação de uma concentração de 0,0170 g.mL<sup>-1</sup> do extrato do cajueiro nos filmes de PBAT apresentou atividade antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus*.

Istiqomah *et al.* (2022) desenvolveram uma nova formulação de embalagem ativa ao incorporar óleo essencial de capim-limão em filmes de quitosana/amido. A adição do óleo essencial à matriz polimérica resultou em propriedades antimicrobianas e antioxidantes aprimoradas nos filmes. O estudo revelou que bactérias Gram-positivas, como *Staphylococcus aureus* e *Staphylococcus epidermidis*, apresentaram maior sensibilidade às substâncias antimicrobianas em comparação com as Gram-negativas, como *Escherichia coli* e *Salmonella typhi*.

Silva (2019) investigou a eficiência de absorvedores de oxigênio do tipo Ageless<sup>®</sup>, compostos principalmente por pó de ferro, em alfaces minimamente processadas das cultivares crespa e americana. Esses absorvedores estavam incorporados no material plástico das embalagens utilizadas. O sistema ativo demonstrou eficácia na preservação das características sensoriais das hortaliças, como coloração, ausência de limosidade e murchamento, durante os três primeiros dias de armazenamento a 7°C. O estudo concluiu que a adoção de embalagens ativas com remoção de oxigênio é uma solução eficiente, apresentando baixo custo e simplicidade de uso, sendo uma alternativa viável para melhorar a conservação de hortaliças minimamente processadas.

Sendo assim, as embalagens são consideradas ativas quando, além de oferecerem a proteção tradicional e atuarem como barreira inerte ao ambiente externo, desempenham funções adicionais ao interagirem de forma contínua com o alimento e o ambiente ao seu redor. Esse tipo de embalagem inclui componentes ativos, como antioxidantes, antimicrobianos, eliminadores de oxigênio, emissores/absorvedores de dióxido de carbono, reguladores de umidade, liberadores de sabor e absorvedores de compostos específicos, os quais podem retardar ou inibir processos de interferência microbiana, enzimáticos e oxidativa (Ahmed *et al.*, 2017; Alparslan; Baygar, 2017; Yildirim *et al.*, 2018).

### 2.3 Óleo essencial

Os componentes ativos, especialmente antioxidantes e antimicrobianos, podem ser divididos em naturais e sintéticos. Os naturais, obtidos de fontes vegetais, incluem óleos essenciais (OE), estes principais componentes apresentam propriedades antimicrobianas e antioxidantes reconhecidas na literatura científica (Sarfraz *et al.*, 2021). Exemplos de substâncias antimicrobianas naturais obtidas de óleos essenciais incluem os derivados de cravo, orégano, tomilho e alecrim, que podem ser incorporados em materiais de embalagem biodegradáveis (Sani *et al.*, 2021).

Segundo Ferreira (2015), devido as suas variadas funções, os aditivos químicos são cada vez mais inseridos precocemente e de forma elevada na alimentação trazendo sérios problemas de saúde a curto e longo prazo principalmente para as crianças. Pereira *et al.* (2015) ressaltam que estudos têm comprovado que tais aditivos podem apresentar toxicidade se não forem utilizados dentro de seus limites de segurança, podendo oferecer riscos, em especial, aos alérgicos a essas substâncias.

Os óleos essenciais são definidos como misturas complexas de compostos botânicos, incluindo fenóis, terpenos e terpenoides, com atividades potentes antimicrobianas e antioxidantes (Alizadeh-sani *et al.*, 2020; Kamkar *et al.*, 2021). Classificados como “geralmente reconhecidos como seguros” (GRAS), esses compostos podem ser usados em materiais de embalagem ativos como ingredientes funcionais (Sani *et al.*, 2021).

Diversos estudos relacionam a aplicação de óleos essenciais, como os de capim-limão, canela e *Ziziphora clinopodioides*, em revestimentos comestíveis e embalagens biodegradáveis. Essas substâncias, bem como nanopartículas como óxidos de cobre e zinco, demonstraram propriedades antibacterianas significativas quando incorporadas em matrizes poliméricas como alginato de sódio, poli(3-hidroxiobutirato-co-3-hidroxivalerato) e quitosana (Alarcón-Moyano *et al.*, 2017; Castro Mayorga *et al.*, 2018; Rezaei; Shahbazi, 2018).

A incorporação de óleos essenciais nas embalagens pode melhorar suas propriedades físico-químicas e mecânicas, além de ampliar as atividades antimicrobianas e antioxidantes (Ehsani, 2018; Sani *et al.*, 2021). Por exemplo, o óleo essencial de orégano, cujo principal composto ativo é o carvacrol, apresenta ação antimicrobiana que aumenta a permeabilidade das paredes celulares microbianas, levando à sua morte (Yildirim *et al.*, 2018; Sani *et al.*, 2021).

Além disso, óleos essenciais com aditivos inorgânicos, como nanopartículas de óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), óxido de zinco (ZnO) e prata (Ag), apresentam eficácia na redução da oxidação lipídica e no controle microbiano. Por exemplo, o óleo essencial de alecrim associado a nanopartículas de TiO<sub>2</sub> em biopolímeros apresentou resultados promissores (Alizadeh-Sani *et al.*, 2020).

Diversos estudos exploram revestimentos comestíveis e biodegradáveis que incluem ativos como hortelã, extratos de casca de uva, timol, ácido ferúlico e tirosol incorporados em matrizes como goma guar, gelatina, quitosana e ácido polilático (PLA), destacando suas propriedades antioxidantes (Bashir *et al.*, 2018; Benbettaïeb *et al.*, 2018).

A encapsulação de óleos essenciais em β-ciclodextrinas, por sua vez, mostrou aumentar a vida útil e a qualidade de tomates-cereja (Buendía-Moreno *et al.*, 2019). Por outro lado, embalagens contendo óleos essenciais de palmarosa ou anis-estrelado demonstraram no aumento da eficácia do prazo de validade e na redução do crescimento de *Penicillium expansum* em maçãs (Maraschin *et al.*, 2019).

Além disso, os impactos ambientais causados pelo uso excessivo de plásticos convencionais têm gerado preocupações crescentes em escala global, incentivando as indústrias de embalagens a adotarem práticas mais sustentáveis. Nesse contexto, a busca por

polímeros biodegradáveis, obtidos a partir de fontes renováveis, tem se destacado como uma solução promissora. Esses materiais apresentam a vantagem de se degradarem em condições naturais, reduzindo o acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente e contribuindo para a mitigação de problemas como a poluição dos oceanos e a emissão de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida (Rangaraj *et al.*, 2021).

### 2.3.1 Óleo essencial de laranja

O óleo essencial de laranja pode ser extraído a partir de resíduos do processamento das frutas, cujo principal componente é o limoneno (Ferronato; Rossi, 2018), um hidrocarboneto cíclico insaturado classificado como um terpeno e que possui nomenclatura IUPAC 1-metil-4-isopropenilciclohex-1-eno (PubChem, 2022). Este, apresenta fórmula molecular  $C_{10}H_{16}$  e pode ser encontrado de duas formas na natureza, visto que se trata de um isômero, o R-limoneno e o S-limoneno (Azambuja, 2021).

Diversos estudos na literatura apontam que o limoneno apresenta significativa atividade antioxidante (Ferronato; Rossi, 2018) e possui reconhecido potencial quimiopreventivo contra determinados tipos de câncer (Sun, 2007; Yang *et al.*, 2017). Além disso, pesquisas conduzidas por Zhang, Liu e Tao (2009) demonstram o potencial antimicrobiano intrínseco do limoneno, mesmo quando diluído, conforme evidenciado em ensaios laboratoriais preliminares com cepas bacterianas dos gêneros *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Bacillus subtilis*, o que reforça a necessidade de investigações mais aprofundadas. Complementando esses achados, Flores *et al.* (2019) também identificaram ação antibacteriana do limoneno contra *Salmonella typhimurium*.

Apesar das diversas propriedades funcionais atribuídas ao limoneno, os estudos voltados ao beneficiamento do óleo essencial de laranja ainda são limitados, sobretudo no que se refere à purificação e ao isolamento desse composto para aplicações mais específicas (Siddiqui *et al.*, 2022). Diante desse cenário, torna-se necessário explorar estratégias que viabilizem sua incorporação de forma eficaz em matrizes seguras e sustentáveis, como os biopolímeros. Esses materiais vêm ganhando destaque no desenvolvimento de sistemas de liberação controlada e revestimentos comestíveis, especialmente por suas características de biodegradabilidade, biocompatibilidade e origem renovável, o que os torna alternativas promissoras para aplicação em embalagens ativas com potencial antimicrobiano e antioxidante (Abdillah; Charles, 2021).

## 2.4 Polímeros biodegradáveis

Os biopolímeros são materiais poliméricos produzidos a partir de fontes renováveis, como resíduos de milho, cana-de-açúcar e outros subprodutos. Esses materiais possuem propriedades similares às dos plásticos convencionais, sendo exemplos notáveis a celulose, o amido, a quitina e as proteínas. Nos últimos anos, os biopolímeros de origem natural têm recebido atenção significativa devido à sua abundância e propriedades versáteis, como biocompatibilidade, biodegradabilidade, flexibilidade, não toxicidade e renovabilidade (Bilal; Iqbal, 2019).

Os polímeros biodegradáveis, por sua vez, são materiais que se degradam em um período menor em comparação aos polímeros sintéticos. Esse processo ocorre pela ação de microrganismos naturais, como bactérias, fungos e algas, permitindo sua decomposição em semanas ou meses, desde que em condições favoráveis. Esses polímeros podem ser derivados de fontes renováveis, como milho, celulose, batata e cana-de-açúcar, ou sintetizados por microrganismos a partir de precursores químicos, como o ácido butírico e o ácido valérico, que dão origem ao polihidroxibutirato (PHB) e ao polihidroxibutirato-co-valerato (PHB-HV), respectivamente. Além disso, podem ser obtidos de fontes animais, como quitina e quitosana, ou de fontes fósseis, como petróleo. Exemplos de polímeros biodegradáveis derivados do petróleo incluem policaprolactonas (PCL), poliésteramidas e copoliésteres alifáticos e aromáticos (Brito *et al.*, 2011).

Entre as fontes de biomassa utilizadas na produção de filmes poliméricos, destaca-se o amido de araruta (*Maranta arundinacea*), um tubérculo de baixo valor comercial e reduzido teor de proteínas e lipídios, mas com elevado conteúdo de amilose, essencial para o desenvolvimento de embalagens alimentícias (Abdillah; Charles, 2021). Considerando essas propriedades, Tarique *et al.* (2021) desenvolveram biopolímeros de amido de araruta reforçados com fibras da própria planta, aplicáveis como materiais para embalagens de alimentos.

Apesar da vasta disponibilidade de fontes naturais para produção de polímeros biodegradáveis, esses materiais ainda enfrentam limitações, como desempenho mecânico e propriedades de barreira inferiores aos polímeros petroquímicos (Rai *et al.*, 2021). Para superar essas limitações, métodos como tratamentos térmicos, irradiação gama, modificações químicas e adição de aditivos estão sendo amplamente pesquisados (Khalil *et al.*, 2018). Além disso, a produção de copolímeros e blendas tem se mostrado uma alternativa eficaz para aprimorar as propriedades dos polímeros naturais. Por exemplo, blendas de amido e

poliacetato de vinila (PVA) incorporadas com nanocristais de celulose como reforço resultaram em melhorias significativas nas propriedades mecânicas e de barreira, tornando-se adequadas para aplicações em embalagens alimentícias (Oliveira *et al.*, 2020).

Souza *et al.* (2023) desenvolveram filmes ativos de PVA incorporados com nitrito de sódio, um conservante amplamente utilizado em produtos cárneos, com o objetivo de aplicá-los como embalagens para carne suína. Os resultados indicaram que a adição do nitrito de sódio não alterou as propriedades físicas do polímero e que os filmes apresentaram potencial para uso como embalagens ativas em carne suína *in natura*.

Wang *et al.* (2023) produziram filmes de PVA contendo antioxidantes macromoleculares lineares. Por meio do método baseado no radical livre 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), verificaram que os filmes com antioxidantes exibiram bom desempenho antioxidante, demonstrando sua viabilidade como embalagens ativas.

No estudo realizado por Wu *et al.* (2021), foram preparados filmes de PVA-amido com a incorporação de arginato de etil lauroil (AEL), visando prolongar a vida útil de alimentos frescos. Os resultados mostraram que a adição de AEL reduziu ligeiramente a resistência à tração, mas aumentou significativamente a taxa de alongamento na ruptura dos filmes. Esses efeitos foram atribuídos à interação entre os plastificantes e à sua agregação sinérgica.

Entre as vantagens dos polímeros biodegradáveis está a possibilidade de produção em escala industrial, especialmente em países como o Brasil, que dispõem de abundantes recursos de milho, batata e cana-de-açúcar. Além disso, esses materiais possuem boa resistência mecânica, baixa toxicidade e tempo de degradação mais curto em relação aos plásticos tradicionais (Fechini, 2013). O processo de degradação de um polímero ocorre pela cisão de cadeias poliméricas e alterações na estrutura do retículo cristalino, influenciado por fatores químicos, ambientais e estruturais. Polímeros com maior cristalinidade, como a celulose, apresentam menor velocidade de degradação em comparação a materiais amorfos, como o amido, que possuem menor empacotamento molecular (Fechini, 2013).

Embora os polímeros biodegradáveis possuam grande potencial para aplicações diversificadas, incluindo embalagens, ainda enfrentam desafios relacionados ao custo elevado e à baixa adoção no mercado brasileiro, especialmente quando comparados às resinas petroquímicas convencionais (Landim *et al.*, 2016).

#### 2.4.1 Alginato de sódio

O alginato de sódio é um polissacarídeo comumente utilizado para formular revestimentos comestíveis devido à sua biodegradabilidade, biocompatibilidade, baixa toxicidade e propriedades adequadas para formar filmes. Esse composto químico também tem sido incorporado em diversos produtos alimentícios devido às suas propriedades de geleificação e espessamento (Nair *et al.*, 2020; Shigematsu *et al.*, 2018).

Nos últimos anos, os materiais formadores de revestimentos mais estudados para aplicação em alimentos incluem celulose (Francisco *et al.*, 2020), gelatina (Temiz; Özdemir, 2021), goma arábica (Anjum *et al.*, 2020; Etemadipoor *et al.*, 2019), carboximetilcelulose (Khodaei; Hamidi-Esfahani, 2019; Li *et al.*, 2020), quitosana (Barragán-Menéndez *et al.*, 2020; Braga *et al.*, 2019; De Oliveira *et al.*, 2017; De Oliveira *et al.*, 2020; Macedo *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2018) e alginato de sódio (Alvarez *et al.*, 2021; Bambace *et al.*, 2019; Parreidt *et al.*, 2019; Shigematsu *et al.*, 2018; Speranza *et al.*, 2018; Tapia *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2020).

O alginato de sódio é um dos materiais mais utilizados e tem sido destacado por suas propriedades de sustentabilidade, biodegradabilidade, biocompatibilidade e baixa toxicidade. Trata-se de um polímero linear extraído de algas marinhas (Gao *et al.*, 2017), cuja estrutura é composta por frações de  $\alpha$ -L-guluronato ligadas por ligações (1 $\rightarrow$ 4) e  $\beta$ -D-manuronato ligadas por ligações (1 $\rightarrow$ 4) (Nair *et al.*, 2020).

Devido à sua estrutura química e propriedades de geleificação, o alginato de sódio é amplamente utilizado na produção de revestimentos de alta qualidade (Blanco-Pascual *et al.*, 2014). Esses revestimentos são transparentes, uniformes, solúveis em água (Mahcene *et al.*, 2020) e apresentam baixa permeabilidade a gorduras, óleos e oxigênio. Essa característica permite retardar a oxidação lipídica e a perda de umidade em diversos vegetais e frutas, contribuindo para a redução da perda de peso e do crescimento microbiano (Xu *et al.*, 2020).

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar filmes de embalagem ativa à base de alginato de sódio com incorporação de óleo essencial de laranja doce, aplicados à conservação do queijo muçarela, visando seu potencial antimicrobiano contra *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*.

#### 3.2 Objetivos Específicos

- Verificar a atividade antimicrobiana do OEL;
- Avaliar as propriedades físico-químicas, mecânicas e antimicrobianas dos filmes produzidos;
- Investigar a eficiência do filme na preservação das suas características;
- Analisar a liberação controlada de substâncias presentes no óleo essencial de laranja e sua eficiência no controle do crescimento microbiano;
- Estudar o crescimento microbiano em função do tempo de armazenamento das amostras de queijo muçarela embaladas com os filmes ativos e sua liberação controlada do OEL;
- Estudar o impacto do filme na vida útil do queijo muçarela armazenado sob condições controladas.

## 4 METODOLOGIA

As metodologias utilizadas na produção dos filmes ativos, bem como suas caracterizações e aplicações, estão descritas nesta seção. Nela também estão contidos os materiais e equipamentos que foram utilizados no desenvolvimento desse trabalho.

### 4.1. Avaliação das atividades antimicrobianas do óleo essencial de laranja doce

A atividade antimicrobiana do óleo essencial de laranja doce (OEL), da marca BioEssência, foi avaliada por meio do teste de disco-difusão, utilizando diferentes cepas de bactérias. Inicialmente, as atividades antimicrobianas foram testadas contra as bactérias *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. Para isso, os inóculos bacterianos foram ajustados para uma turbidez de 0,5 na escala de McFarland. Em seguida, 0,1 mL da suspensão bacteriana foi colocada em placas de Petri contendo ágar nutritivo (AN), sendo distribuída uniformemente com uma alça de Drigalski, em triplicata. Após isso, os discos de papel foram embebidos no OEL e colocados nas placas de Petri, que foram acondicionadas em uma estufa a uma temperatura de 35 °C por 48 horas. Após esse período de incubação, foi avaliado se houve formação de halo de inibição e medido o seu diâmetro.

### 4.2 Preparação de embalagens ativas

As embalagens ativas foram produzidas pela técnica de *casting*, que consiste na preparação de uma solução filmogênica (SF), deposição sobre suporte e posterior secagem para remoção do solvente. As soluções filmogênicas foram preparadas utilizando alginato de sódio a 3% (m/v) (Dinâmica<sup>®</sup>), glicerol (Vetec) como plastificante em duas concentrações, 2% e 20% (m/m em relação à massa do polímero), e água destilada. Para as formulações ativas, foi incorporado óleo essencial de laranja (BioEssência) na concentração de 15% (m/m em relação à massa do polímero). Nas formulações contendo 2% de glicerol (com e sem óleo essencial), adicionou-se Tween 80 como emulsionante na concentração de 1% (m/m). Os filmes produzidos com 2% de glicerol e 1% de Tween 80 seguiram a metodologia adaptada de Verdi *et al.* (2021), enquanto os materiais desenvolvidos com 20% de glicerol seguiram a metodologia adaptada do grupo de pesquisa do Laboratório de Petroquímica (LPQ) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Assim, as formulações preparadas foram: alginato de sódio com 2% de glicerol; alginato de sódio com 20% de glicerol; alginato de

sódio com 2% de glicerol e óleo essencial de laranja; e alginato de sódio com 20% de glicerol e óleo essencial de laranja.

Para cada solução, foram utilizados 70 mL de água destilada, nos quais foram distribuídos 2,1 g de alginato de sódio (3% m/v). Em seguida, foi adicionado glicerol nas concentrações correspondentes, sendo 0,042 g para 2% ou 0,42 g para 20%. Nas formulações com óleo essencial, adicionou-se 0,315 g de óleo essencial de laranja. Apenas nas formulações com 2% de glicerol foi adicionado Tween 80 (1% m/m), correspondente a 0,021g. Todas as soluções foram agitadas mecanicamente, em um agitador IKA® RW 20, por 20 minutos e aquecidas em banho-maria a 70 °C para garantir a completa dissolução do alginato de sódio. O óleo essencial foi incorporado gradualmente às soluções aquecidas, sendo emulsificado a 440 rpm por 20 minutos. Cada solução foi então vertida sobre placas de poliéster (14 cm de diâmetro) e seca em estufa com circulação de ar a 45 °C por 24 horas. Após a secagem, os filmes foram cuidadosamente removidos e armazenados em envelopes identificados à temperatura ambiente para posterior caracterização.

### **4.3 Caracterização dos filmes poliméricos**

Os materiais produzidos foram caracterizados por ensaios mecânicos de tração, análise termogravimétrica (TGA) e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR). Essas análises foram conduzidas para avaliar as propriedades físicas, térmicas e estruturais dos filmes poliméricos, possibilitando uma compreensão mais detalhada do seu desempenho.

#### *4.3.1 Ensaios mecânicos de tração*

Inicialmente, as propriedades mecânicas dos filmes poliméricos produzidos, como módulo elástico, tensão máxima na ruptura, força e deformação, foram medidas utilizando o equipamento de ensaios estáticos Emic, célula Trd 22, com capacidade de carga máxima de 500 N. Antes da realização dos testes, as espessuras dos filmes foram medidas com um micrômetro, e o diâmetro e a espessura médios de cada amostra foram calculados para garantir a uniformidade dos resultados.

Os ensaios foram realizados em cinco corpos de prova (CP) de cada composição, com base na norma ASTM D638:2014 para CP tipo V. O método de ensaio foi programado no software Mtest, considerando as seguintes características: velocidade de tração de 80000

mm/s, força máxima de 100 N, deformação máxima de 500 mm e temperatura ambiente sem controle de umidade. O equipamento registrou os valores de força, tensão, deformação e módulo elástico durante os ensaios. Os valores de tensão máxima na ruptura e módulo elástico foram expressos em MPa, enquanto a deformação foi apresentada em porcentagem.

#### *4.3.2 Análise termogravimétrica (TGA)*

A partir dos melhores resultados obtidos nos ensaios mecânicos, foram realizadas análises termogravimétricas (TGA) para avaliar a estabilidade térmica e o comportamento de degradação dos filmes poliméricos. O ensaio foi conduzido em uma termobalança sob atmosfera de nitrogênio, com fluxo constante de 50 mL.min<sup>-1</sup>, para evitar a oxidação dos materiais durante o aquecimento.

A faixa de temperatura utilizada foi de 25 °C a 800 °C, com uma taxa de aquecimento linear de 10 °C.min<sup>-1</sup>. Amostras de aproximadamente 5 mg de cada formulação foram cuidadosamente pesadas e colocadas no cadinho da termobalança. Durante o aquecimento, foi monitorada a perda de massa em função da temperatura, permitindo identificar os eventos de degradação térmica associados aos componentes do filme, como a matriz polimérica, o plastificante (glicerol) e o óleo essencial de laranja.

Os dados obtidos foram apresentados como gráficos de perda de massa (% em relação à massa inicial) versus temperatura (°C). Os eventos térmicos foram analisados para determinar as etapas de degradação, como desidratação, decomposição do biopolímero e volatilização do óleo essencial. Esses resultados foram utilizados para verificar a influência do aditivo (OEL) na estabilidade térmica dos filmes poliméricos produzidos a partir da formulação que obteve as melhores propriedades mecânicas.

#### *4.3.3 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)*

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) foi empregada para analisar as interações químicas entre os componentes dos filmes poliméricos. Essa técnica permitiu identificar grupos funcionais presentes na matriz polimérica e possíveis interações entre o alginato, o plastificante (glicerol) e o óleo essencial de laranja.

As análises foram realizadas em um espectrofotômetro FT-IR operando na faixa de 4000 a 400 cm<sup>-1</sup>, para tal, foi utilizado o equipamento Shimadzu IR Tracer-100, modelo Spectrometer, com acessório de reflectância total atenuada. Os espectros obtidos foram

comparados para avaliar modificações estruturais nos filmes e verificar a presença de interações químicas que pudessem influenciar suas propriedades mecânicas e térmicas.

#### **4.4 Crescimento do microrganismo no queijo muçarela**

A aplicação dos filmes desenvolvidos como embalagens para queijo muçarela seguiu a metodologia adaptada de Dannenberg *et al.* (2017). Inicialmente, os filmes, tanto os puros quanto aqueles aditivados com 15% de óleo essencial de laranja (OEL), assim como as fatias de queijo muçarela (4 x 4 cm), foram descontaminados por exposição à luz UV durante 15 minutos em cada lado. Em seguida, 0,1 mL de uma solução contendo a bactéria *Escherichia coli* ( $10^8$  UFC·mL<sup>-1</sup>, conforme a escala de McFarland) foi inoculado em um dos lados do queijo. Sobre esse lado, cada tipo de filme desenvolvido será posicionado, e os sistemas serão condicionados em sacos ziplock. O mesmo processo foi feito para outro sistema com a bactéria *Staphylococcus aureus* ( $10^8$  UFC·mL<sup>-1</sup>, conforme mesma escala).

Esses sistemas foram armazenados a 4 °C por períodos de 0, 3, 6 e 9 dias. Após cada intervalo de tempo, foram adicionados 10 mL de água salina peptonada a 0,1% no saco ziplock para remover os microrganismos presentes no sistema. Posteriormente, foram realizadas diluições sucessivas até  $10^{-6}$ . A técnica de inoculação *Pour Plate* foi utilizada para depositar 1 mL de cada diluição em placas de Petri contendo meio de cultivo Ágar Nutritivo (AN). Essa etapa será conduzida em duplicata. Por fim, com base nos resultados obtidos, foi calculado o índice de crescimento microbiano (%) dividindo-se a quantidade de UFC observada em cada tempo específico pela quantidade inicial de UFC.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

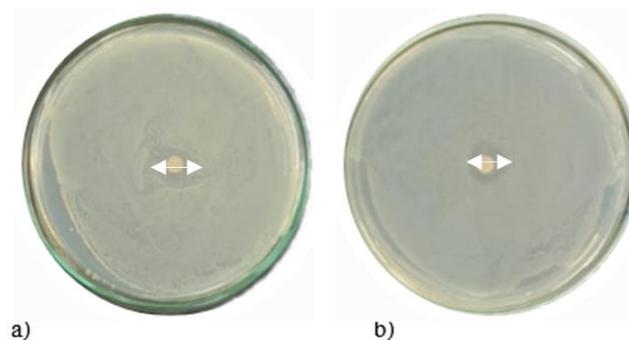
Os resultados obtidos nas análises antimicrobianas do óleo essencial de laranja, bem como no desenvolvimento, caracterização e aplicação dos filmes poliméricos, são apresentados e propostos neste capítulo.

### 5.1 Avaliação das atividades antimicrobianas do óleo essencial de laranja doce

O óleo essencial de laranja (OEL), extraído das cascas de *Citrus sinensis*, é rico em compostos bioativos, principalmente limoneno, que representa aproximadamente 90% de sua composição. Esse composto foi escolhido como agente ativo para o desenvolvimento das embalagens devido às suas propriedades antimicrobianas e antioxidantes relatadas na literatura (Silva *et al.*, 2022). Com base nisso, foram realizados testes para verificar o potencial do OEL como agente antimicrobiano, alterando sua aplicação em embalagens ativas.

A atividade antimicrobiana do OEL foi avaliada por meio do teste de disco-difusão em ágar nutritivo contra as bactérias *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 1 (a) e (b), respectivamente.

Figura 1 - Teste de disco-difusão do OC para as bactérias: a) *Staphylococcus aureus* b) *Escherichia coli*.



Fonte: A autora (2025).

A partir dos testes realizados, comprova-se a formação de halos de inibição para as bactérias *S. aureus* e *E. coli*, comprovando a atividade antimicrobiana do óleo essencial de laranja. Os diâmetros médios dos halos de inibição foram de  $1,07 \pm 0,33$  cm para *S. aureus* e  $1,23 \pm 0,19$  cm para *E. coli*.

Esses resultados demonstram que o óleo essencial de laranja possui ação antimicrobiana contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas. A presença desses halos sugere que os compostos presentes no óleo essencial testado têm potencial para aplicação como aditivo bactericida em embalagens ativas, auxiliando na conservação de alimentos ao reduzir a carga microbiana.

Estudos também demonstram a eficácia de óleos essenciais no controle de microrganismos patogênicos. Heberle *et al.* (2016), ao avaliarem a atividade antimicrobiana do óleo essencial de *Citrus sinensis*, observaram halos de inibição de  $1,00 \pm 0,088$  cm para *S. aureus* e  $0,999 \pm 0,018$  cm para *E. coli*. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo reforçam o potencial antimicrobiano do óleo essencial de laranja, sugerindo sua aplicação futura na indústria alimentícia, farmacêutica e no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis com propriedades ativas.

## 5.2 Preparação de embalagens ativas

Após a comprovação da eficiência do OE, este foi utilizado na proporção de 15% para a produção das embalagens ativas cujas características macroscópicas estão apresentadas na Figura 2. Foram produzidas duas amostras: uma sem a adição de óleo essencial de laranja (OEL) e outra com a incorporação do composto. A presença do OEL não compromete visualmente a formação estrutural do filme, garantindo a integridade e a aplicabilidade do material.

Figura 2- Embalagens ativas: a) sem OEL e b) com OEL.



Fonte: A autora (2025).

Na Figura 2, são apresentados os filmes produzidos: (a) sem OEL e (b) com OEL. Pela visualização macroscópica, a incorporação do óleo essencial de laranja foi realizada sem alteração morfológica no filme. A ausência de mudanças evidentes pode ser atribuída à dispersão sutil dos compostos do óleo na matriz polimérica, que não afetou de forma perceptível a aparência do filme. Além disso, a coloração do alginato, geralmente translúcida ou levemente amarelada, pode ter influenciado a percepção visual das embalagens. Dessa forma, a adição do óleo essencial não comprometeu a formação da embalagem, confirmando a eficácia da incorporação.

### 5.3 Caracterização dos materiais

Para avaliar as propriedades físicas, térmicas e estruturais dos filmes poliméricos produzidos com e sem a adição de óleo essencial de laranja (OEL), foram realizados ensaios mecânicos de tração, análise termogravimétrica (TGA) e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), abrangendo detalhadamente o desempenho dos materiais.

#### 5.3.1 Ensaios mecânicos de tração

O ensaio mecânico de tração foi realizado, para os filmes de alginato de sódio produzidos com diferentes proporções de glicerol (2 e 20%), com intuito de verificar a influência do glicerol na resistência mecânica dos materiais poliméricos. Diante disso, os resultados de tensão de ruptura e o módulo de elasticidade (MPa) de cada amostra estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade dos filmes de alginato com diferentes porcentagens de glicerol.

Quantidade de glicerol	Amostra	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
2%	Alginato puro	33,7 ± 4,92	434,1 ± 29,23
	Alginato+15%OEL	52,05 ± 6,92	603,57 ± 34,00
20%	Alginato puro	24,80 ± 3,99	224,7 ± 26,72
	Alginato+15%OEL	29,6 ± 2,65	470,3 ± 29,30

Fonte: A autora (2025).

Segundo Callister e Resthwich (2012), o módulo de elasticidade reflete a resistência do material à deformação elástica, indicando que materiais com maior módulo apresentam menor deformação sob carga aplicada. A análise dos dados da Tabela 1 mostra que o aumento da quantidade de glicerol de 2% para 20% levou a uma redução no módulo de elasticidade e na tensão de ruptura. Isso ocorre porque a adição de glicerol aumenta a mobilidade das cadeias poliméricas e reduz a conexão entre elas. Assim, os filmes contendo 20% de glicerol apresentaram maior plasticidade, uma característica desejável para embalagens flexíveis.

Por outro lado, a incorporação de 15% de óleo essencial de laranja (OEL) aumentou tanto a tensão de ruptura quanto o módulo de elasticidade em ambas as concentrações de glicerol. Esse efeito indica que o OEL conferiu maior rigidez à matriz polimérica, possivelmente devido a interações específicas entre os componentes da formulação (Callister; Resthwich, 2012). Ao comparar os filmes com 20% de glicerol, tanto na formulação pura quanto na que contém óleo essencial (OEL), observa-se que os valores médios de tensão de ruptura são próximos, especialmente considerando os desvios padrão. A média para o filme puro é de 24,80 MPa, enquanto para o filme com OEL é de 29,6 MPa. No entanto, os desvios padrão ( $\pm 3,99$  para o filme puro e  $\pm 2,65$  para o filme com OEL) mostram que os valores individuais das amostras podem oscilar para mais ou para menos, resultando em uma sobreposição dos intervalos de variação. Isso significa que, os dois materiais possuem uma resistência à ruptura semelhante, já que os valores de tensão nas amostras são bastante próximos. Dessa forma, a adição do OEL nesse caso não provocou uma mudança expressiva na resistência mecânica do material, diferentemente do observado nos filmes com 2% de glicerol, onde a presença do OEL aumentou significativamente a rigidez.

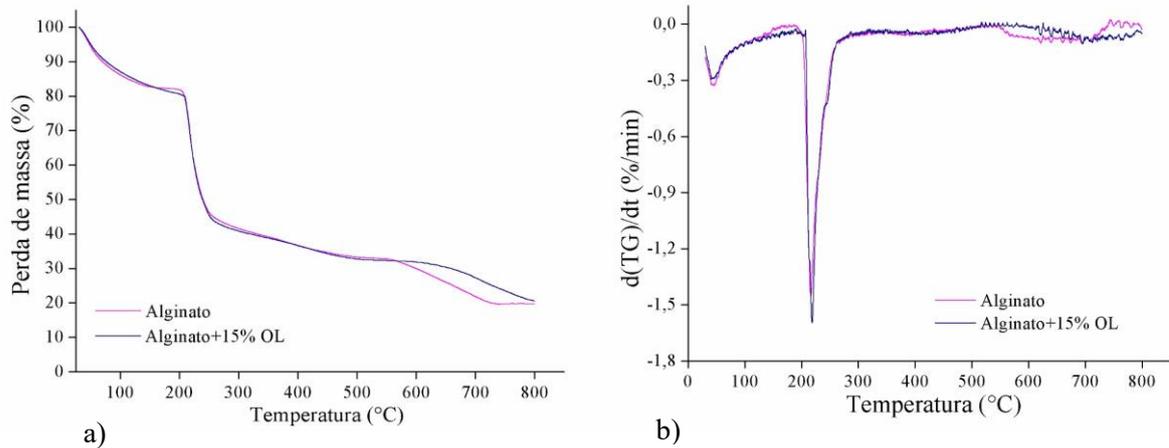
Diante desses resultados, verificou-se que o efeito plastificante do glicerol e o efeito enrijecedor do óleo essencial se contrapõem, resultando em materiais com propriedades mecânicas específica. Sendo assim, optou-se na escolha da formulação contendo 20% de glicerol por apresentar uma característica de material mais elástico para os filmes ativos, dando continuidade aos estudos de caracterização e a análise da cinética de crescimento microbiano.

### *5.3.2 Análise termogravimétrica (TGA)*

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada com o objetivo de avaliar a estabilidade térmica dos filmes desenvolvidos. Para isso, foram plotadas as curvas de perda de

massa em função da variação de temperatura (Figura 3(a)), bem como suas derivadas em relação ao tempo (DTG) (Figura 3(b)) para os filmes de alginato e alginato + 15% de OEL.

Figura 3- Curvas de TGA e suas derivadas em relação ao tempo, respectivamente, dos filmes de: alginato e alginato + 15% de OE.



Fonte: A autora (2025).

A partir das Figuras 3 a) e b), observa-se que os filmes de alginato puro e alginato com 15% de óleo essencial (OE) apresentaram comportamentos térmicos semelhantes, com perdas de massa ocorrendo em diferentes estágios. A primeira etapa, registrada aproximadamente em 100°C, está relacionada à evaporação da água presente nos filmes. Essa etapa ocorre devido à eliminação da umidade adsorvida na matriz polimérica, comuns em materiais hidrofílicos.

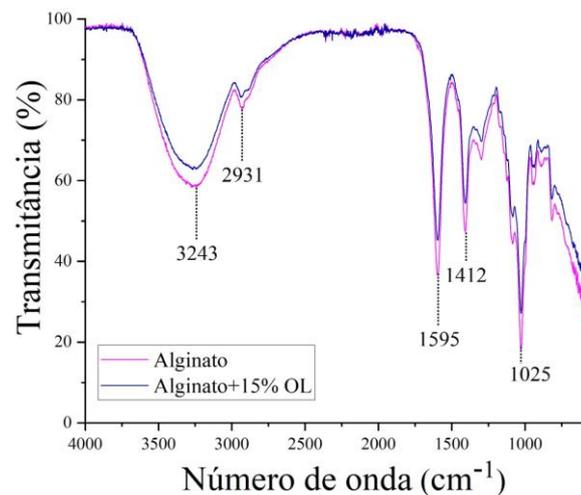
O segundo pico, identificado entre 200°C e 350°C, está associado a degradação térmica do alginato, envolvendo processos como a ruptura das ligações glicosídicas e liberação da estrutura polimérica (Gohary *et al.*, 2023). A análise da DTG (Figura 3b) revela um pico acentuado nesse intervalo de temperatura, diminuindo a taxa máxima de manipulação dos filmes. Além disso, observa-se que a adição de 15% de OE provocou uma leve alteração na curva de manipulação térmica, o que pode estar relacionado às interações entre o óleo essencial e a matriz polimérica. Essas interações podem modificar a estabilidade térmica do material, influenciando sua manipulação.

Apesar dessas variações, os filmes de alginato puro e alginato com 15% de OE mantiveram um perfil de degradação térmica semelhante, indicando que a incorporação do óleo essencial não compromete significativamente a estabilidade térmica da matriz polimérica.

### 5.3.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)

Os materiais desenvolvidos foram analisados por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) para identificar os grupos funcionais presentes em suas estruturas. A Figura 4 apresenta os espectros dos filmes de alginato com 20% de glicerol, tanto na forma pura quanto com a adição de 15% de OEL. Essa análise é fundamental para verificar possíveis interações químicas entre os componentes, por meio do aparecimento de novas bandas ou deslocamentos nos picos característicos, o que pode indicar alterações estruturais na matriz polimérica resultantes da incorporação do óleo essencial.

Figura 4- Espectros FT-IR para os filmes de alginato puro e com 15% de OEL.



Fonte: A autora (2025).

De acordo com a Figura 4, observa-se uma banda larga em aproximadamente 3243  $\text{cm}^{-1}$ , atribuída à vibração axial dos grupos hidroxila (-OH), característica de ligações de hidrogênio entre as moléculas de alginato e glicerol (Jahed *et al.*, 2017). Essas ligações desempenham um papel fundamental na estabilidade estrutural da matriz polimérica, influenciando propriedades como solubilidade e retenção de umidade. Além disso, a banda localizada em 2931  $\text{cm}^{-1}$  está associada às vibrações de estiramento C-H, que são típicas de cadeias orgânicas presentes tanto no alginato quanto no óleo essencial.

Os picos observados em 1595  $\text{cm}^{-1}$  e 1412  $\text{cm}^{-1}$  correspondem às vibrações assimétricas e simétricas do grupo carboxilato (-COO<sup>-</sup>), confirmando a presença da estrutura química do alginato (Carpiné *et al.*, 2016). Esses grupos são essenciais para as propriedades

do biopolímero, pois participam de interações intermoleculares que podem influenciar a estabilidade térmica e mecânica do filme. Já a banda em  $1025\text{ cm}^{-1}$  está relacionada às vibrações de estiramento das ligações C-O, indicando a presença de ligações típicas de polissacarídeos na estrutura do filme.

Ao comparar os espectros, nota-se que a adição de 15% de OEL não levou ao surgimento de novas bandas expressivas, sugerindo que as interações entre o óleo essencial e a matriz polimérica ocorrem principalmente de maneira física, sem a formação de novas ligações químicas covalentes (Doğan *et al.*, 2022). No entanto, pequenas variações na intensidade das bandas indicam que o OEL pode estar interferindo na rede de ligações de hidrogênio do material, alterando a disposição das cadeias poliméricas.

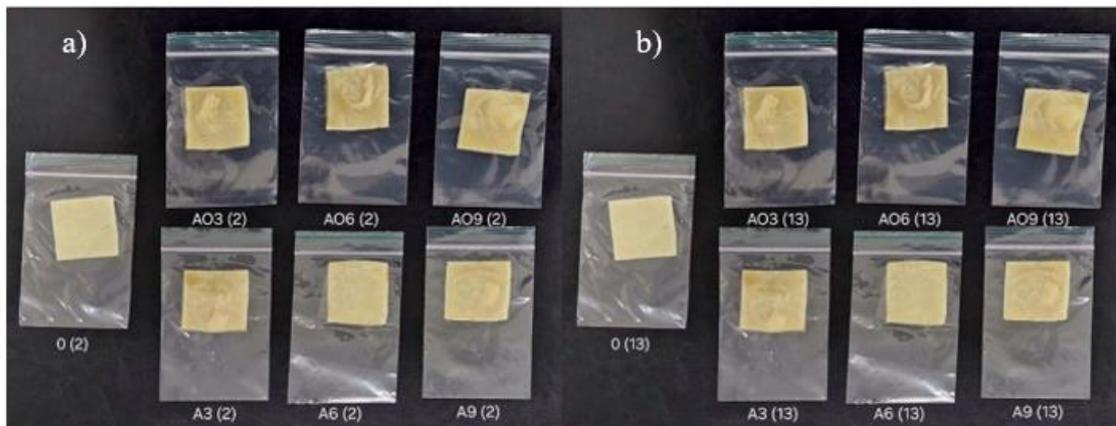
Essas mudanças sutis nos espectros sugerem que a presença do OEL pode impactar as propriedades estruturais e funcionais do filme, como flexibilidade, resistência mecânica e permeabilidade. A reorganização das interações intermoleculares, especialmente entre os grupos hidroxila e carboxilato, pode modificar a mobilidade das cadeias poliméricas, influenciando diretamente a performance do material em aplicações específicas, como embalagens ativas.

#### **5.4 Crescimento do microrganismo no queijo muçarela**

Considerando a comprovada ação antimicrobiana dos óleos essenciais, os filmes à base de alginato, com e sem a incorporação de 15% de óleo essencial de laranja, foram aplicados como embalagens ativas para a conservação do queijo muçarela. A adição de compostos naturais com propriedades antimicrobianas em filmes biodegradáveis tem sido considerada uma estratégia promissora para prolongar a vida útil dos alimentos, ao reduzir o crescimento de microrganismos deteriorantes, sem a necessidade de aditivos sintéticos.

A Figura 5 ilustra os sistemas experimentais montados para a análise do crescimento microbiano em queijo muçarela ao longo do tempo. As imagens estão divididas em dois grupos: (a) para o crescimento de *Staphylococcus aureus* e (b) para o crescimento de *Escherichia coli*.

Figura 5- Sistemas experimentais para a análise da cinética de crescimento microbiano em queijo muçarela para: (a) *Staphylococcus aureus* e (b) *Escherichia coli*.



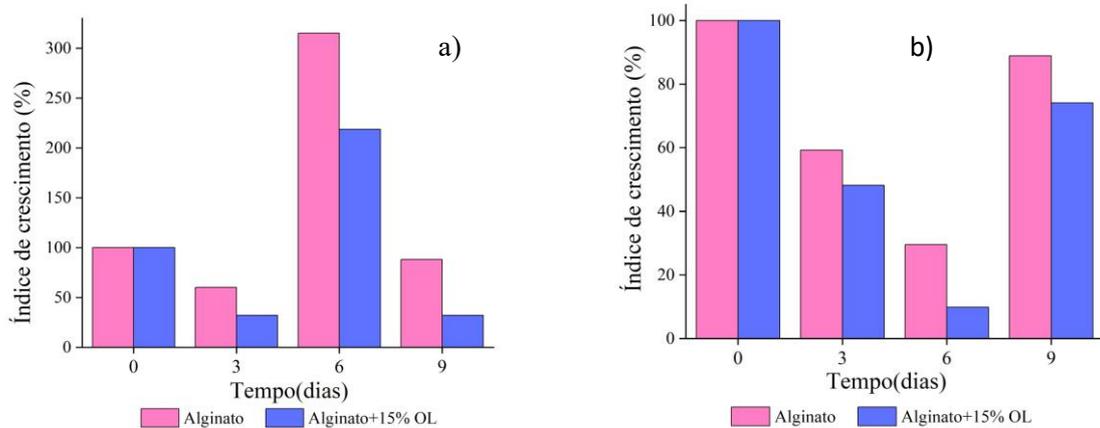
Fonte: A autora (2025).

Na Figura 5 a) estão apresentados os sistemas embalados, para o crescimento de *Staphylococcus aureus*, com filmes puros (A) e com filmes contendo 15% de óleo essencial de laranja (AO), avaliados nos tempos de 0, 3, 6 e 9 dias de armazenamento a 4 °C. Já na Figura 5 b), os sistemas são apresentados para o crescimento de *E. coli*, comparando os efeitos dos filmes puros (A) e dos filmes com óleo essencial (AO) nos mesmos tempos de armazenamento.

Observa-se que todos os filmes apresentaram boa transparência, uma característica essencial para garantir a visualização do produto a ser consumido. Além disso, os filmes mantiveram sua integridade ao longo de todo o experimento.

A contagens microbiana de cada sistema foi feito pela Unidade Formadora de Colônias, tanto para *Staphylococcus aureus*, como para *Escherichia coli*. Os resultados estão apresentados em índices de crescimento desses microrganismos pelo crescimento referente ao tempo zero (Figura 6), permitindo assim avaliar a eficácia das embalagens ativas produzidas.

Figura 6- Índice de crescimento da *Escherichia coli* (a) *Staphylococcus aureus* (b) no queijo muçarela em contato com os filmes de alginato puro e alginato + 15% de OE.



Fonte: A autora (2025).

A Figura 6 mostra que todas as embalagens aditivadas com óleo essencial de laranja apresentaram menores índices de crescimento microbiano em comparação aos filmes de alginato puro. Para *E. coli* (Figura 6a), verifica-se que, nos primeiros dias de armazenamento, o crescimento para o filme puro e para o Filme com OEL, apresentaram índice de crescimento semelhante, porém, a partir do sexto dia, o crescimento bacteriano foi significativamente maior nos filmes sem aditivo, enquanto os filmes com óleo essencial encontraram um efeito inibitório mais evidente.

Já para *S. aureus* (Figura 6b), para filme com OEL a prevenção do crescimento foi satisfatória desde do terceiro dia de armazenamento destacando sua eficácia antimicrobiana.

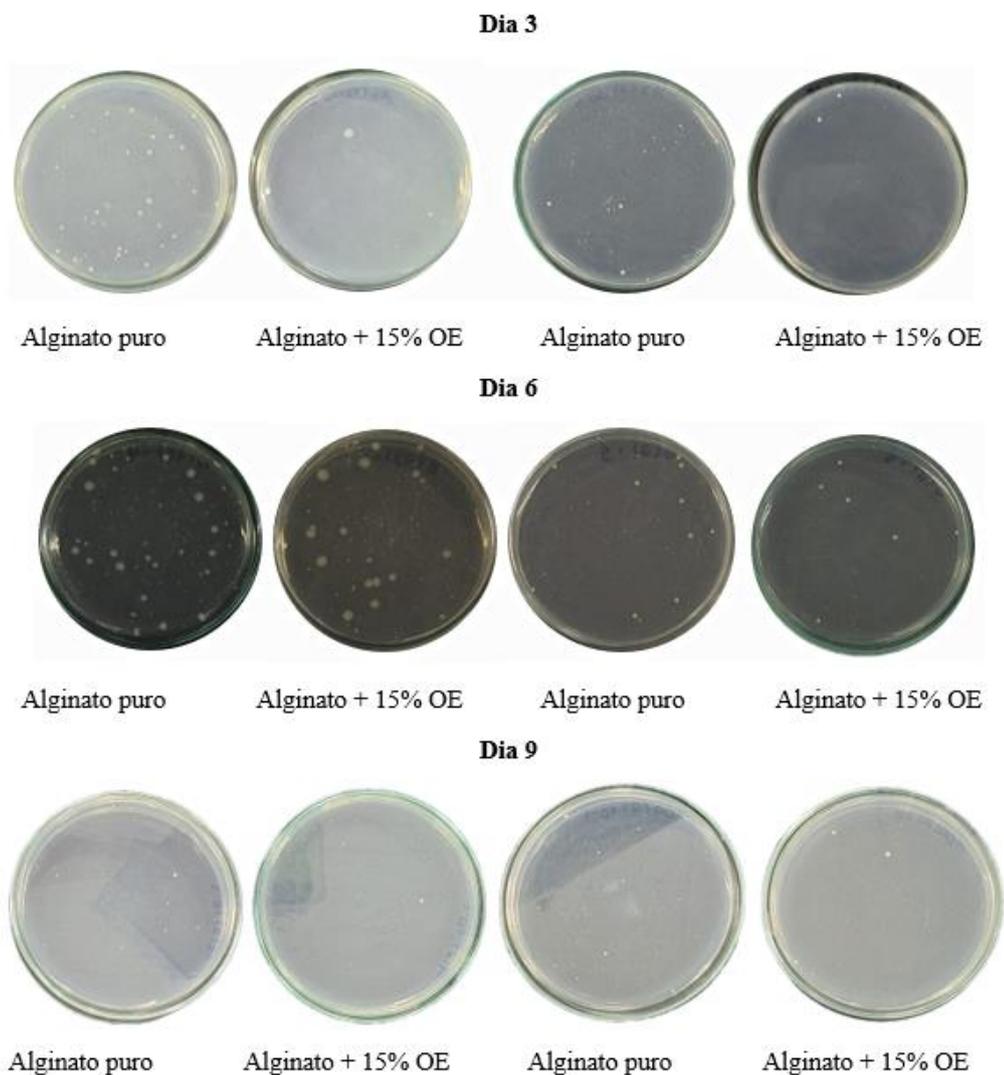
A diferença entre os índices de crescimento microbiano sugere que a incorporação do óleo essencial à matriz polimérica favorece a liberação de compostos ativos para a superfície do alimento. Esse efeito contribui para a inibição do crescimento de *E. coli* e *S. aureus*, auxiliando na conservação do queijo muçarela ao retardar o desenvolvimento desses microrganismos.

Estudos prévios, como o de Doğan *et al.* (2022), também demonstraram a capacidade de filmes poliméricos contendo óleos essenciais em inibir *E. coli* em produtos lácteos, reforçando o potencial dessas embalagens ativas para prolongar a vida útil do queijo sem a necessidade de conservantes sintéticos.

A Figura 7 apresenta as placas de Petri contendo as colônias de *E. coli* e *S. aureus* ao longo dos dias de armazenamento, permitindo uma avaliação visual da proteção microbiana promovida pelos filmes. As imagens foram obtidas considerando a mesma diluição para todos

os sistemas, visto que a quantidade de colônias variou significativamente entre os dias. Essa abordagem possibilita uma comparação mais clara da eficácia antimicrobiana das embalagens, evidenciando a menor eficácia dos microrganismos nos sistemas contendo óleo essencial de laranja.

Figura 7- Análise microbiológica do queijo muçarela embalados, durante 3, 6 e 9 dias, nas embalagens de alginato puro e alginato + 15% de OE para: a) *Escherichia coli* e b) *Staphylococcus aureus* para a diluição de  $10^{-5}$



Fonte: A autora (2025).

Essa análise complementa os resultados dos gráficos anteriores, confirmando a redução do crescimento microbiano em sistemas contendo óleo essencial. Nos primeiros dias de armazenamento (Dia 3), observa-se um número reduzido de colônias em todas as amostras, indicando que o crescimento microbiano ainda está em estágio inicial. No entanto, já é

possível notar uma diferença sutil entre os sistemas, com um menor número de colônias nos filmes contendo OE.

No Dia 6, a disparidade entre os sistemas se torna mais evidente. As placas dos queijos embalados com alginato puro apresentam um aumento expressivo no número de colônias de *E. coli* e *S. aureus*, refletindo a falta do agente antimicrobiana nesses filmes. Em contrapartida, as embalagens contendo OEL continuam a apresentar uma redução de colônias, demonstrando inibição da deficiência bacteriana ao longo do tempo.

No dia 9, as placas das amostras embaladas com alginato puro apresentaram um número significativamente maior de microrganismos, atingindo 366 UFC, especialmente para *E. coli*. Esse resultado confirma que a embalagem sem aditivos não foi eficaz em conter o crescimento microbiano ao longo do armazenamento.

Por outro lado, nos queijos embalados com alginato e 15% de OEL, ainda houve presença de colônias, porém em menor quantidade, registrando 290 UFC. Essa redução evidencia o efeito antimicrobiano do óleo essencial, contribuindo para o controle do crescimento bacteriano.

Esses resultados estão alinhados com o estudo de Andrade *et al.* (2020), que desenvolveram um material à base de PBAT incorporado com óleo essencial de laranja para aplicação em embalagem ativa antimicrobiana. O estudo demonstrou que, mesmo com a adição do óleo essencial, a matriz polimérica manteve suas propriedades térmicas e morfológicas, além de apresentar migração do composto ativo. Essa migração contribuiu para a redução do crescimento de *E. coli*, destacando o potencial do óleo essencial de laranja na inibição microbiana. Dessa forma, os resultados deste estudo reforçam a viabilidade da incorporação de OEL em filmes de alginato como uma estratégia eficaz para controle microbiano e aumento da vida útil do queijo muçarela.

## 6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo o desenvolvimento e a caracterização de filmes de embalagem ativa à base de alginato de sódio, aditivados com óleo essencial de laranja, para aplicação na conservação de queijo muçarela. A pesquisa abordou a relevância das embalagens ativas como uma alternativa inovadora e sustentável para a preservação de alimentos, considerando a crescente demanda por soluções biodegradáveis e funcionais.

Os resultados obtidos demonstraram que a incorporação do óleo essencial de laranja doce conferiu aos filmes propriedades antimicrobianas eficazes contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. A análise microbiológica revelou uma redução significativa do crescimento microbiano no queijo muçarela armazenado com os filmes ativos, confirmando o potencial desses materiais para aumentar a vida útil dos alimentos.

Além disso, as análises físico-químicas e mecânicas indicaram que a adição do óleo essencial não comprometeu a estrutura química da matriz polimérica, mantendo sua estabilidade térmica e suas propriedades estruturais. A formulação contendo 20% de glicerol proporcionou maior flexibilidade ao material, tornando-o adequado para aplicações como embalagem alimentar.

A relevância desta pesquisa para a área de engenharia química e microbiologia industrial está na contribuição para o desenvolvimento de materiais sustentáveis, alinhados às diretrizes da economia circular e redução do desperdício alimentar. A utilização de polímeros biodegradáveis combinados com compostos naturais reforça a viabilidade de soluções inovadoras para a indústria de alimentos e embalagens.

Como perspectivas futuras, sugere-se a ampliação dos estudos para avaliar a interação dos filmes desenvolvidos com outros tipos de alimentos, a otimização das formulações para melhoria das propriedades mecânicas, bem como a realização de testes em condições reais de mercado. Dessa forma, este trabalho reforça o papel das embalagens ativas como uma estratégia promissora para a conservação de alimentos, contribuindo para o avanço da pesquisa e inovação na área de biopolímeros e segurança alimentar.

## REFERÊNCIAS

- A.G. VERDI, A.G. DE SOUZA, D.B. ROCHA, S.A. DE OLIVEIRA, R.M.V. ALVES, D. dos Santos Rosa, **Biodegradable films functionalized with *Moringa oleifera* applied in food packaging**, Iran. Polym. J. 30 (2021) 235–246
- ABDILLAH, A. A.; CHARLES, A. L. Characterization of a natural biodegradable edible film obtained from arrowroot starch and iota-carrageenan and application in **food packaging**. International Journal of Biological Macromolecules, v. 191, p. 618-626, 2021.
- ABIQ - Associação Brasileira das Indústrias de Queijos. **Consumo per capita de queijos no Brasil**. Disponível em: < <https://www.abiq.com.br/index.asp>>. Acessado em 20 de jan de 2025.
- AHMED, I.; LIN, H.; ZOU, L.; BRODY, A. L.; LI, Z.; QAZI, I. M.; PAVASE, T. R.; LV, L. A comprehensive review on the application of active packaging technologies to muscle foods. **Food Control**, v. 82, p. 163–178, dez. 2017.
- ALARCÓN-MOYANO, J. K.; BUSTOS, R. O.; HERRERA, M. L.; MATIACEVICH, S. B. **Alginate edible films containing microencapsulated lemongrass oil or citral: effect of encapsulating agent and storage time on physical and antimicrobial properties**. Journal of Food Science and Technology, v. 54, n. 9, p. 2878–2889, ago. 2017.
- ALIZADEH-SANI, M.; MOHAMMADIAN, E.; MCCLEMENTS, D. J. Eco-friendly active packaging consisting of nanostructured biopolymer matrix reinforced with TiO(2) and essential oil: **Application for preservation of refrigerated meat**. Food chemistry, v. 322, p. 126782, ago. 2020.
- ALMADA, L. F., FIRMO, M. J., ARRUDA, T. R., & JÚNIOR, B. R. (2022). **Embalagens ativas antioxidantes: uma estratégia para a conservação de alimentos com alto teor lipídico**. Research, Society and Development, 11.
- ALPARSLAN, Y.; BAYGAR, T. **Effect of Chitosan Film Coating Combined with Orange Peel Essential Oil on the Shelf Life of Deepwater Pink Shrimp**. Food and Bioprocess Technology, v. 10, n. 5, p. 842–853, maio 2017.
- Alvarez, M. V., Ortega-Toro, R., & Collazo-Bigliardi, S. (2021). **Sodium alginate-based edible films and coatings: A review**. Food Hydrocolloids, 110, 105744.

AMIN, U.; KHAN, M. K. I.; MAAN, A. A.; NAZIR, A.; RIAZ, S.; KHAN, M. U.; SULTAN, M.; MUNEKATA, P. E. S.; LORENZO, J. M. Biodegradable active, intelligent, and smart packaging materials for food applications. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 33, 100903, 2022.

ANDRADE, M. F.; SILVA, I. D. L.; SILVA, G. A.; CAVALCANTE, P. V. D.; SILVA, F. T.; ALMEIDA, Y. M. B.; VINHAS, G. M.; CARVALHO, L. H. A study of poly (butylene adipate-co-terephthalate)/**orange essential oil films for application in active antimicrobial packaging**. *LWT*, v. 125, 109148, 2020.

Anjum, F. M., Nadeem, M., Khan, M. I., & Saeed, F. (2020). **Goma arábica: propriedades e aplicações em alimentos**. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 1–10.

Azambuja, W. (2021). **Limoneno**. <https://www.oleosessenciais.org/limoneno/>

Bambace, M. F., de Souza, A. C., & Silva, M. C. (2019). **Sodium alginate-based edible coatings for food preservation: A review**. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 1–10.

Barragán-Menéndez, M., López, O. V., & García, M. A. (2020). Chitosan-based edible films and coatings for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 105, 105744.

BASHIR, A.; JABEEN, S.; GULL, N.; ISLAM, A.; SULTAN, M.; GHAFAR, A.; KHAN, S. M.; IQBAL, S. S.; JAMIL, T. **Co-concentration effect of silane with natural extract on biodegradable polymeric films for food packaging**. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 106, p. 351–359, jan. 2018.

BENBETTAÏEB, N.; TANNER, C.; CAYOT, P.; KARBOWIAK, T.; DEBEAUFORT, F. Impact of functional properties and release kinetics on antioxidant activity of biopolymer active films and coatings. *Food Chemistry*, v. 242, p. 369–377, mar. 2018.

BHARGAVA, N.; SHARANAGAT, V. S.; MOR, R. S.; KUMAR, K. Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, v.105, p. 385-401, 2020.

BILAL, M., & IQBAL, H. M. N. (2019). **Naturally-Derived Biopolymers: Potential Platforms for Enzyme Immobilization**. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 462-482

Blanco-Pascual, N., Montero, M. P., & Gómez-Guillén, M. C. (2014). **Sodium alginate-based edible coatings: A review.** *Food Hydrocolloids*, 35, 1–10.

Braga, A. R. C., Fakhouri, F. M., & da Cunha, R. L. (2019). **Chitosan-based edible coatings: A review.** *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 1–10.

BRAGA, L. R.; SILVA, F. M. **Embalagens ativas: uma nova abordagem para embalagens alimentícias.** *Braz. J. Food Res.*, Campo Mourão, v. 8, n. 4, p. 170-186, out./dez. 2017.

BRASIL. (20 de setembro de 2002). RESOLUÇÃO-RDC Nº 259, DE 20 DE SETEMBRO DE 2002. Acesso em 27 de dezembro de 2024, disponível em Ministério da Saúde.

BRASIL. (21 de outubro de 1969). DECRETO-LEI Nº 986, DE 21 DE OUTUBRO DE 1969.

Brito, G. F., Agrawal, P., Araújo, E. M., & Mélo, T. J. A. (2011). **Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes.** *Revista Eletrônica de Materiais e Processos (REMAP)*, 6(2), 127-139

BUENDÍA–MORENO, L.; SOTO–JOVER, S.; ROS–CHUMILLAS, M.; ANTOLINOS, V.; NAVARRO–SEGURA, L.; SÁNCHEZ–MARTÍNEZ, M. J.; MARTÍNEZ–HERNÁNDEZ, G. B.; LÓPEZ– GÓMEZ, A. **Innovative cardboard active packaging** with a coating including encapsulated essential oils to extend cherry tomato shelf life. *LWT*, v. 116, p. 108584, 2019.

CALLISTER, W. D. Jr; RETHWISCH, D. G. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução.** 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817 p. ISBN: 978-85-216-1595-8.

CASTRO MAYORGA, J. L.; FABRA ROVIRA, M. J.; CABEDO MAS, L.; SÁNCHEZ MORAGAS, G.; LAGARÓN CABELLO, J. M. Antimicrobial nanocomposites and electrospun coatings based on poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and copper oxide nanoparticles for **active packaging** and coating applications. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 135, n. 2, p. 45673, 2018.

CZAKERT, J.; STRITTER W., BLAKESLEE, S. B.; SEIFERT, G. **Scenting serenity: influence of essential-oil vaporization on dental anxiety -a cluster-randomized, controlled, single-blinded study (AROMA\_dent).** *International Journal of Scientific Report*, n.19, p.14143, 2024.

DANNENBERG, G. S.; FUNCK, G. D.; CRUXEN, C. E. S.; MARQUES, J. L.; SILVA, W. P.; FIORENTINI, A. M. Essential oil from pink pepper as an antimicrobial component in cellulose acetate film: Potential for application as active packaging for sliced cheese. *LWT - Food Science and Technology*, v. 81, p. 314-318, 2017.

DE OLIVEIRA, T. M. et al. *Chitosan-based edible films and coatings: A review*. *Food Hydrocolloids*, v. 70, p. 1–10, 2017.

De Oliveira, T. M., de Souza, A. C., & Silva, M. C. (2020). **Chitosan-based edible coatings for food preservation: A review**. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1–10.

DICIO. (2022). Embalagem. Acesso em 27 de dezembro de 2024, disponível em Dicionário Online de Português.

Etemadipoor, R., Ghanbarzadeh, B., & Hamishehkar, H. (2019). **Application of gum arabic in edible coatings: A review**. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 1–9.

FECHINI, G. J. M.(2013). **Polímeros Biodegradáveis: Tipos, Mecanismos, Normas e Mercado Mundial**. Editora Mackenzie, 120p

Ferreira, F. S. (2015). **Aditivos alimentares e suas reações adversas no consumo infantil**. *Rev da Universidade Vale do Rio Verde*. 13(1): 397-407.

FERRONATTO, A. N. & ROSSI, R. C. (2018). **Extração e aplicação do óleo essencial da casca da laranja como um ingrediente natural**. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, 12(2), 78-93. 10.4013/ete.2018.122.05.

Ferronato, A. N. & Rossi, R. C. (2018). **Extração e aplicação do óleo essencial da casca da laranja como um ingrediente natural**. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, 12(2), 78-93. DOI: 10.4013/ete.2018.122.05.

Flores, P. I. G. et al. (2019). *Actividad antibacteriana de cinco compuestos terpenoides: carvacrol, limoneno, linalool,  $\alpha$ -terpineno y timol*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22(2), 241-248.

FLÓREZ, M.; GUERRA-RODRÍGUEZ, E.; CAZÓN, P.; VÁZQUEZ, M. Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocolloids*, v. 124, Part B, 107328, 2022.

Francisco, M. R., de Souza, A. C., & Silva, M. C. (2020). Cellulose-based edible coatings for food preservation: A review. *Carbohydrate Polymers*, 245, 116502.

Gao, Y., Wang, Y., & Zhang, Y. (2017). **Sodium alginate: Structure, properties, and applications.** *Carbohydrate Polymers*, 157, 1–10.

GOHARY, T.F. QAHTAN, H.G. ALHARBI, G.M. ASNAG, A.L. WALY, Studies of the structural, optical, thermal, electrical and dielectric properties of a **polyvinyl alcohol/sodium alginate** blend doped with Cu nanoparticles and ZnO nanorods as hybrid nanofillers for use in energy storage devices, *J. Polym. Environ.* 31, 2023.

HEBERLE, T.; KRINGEL, D. H.; DANNEBERG, G.; EVANGELHO, J. A.; OLIVEIRA, R. P. de; DIAS, A. R. G. **Atividade antimicrobiana de óleo essencial de laranja.** *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 25.; CIGR SESSION 6 INTERNATIONAL TECHNICAL SYMPOSIUM, 10., 2016, Gramado*

Honorato, T. C., Silva, M. V. S., & Oliveira, A. L. (2013). **Aditivos alimentares: aplicações e toxicologia.** *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 5(8), 1–11.

ISTIQOMAH, A.; PRASETYO, W. E.; FIRDAUS, M.; KUSUMANINGSIH, T. Valorisation of lemongrass essential oils onto chitosan-starch film for sustainable active packaging: **Greatly enhanced antibacterial and antioxidant activity.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 210, p. 669-681, 2022.

JIANG, L.; WANG, F.; XIE, X.; XIE, C.; LI, A.; XIA, N.; GONG, X.; ZHANG, H. Development and characterization of chitosan/guar gum active packaging containing walnut green husk extract and its application on fresh-cut apple preservation. **International Journal of Biological Macromolecules**, v.209, Part A, p. 1307-1318, 2022.

KAMKAR, A.; MOLAEI-AGHAEI, E.; KHANJARI, A.; AKHONDZADEH-BASTI, A.; NOUDOOST, B.; SHARIATIFAR, N.; ALIZADEH SANI, M.; SOLEIMANI, M. **Nanocomposite active packaging based on chitosan biopolymer loaded with nano-liposomal essential oil:** Its characterizations and effects on microbial, and chemical properties of refrigerated chicken breast fillet. *International journal of food microbiology*, v. 342, p. 109071, mar. 2021.

KHALIL, H. P. S. A.; BANERJEE, A.; SAURABH, C. K.; TYE, Y. Y.; SURIANI, A. B.; MOHAMED, A.; KARIM, A. A.; RIZAL, S.; PARIDAH, M. T. Biodegradable Films for

Fruits and Vegetables Packaging Application: Preparation and Properties. **Food Engineering Reviews**, v. 10, p. 139-153, 2018.

Khodaei, D., & Hamidi-Esfahani, Z. (2019). **Carboxymethyl cellulose-based edible films and coatings: A review**. *Food Hydrocolloids*, 89, 1–10.

LANDIM, A. P. M., BERNARDO, C. O., MARTINS, I. B. A., FRANCISCO, M. R., SANTOS, M. B., MELO, N. R. D. (2016). **Sustentabilidade quanto às Embalagens de Alimentos no Brasil**. *Polímeros*, 26, 82-92.

Li, X., Wang, Y., Li, D., & Zhang, L. (2020). **Carboxymethyl cellulose-based edible coatings for food preservation: A review**. *Food Chemistry*, 330, 127201.

Macedo, L. R., Costa, J. M., Silva, A. L., & Oliveira, T. M. (2020). **Chitosan-based edible films and coatings: A review**. *Food Hydrocolloids*, 100, 105744.

MACIEL, H. C., FERNANDES, L. C., SÉRIO, M. E., DE FREITAS, M. M. G., TONON, L. A. C., & SCAPIM, M. R. DA S. (2025). **Embalagem biodegradável e ativa para carnes**. *Boletim Do Centro De Pesquisa De Processamento De Alimentos*, 42(2).

Mahcene, Z., Khelissa, S. O., Boudjema, N., & Amrane, A. (2020). **Sodium alginate-based edible films and coatings: A review**. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 1–10.

MARASCHIN, M; NETO, A. C. DA R.; BEAUDRY, R; PIERO, R. M. DI; ALMENAR, E. Double-bottom antimicrobial packaging for apple shelf-life extension. **Food Chemistry**, v. 279, p. 379–388, 2019.

MARTINAZZO, J., PIAZZA, S. P., SCHERER, G. C., & PIETA, L. (2020). **Embalagens ativas: uma tecnologia promissora na conservação de alimentos**. *Brazilian Journal of Food Research*, 11(2), 171- 194.

MILKPOINT. **O consumo de queijos pelos brasileiros**. 2021. Disponível em: Acesso em: 20 jan. 2025.

Nair, M. S., Saxena, A., & Kaur, C. (2020). **Sodium alginate-based edible films and coatings for food packaging applications**. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 539–547.

NAWAZ, A.; IRSHAD, S.; KHAN, I. A.; KHALIFA, I.; WALAYAT, N.; AADIL, R. M.; KUMAR, M.; WANG, M.; CHEN, F.; CHENG, K.; LORENZO, J. M. Protein oxidation in muscle-based products: Effects on physicochemical properties, quality concerns, and challenges to food industry. **Food Research International**, v.157, 111322, 2022.

Oliveira, T. M., Silva, A. L., Macedo, L. R., & Costa, J. M. (2018). **Chitosan-based edible coatings: A review**. *International Journal of Biological Macromolecules*, 112, 1–10.

OLIVEIRA, T. V.; FREITAS, P. A. V.; POLA, C. C.; SILVA, J. O. R.; DIAZ, L. D. A.; FERREIRA S. O.; SOARES, N. F. F. Development and optimization of antimicrobial active films produced with a reinforced and compatibilized biodegradable polymers. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 24, 100459, 2020.

ONGARATTO, G. C., VITAL, A. C., & PRADO, I. N. (abr. de 2022). **Embalagens ativas e inteligentes para proteção da carne e seus derivados**: Revisão. *PUBVET - Medicina Veterinaria e Zootecnia*, 16(04), 1-11.

PANDEY, S.; SHARMA, K.; GUNDABALA, V. **Antimicrobial bio-inspired active packaging** materials for shelf life and safety development: A review. *Food Bioscience*, v. 48, 101730, 2022.

Parreidt, T. S., Schmid, M., & Müller, K. (2019). **Sodium alginate-based edible films and coatings: A review**. *Food Hydrocolloids*, 94, 1–10.

Pereira, L. F. S., Inácio, M. L. C., Pereira, R. C., & Angelis-Pereira, M. C. (2015). **Prevalence of Additives in Processed Food Marketed in a South City of Minas Gerais**. *Revista Ciências Em Saúde*, 5(3), 46–52.

Polônio, M. L. T., & Peres, F. (2009). **Consumo de aditivos alimentares e efeitos à saúde**.

PubChem - Open Chemistry Database. **Limonene**.  
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Limonene>

RAI, P.; MEHROTRA, S.; PRIYA, S.; GNANSOUNOU, E.; SHARMA, S. K. Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers. **Bioresource Technology**, v. 325, 124739, 2021.

RANGARAJ, V. M.; RAMBABU, K.; BANAT, F.; MITTAL, V. Natural antioxidants-based edible active food packaging: An overview of current advancements. **Food Bioscience**, v. 43, 101251, 2021.

REZAEI, F.; SHAHBAZI, Y. **Shelf-life extension and quality attributes of sauced silver carp fillet: A comparison among direct addition, edible coating and biodegradable film.** *LWT*, v. 87, p. 122–133, 2018.

SANI, M. A.; AZIZI-LALABADI, M.; TAVASSOLI, M.; MOHAMMADI, K.; MCCLEMENTS, D. J. Recent Advances in the Development of Smart and **Active Biodegradable Packaging Materials.** *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), v. 11, n. 5, maio 2021.

SANTOS, A. M., & YOSHIDA, C. M. (2011). Embalagem. Recife: Edufrpe.

SARFRAZ, J.; HANSEN, A. Å.; HAUGEN, J.-E.; LE, T.-A.; NILSEN, J.; SKARET, J.; HUYNH, T. P.; PETERSEN, M. K. Biodegradable Active Packaging as an Alternative to Conventional Packaging: **A Case Study with Chicken Fillets.** *Foods* (Basel, Switzerland), v. 10, n. 5, maio 2021.

SEVERO, C., ANJOS, I., SOUZA, V. G., CANEJO, J. P., BRONZE, M. R., FERNANDO, A. L., . . . RIBEIRO, I. A. (2021). Development of cranberry extract films for the enhancement of food packaging antimicrobial properties. **Food Packaging and Shelf Life**, 28.

Shigematsu, T., Yamamoto, K., Tanaka, H., & Nakamura, Y. (2018). **Development of sodium alginate-based edible films incorporating essential oils for food preservation.** *Food Packaging and Shelf Life*, 17, 1–9.

Siddiqui, S. A., Pahmeyer, M. J., Assadpour, E., & Jafari, S. M. (2022). **Extraction and purification of d-limonene from orange peel wastes: Recent advances.** *Industrial Crops and Products*, 177, 114484.

Silva, I. D., Oliveira, F. S., Andrade, M. F., Brito, A. M., Hallwass, F., & Vinhas, G. M. (2021). **Avaliação das potencialidades dos extratos vegetais de jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) e cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) para uso em embalagens ativas antimicrobianas e antioxidantes.** *Revista Materia*, 26.

SILVA, M. D. (2019). **Aplicação de absorvedor de oxigênio em alface minimamente processada em uma agroindústria**. Dissertação, (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - UFRRJ, Seropédica, RJ.

SOUZA, R. D.; LOPES, E. R.; RAMOS, E. M.; OLIVEIRA, T. V.; OLIVEIRA, C. P. Active packaging: Development and characterization of polyvinyl alcohol (PVA) and nitrite film for pork preservation. **Food Chemistry**, v. 437, 137811, 2023.

Speranza, B., Corbo, M. R., Sinigaglia, M., & Bevilacqua, A. (2018). **Sodium alginate-based edible coatings for food preservation: A review**. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 1–10.

Sun, J. (2007). **D-Limonene: safety and clinical applications**. *Alternative Medicine Review*, 12(3).

Tapia, M. S., Rojas-Graü, M. A., Carmona, A., Rodríguez, F. J., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2007). **Edible coatings from alginate and their use in food preservation**. *Food Science and Technology International*, 13, 1–10.

TARIQUE, J.; SAPUAN, S. M.; KHALINA, A. **Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (Maranta arundinacea) starch biopolymers**. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 13900, jul. 2021.

Temiz, H., & Özdemir, M. (2021). **Gelatin-based edible films and coatings: A review**. *Food Hydrocolloids*, 112, 106269.

Tomaska, L. D., Brooke-Taylor, S., Motarjemi, Y., Moy, G., & Todd, E. (2014). **Food Additives**. In *Encyclopedia of Food Safety*. Cambridge: Academic Press, 1ed, v. 2, p. 449–454.

WANG, J.; HUANG, S.; YAN, K.; SHI, J.; SHI, S.; JIN, Y.; YUAN, L. Sustainable macromolecular antioxidants from eugenol with synergistically enhanced storage stability for active PVA packaging. **Reactive and Functional Polymers**, v. 191, 105671, 2023.

WU, F.; ZHOU, Z.; LI, N.; CHEN, Y.; ZHONG, L.; LAW, W. C.; TANG, C. Y. Development of poly (vinyl alcohol)/starch/ethyl lauroyl arginate blend films with enhanced antimicrobial and physical properties for active packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 192, p.389-397, 2021.

WU, W.; LIU, L.; GOKSEN, G.; DEMIR, D.; SHAO, P. Multidimensional (0D-3D) nanofillers: Fascinating materials in the field of bio-based food active packaging. **Food Research International**, v.157, 111446, 2022.

Xu, Y., Kim, K. M., Hanna, M. A., & Nag, D. (2020). **Sodium alginate-based edible films and coatings: A review**. *Food Hydrocolloids*, 105, 105744.

Yang, C., Chen, H., Chen, H., Zhong, B., Luo, X., & Chun, J. (2017). **Antioxidant and Anticancer Activities of Essential Oil from Gannan Navel Orange Peel**. *Molecules*, 22(8), 1391.

YILDIRIM, S.; RÖCKER, B.; PETTERSEN, M. K.; NILSEN-NYGAARD, J.; AYHAN, Z.; RUTKAITE, R.; RADUSIN, T.; SUMINSKA, P.; MARCOS, B.; COMA, V. Active Packaging Applications for Food. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 17, n. 1, p. 165–199, jan. 2018.

Zhang, M. L., Tao, N. G., & Liu, Y. J. (2009). **Chemical composition and antimicrobial activities of essential oil from the peel of bingtang sweet orange (*Citrus sinensis* Osbeck)**. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(7), 1281–1285.