

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

DEVELOPMENT OF ACTIVE PACKAGING BASED ON ALGINATE AND ORANGE ESSENTIAL OIL FOR THE PRESERVATION OF MOZZARELLA CHEESE

DOI: 10.65747/conali2025v2c16

Alice Maria Zeferino dos Santos¹; Gabriel Paiva Ourem²; Maria Clara Barbosa Nascimento³; Marina Gomes Silva⁴; Glória Maria Vinhas⁵; Ingrid Larissa da Silva Santana⁶

¹Estudante do Curso de Engenharia Química - DEQ – UFPE; E-mail: alice.zeferino@ufpe.br

² Estudante do Curso de Engenharia Química – DEQ – UFPE; Email: gabriel.paiva@ufpe.br

³ Estudante do Curso de Ciências Biológicas – CB – UFRPE; E-mail: mariaclara.nascimento@ufrpe.br

⁴ Pesquisadora do Depto de Engenharia Química – DEQ – UFPE; E-mail: marina.gomess@ufpe.br

⁵Docente do Depto de Engenharia Química– DEQ – UFPE; E-mail: gloria.vinhas@ufpe.br

⁶ Pesquisadora do Depto de Engenharia Química – DEQ – UFPE; E-mail: ingrid.larissa@ufpe.br

Resumo: As embalagens ativas (EA) são sistemas que, além de protegerem os alimentos, liberam compostos com ação antimicrobiana e antioxidante, prolongando sua vida útil. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar filmes de alginato de sódio com óleo essencial de laranja doce (OEL) para conservação de queijo muçarela. Para o teste da atividade antimicrobiana do OEL, foi avaliada a *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. Os filmes foram produzidos por casting, com diferentes concentrações de glicerol (2% e 20%) e OEL. As análises físico-químicas (FT-IR e TGA) mostraram que o OEL não afetou a estrutura química nem a estabilidade térmica dos filmes. Ensaio mecânicos indicaram que maior teor de glicerol aumentou a flexibilidade, enquanto menor teor melhorou a resistência. Nos testes com queijo muçarela, os filmes com 15% de OEL reduziram significativamente o crescimento microbiano durante 9 dias de refrigeração. Conclui-se que os filmes possuem potencial como embalagens ativas biodegradáveis, contribuindo para a conservação de alimentos e redução de desperdícios.

Palavras-chave: Alginato de sódio; Embalagens ativas; Conservação de alimentos; Óleo essencial de laranja doce.

Abstract: Active packaging (AP) is a system which, as well as protecting food, releases compounds with antimicrobial and antioxidant action, prolonging its shelf life. The aim of this study was to develop and characterize sodium alginate films with sweet orange essential oil (OEL) for preserving mozzarella cheese. Initially, the antimicrobial activity of OEL against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* was evaluated. The films were produced by casting with different concentrations of glycerol (2% and 20%) and OEL. Physico-chemical analyses (FT-IR and TGA) showed that OEL did not affect the chemical structure or thermal stability of the films. Mechanical tests indicated that a higher glycerol content increased flexibility, while a lower content improved resistance. In tests with mozzarella cheese, films with 15% OEL significantly reduced microbial growth during 9 days of refrigeration. It can be concluded that the films have potential as active biodegradable packaging, contributing to food preservation and reducing waste.

Keywords: Active packaging; Food preservation; Sodium alginate; Sweet orange essential oil.

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 (1).

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 (2).

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 expensor, além de ser utilizado na formação de géis, filmes e membranas (3,4).

Os aditivos alimentares são substâncias adicionadas aos alimentos com o objetivo de preservar o sabor, melhorar a textura e prolongar a vida útil, podendo ser de origem química, natural ou sintética. A utilização de aditivos alimentares industrialmente é aprovada por legislação e é recomendada pelo Codex Alimentarius (5,6); 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) (7).

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 (8). 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 ativos. 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 (9).

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 registou um crescimento de 7,1%. Em 2019, o mercado global atingiu seu maior nível no período analisado (10).

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 registou 4,4% e a França 1,3% (11). 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 (11).

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.

MATERIAL E MÉTODOS

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.

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.

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®), 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.

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.

Ensaio 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.

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 termo balança sob atmosfera de nitrogênio, com fluxo constante de 50 mL.min⁻¹, 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⁻¹. Amostras de aproximadamente 5 mg de cada formulação foram cuidadosamente pesadas e colocadas no cadinho da termo balança. 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.

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⁻¹, 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.

Crescimento do microrganismo no queijo muçarela

A aplicação dos filmes desenvolvidos como embalagens para queijo muçarela seguiu a metodologia adaptada de Dannenberg *et al.* (12). 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⁻¹, conforme a escala de McFarland) foi inoculado em um dos lados do queijo. Sobre esse lado, cada tipo de filme desenvolvido foi posicionado, e os sistemas foram condicionados em sacos *ziplock*. O mesmo processo foi feito para outro sistema com a bactéria *Staphylococcus aureus* (10^8 UFC·mL⁻¹, 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.

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.

Avaliação das atividades antimicrobianas do óleo essencial de laranja doce

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.

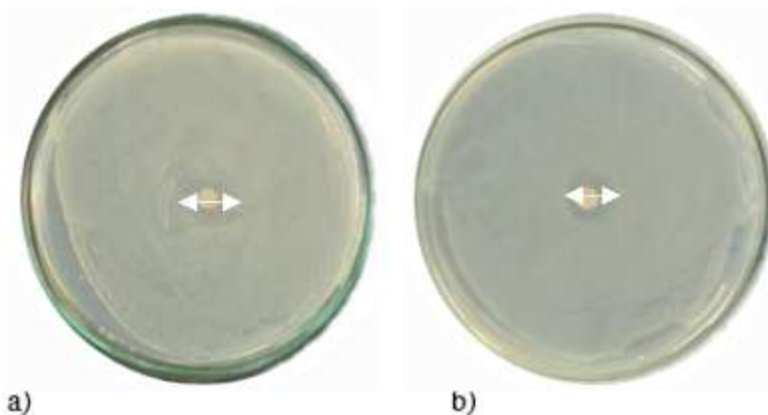


Figura 1 - Teste de disco-difusão do OC para as bactérias: a) *Staphylococcus aureus* b) *Escherichia coli*.

Fonte: Autores, 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.* (14), 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.

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: Autores, 2025

A Figura 2 apresenta os filmes produzidos para avaliação da transparência, utilizando a imagem de uma flor como plano de fundo: (a) sem a adição de óleo essencial de laranja (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.

Caracterização dos materiais

Os ensaios mecânicos de tração, a análise termogravimétrica (TGA) e a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) demonstraram diferenças nas propriedades físicas, térmicas e estruturais dos filmes poliméricos produzidos com e sem a adição de óleo essencial de laranja (OEL), evidenciando o impacto do OEL no desempenho dos materiais.

Ensaio 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: Autores, 2025

Segundo Callister e Resthwich (15), 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 (15). 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.

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.

a)

b)

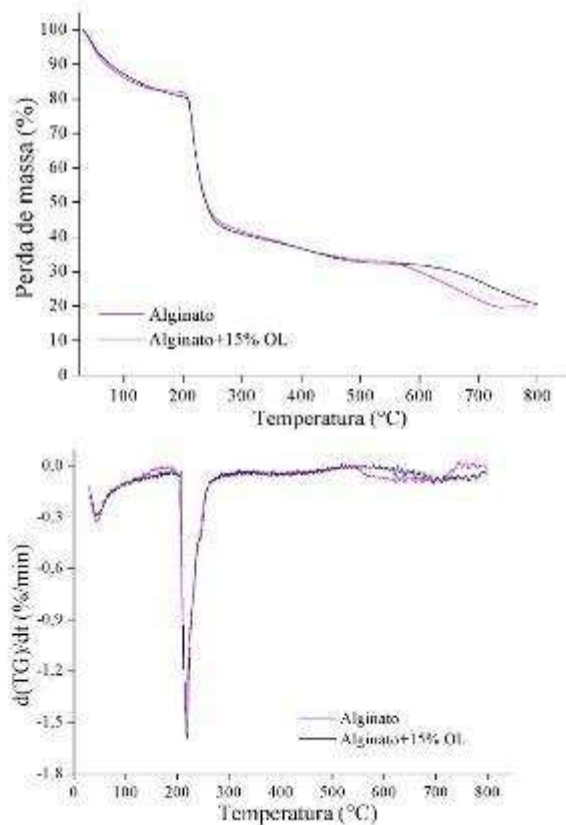


Figura 3- Curvas de TGA e suas derivadas em relação ao tempo, respectivamente, dos filmes de: alginato e alginato + 15% de OE.
Fonte: Autores, 2025

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 (16). 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.

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

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) dos filmes de alginato com 20% de glicerol, apresentados na Figura 4, revelou os grupos funcionais presentes em suas estruturas, tanto na forma pura quanto com 15% de OEL.

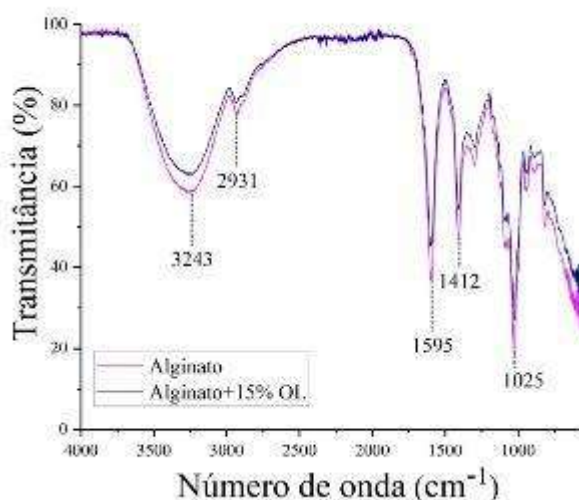


Figura 4- Espectros FT-IR para os filmes de alginato puro e com 15% de OEL.

Fonte: Autores, 2025

De acordo com a Figura 4, observa-se uma banda larga em aproximadamente 3243 cm^{-1} , atribuída à vibração axial dos grupos hidroxila (-OH), característica de ligações de hidrogênio entre as moléculas de alginato e glicerol (17). 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 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 cm^{-1} e 1412 cm^{-1} correspondem às vibrações assimétricas e simétricas do grupo carboxilato ($-\text{COO}^-$), confirmando a presença da estrutura química do alginato (18). 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 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 (19). 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.

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*.

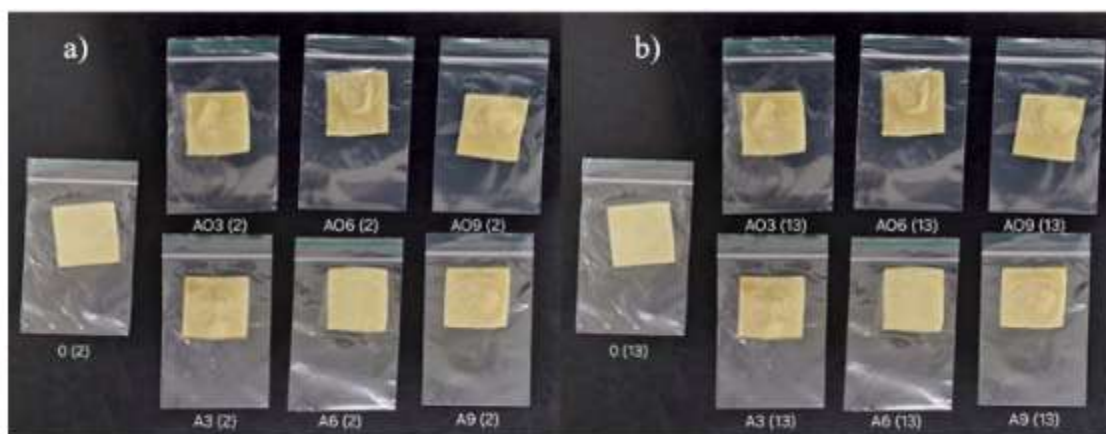


Figura 5- Sistemas experimentais para a análise da cinética de crescimento microbiano em queijo muçarela para: (a) *Staphylococcus aureus* e (b) *Escherichia coli*.

Fonte: Autores, 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 contagem microbiana de cada sistema foi feita 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.

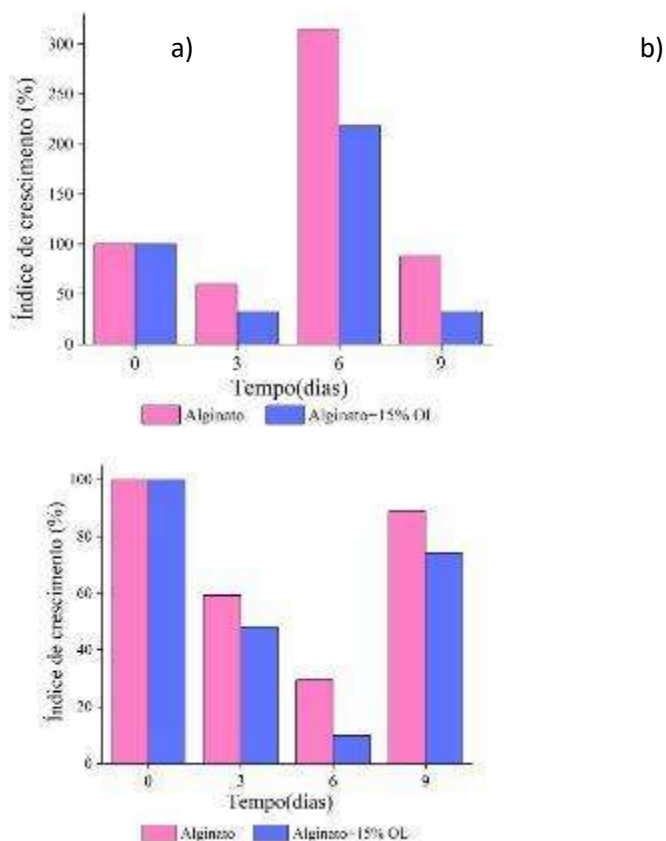


Figura 6- Índice de crescimento da *Escherichia coli* (a) *Staphylococcus aureus* (b) no queijo muçarela em contato com os filmes de alginato puro e alginato + 15% de OE.

Fonte: Autores, 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.* (19), 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: Autores, 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.* (20), 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.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da formulação proposta, tanto em termos de propriedades físico-químicas e mecânicas quanto à eficácia antimicrobiana. A avaliação preliminar da atividade antimicrobiana do OEL comprovou sua eficácia contra as bactérias *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, validando sua aplicação como composto ativo em sistemas de embalagem. Os filmes desenvolvidos apresentaram boa integridade estrutural, transparência e resistência mecânica, sendo que a adição de glicerol influenciou diretamente a flexibilidade e rigidez dos materiais, enquanto o OEL contribuiu para o aumento da resistência e da rigidez, especialmente nas formulações com menor teor de plastificante.

As análises térmicas (TGA) indicaram que a incorporação do OEL não comprometeu a estabilidade térmica da matriz polimérica, e os espectros de FT-IR demonstraram que não houve formação de novas ligações químicas, sugerindo interações físicas entre os constituintes dos filmes. A aplicação dos filmes como embalagens para queijo muçarela mostrou-se eficaz na inibição do crescimento microbiano durante o armazenamento refrigerado por até 9 dias, com destaque para os filmes contendo 15% de OEL, que apresentaram menor índice de crescimento bacteriano em comparação aos filmes sem aditivo.

Dessa forma, conclui-se que os filmes de alginato de sódio incorporados com óleo essencial de laranja possuem potencial promissor como embalagens ativas biodegradáveis, contribuindo para a conservação de alimentos perecíveis e redução do

uso de conservantes sintéticos, além de promover práticas mais sustentáveis na cadeia produtiva de alimentos.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a avaliação da aplicação desses filmes em outros tipos de alimentos perecíveis, bem como a análise sensorial e de migração do composto ativo. Além disso, estudos envolvendo a combinação de diferentes óleos essenciais ou o uso de nano compostos podem ampliar a funcionalidade e a eficácia desses materiais, consolidando seu uso industrial em embalagens inteligentes e ambientalmente responsáveis.

REFERÊNCIAS

1. MARTINAZZO, J.; PIAZZA, S. P.; SCHERER, G. C.; PIETA, L. Embalagens ativas: uma tecnologia promissora na conservação de alimentos. *Braz J Food Res*, v. 11, n. 2, p. 171-194, 2020.
2. BRAGA, L. R.; SILVA, F. M. Embalagens ativas: uma nova abordagem para embalagens alimentícias. *Braz J Food Res*, v. 8, n. 4, p. 170-186, 2017.
3. 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 Food Sci Technol*, v. 105, p. 385-401, 2020.
4. 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 Res Int*, v. 157, p. 111446, 2022.
5. CODEX ALIMENTARIUS. General Standard for Food Additives (Internet). 2019 (citado 2025 jan 10).
6. TOMASKA, L. D.; BROOKE-TAYLOR, S.; MOTARJEMI, Y.; MOY, G.; TODD, E. Food Additives. In: *Encyclopedia of Food Safety*. Cambridge: Academic Press, v. 2, p. 449-454, 2014.
7. HONORATO, T. C.; SILVA, M. V. S.; OLIVEIRA, A. L. Aditivos alimentares: aplicações e toxicologia. *Rev Verde Agroecol Desenvol Sustentável*, v. 5, n. 8, p. 1-11, 2013.
8. 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). *Int J Sci Rep*, v. 19, p. 14143, 2024.
9. FERRONATTO, A. N.; ROSSI, R. C. Extração e aplicação do óleo essencial da casca da laranja como um ingrediente natural. *Estud Tecnol Eng*, v. 12, n. 2, p. 78-93, 2018.
10. MILKPOINT. O consumo de queijos pelos brasileiros (Internet). 2021 (citado 2025 jan 20).
11. ABIQ. Associação Brasileira das Indústrias de Queijos. Consumo per capita de queijos no Brasil (Internet). 2021 (citado 2025 jan 20).
12. DANNENBERG, G. S.; FUNCK, G. D.; GRUXEN, 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.
13. HEBERLE, T.; KRINGEL, D. H.; DANNENBERG, G.; EVANGELHO, J. A.; OLIVEIRA, R. P.; 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.

14. CALLISTER, W. D. Jr; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817 p.
15. 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*, v. 31, 2023.
16. JAHED, F.; SHAHABI-GHAFARROKHI, I.; OROMIEHIE, A. Physical and mechanical properties of sodium alginate films incorporated with clove essential oil. *Carbohydr Polym*, v. 157, p. 1-8, 2017.
17. CARPINÉ, D.; GRANDO, M. F.; BERTOLINI, S. M.; SOARES, N. D.; QUADRI, M. G. N. Development and characterization of active films based on cassava starch and pinhão seed coat extract. *J Polym Environ*, v. 24, p. 71-79, 2016.
18. DOĞAN, O. B.; ALEMDAR, S.; DOĞAN, M. Chitosan-based edible films and coatings for food preservation: A review. *Int J Biol Macromol*, v. 210, p. 669-681, 2022.
19. ANDRADE, M. F.; SILVA, I. D. L.; SILVA, G. A.; CAVALCANTE, P. V. D.; SILVA, F. T.; ALMEIDA, Y. M. B.; et al. A study of poly (butylene adipate-co-terephthalate)/orange essential oil films for application in active antimicrobial packaging. *LWT*, v. 125, p. 109148, 2020.