

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL - CAMPUS FELIZ

GABRIELA POZZEBON

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE ÓLEO ESSENCIAL  
DE CAPIM-LIMÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS, TÉRMICAS E  
ANTIBACTERIANAS DE FILMES DE AMIDO DE MILHO**

FELIZ  
2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL - CAMPUS FELIZ

GABRIELA POZZEBON

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE ÓLEO ESSENCIAL  
DE CAPIM-LIMÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS, TÉRMICAS E  
ANTIBACTERIANAS DE FILMES DE AMIDO DE MILHO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de  
bacharelado em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Daiane Romanzini

FELIZ

2024

**GABRIELA POZZEBON**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE ÓLEO ESSENCIAL  
DE CAPIM-LIMÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS, TÉRMICAS E  
ANTIBACTERIANAS DE FILMES DE AMIDO DE MILHO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luiza Pieta

---

Prof.<sup>a</sup> Ma. Flávia Dagostim Minatto

**ORIENTADOR**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Daiane Romanzini

Feliz, 21 de novembro de 2024.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Renato e Silvia Pozzebon, pelo amor, apoio e inspiração constantes ao longo de minha jornada. A vocês, que sempre acreditaram no meu potencial, mesmo nos momentos mais difíceis, e me ensinaram o valor da dedicação e da perseverança. Obrigada por cada conselho e cada gesto de carinho. Este trabalho é uma pequena forma de retribuir tudo o que fizeram e continuam fazendo por mim.

Com todo o meu amor e gratidão.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, disposição e coragem ao longo desta jornada. A Nossa Senhora, pelo amparo e pela intercessão nos momentos em que mais precisei. À família GOJ São José, minha gratidão pelo apoio que me fortaleceu durante este caminho.

Agradeço imensamente aos meus pais, Renato e Silvia Pozzebon, e ao meu irmão, Antonio Pozzebon, pelo incentivo constante e por estarem sempre ao meu lado. Em todos os momentos, pude contar com o apoio e a presença de vocês.

Ao meu noivo, Cristian Granzotto, minha profunda gratidão pelo amor, paciência e apoio incondicional. Obrigada por acreditar em mim, por me incentivar nos momentos de dúvida e por estar ao meu lado em cada etapa deste trabalho.

Um agradecimento especial à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Daiane Romanzini pela dedicação, paciência e orientação durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Seus conselhos valiosos e sua constante disponibilidade foram essenciais para o meu crescimento acadêmico, muito obrigada.

Aos meus amigos, minha sincera gratidão pela amizade e apoio ao longo desta jornada. Em especial, agradeço à minha amiga Leticia Pagliosa, por juntas enfrentarmos desafios, celebrarmos conquistas e tornarmos cada etapa mais leve e especial. A presença e o companheirismo de cada um foram fundamentais durante os 5 anos de curso.

Agradeço ao Prof. Dr. Édson L. Francisquetti do Instituto Federal do Rio Grande do Sul, campus Farroupilha, pela realização da análise termogravimétrica (TGA) e da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). À Prof.<sup>a</sup> Ma. Eliana Della Coletta Yudice do Instituto Adolfo Lutz de Santo André/SP pela realização das análises de concentração mínima inibitória (CIM), concentração bactericida mínima (CBM) e análise microbiológica. Expresso também minha gratidão à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cleide Borsoi pelas dicas e conhecimento compartilhado.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A cada um de vocês, meu mais sincero agradecimento.

## RESUMO

Filmes de amido incorporados com óleo essencial estão sendo cada vez mais estudados no cenário atual como uma alternativa ao uso dos materiais tradicionais em embalagens. O objetivo do presente estudo foi avaliar a influência da incorporação de diferentes concentrações de óleo essencial nas propriedades térmicas, químicas, físicas e antibacterianas de filmes de amido de milho. Para isso, em um primeiro momento o óleo essencial foi caracterizado quanto às concentrações inibitória mínima (CIM) e bactericida mínima (CBM), a fim de avaliar a concentração necessária para os filmes adquirirem atividade antibacteriana. As formulações dos filmes foram desenvolvidas através do método de *casting*, utilizando como matéria-prima principal o amido de milho e como agentes plastificantes o glicerol e o sorbitol. O óleo essencial de capim-limão (OECL) utilizado na formulação foi previamente escolhido após a revisão bibliográfica e foi incorporado ao amido através de um método de cisalhamento desenvolvido pela autora. Para a caracterização dos filmes foram realizadas as análises de espessura, absorção de água, solubilidade, degradação em meio ácido, alcalino e salino, análise termogravimétrica (TGA), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise microbiológica. As análises da CIM e CBM demonstraram que o OECL foi eficaz para todas as bactérias testadas, determinando as concentrações de 1,6%, 3,2% e 6,3% utilizadas nos filmes em base seca de amido. A espessura dos filmes variou entre 0,290 e 0,310 mm, sem diferenças significativas entre formulações, e os filmes apresentaram superfície homogênea, boa transparência e ausência de partículas insolúveis. Como esperado, a absorção de água e solubilidade diminuíram de forma proporcional à adição de OECL nas formulações. A TGA revelou que o filme com 6,3% de OECL apresentou menores temperaturas de degradação em até 10% de perda de massa da amostra. Ademais, foi observado uma maior massa residual nos filmes que continham o óleo. A partir da FTIR, foi possível notar a boa homogeneidade dos filmes e a eficaz incorporação do OECL. No entanto, na análise microbiológica, nenhuma das formulações inibiu o crescimento bacteriano. Dessa forma, concluiu-se que a incorporação de OECL melhorou as propriedades físicas, químicas e térmicas dos filmes, embora ajustes sejam necessários para otimizar sua eficácia antibacteriana.

**Palavras-chave:** Filmes. Amido de milho. Óleo essencial de capim-limão.

## ABSTRACT

Starch films incorporated with essential oil are increasingly studied as a potential alternative to traditional materials in packaging applications. The present study aimed to evaluate the influence of incorporating different concentrations of essential oil on the thermal, chemical, physical, and antibacterial properties of corn starch films. Initially, the essential oil was characterized to determine its minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) to assess the concentration required for the films to exhibit antibacterial activity. Film formulations were developed using the casting method, with corn starch as the primary raw material and glycerol and sorbitol as plasticizing agents. Lemongrass essential oil was selected based on a literature review and incorporated into the starch matrix through a shear method developed by the author. The films were characterized by thickness, water absorption, solubility, degradation in acidic, alkaline, and saline media, thermogravimetric analysis (TGA), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and microbiological analysis. MIC and MBC analyses demonstrated that lemongrass essential oil was effective against all tested bacteria, establishing concentrations of 1.6%, 3.2%, and 6.3% in the films on a dry starch basis. The thickness of the films ranged from 0.290 to 0.310 mm, with no significant differences among formulations. The films exhibited a homogeneous surface, good transparency, and an absence of insoluble particles. As expected, water absorption and solubility decreased proportionally with the addition of lemongrass essential oil to the formulations. TGA revealed that the film with 6.3% lemongrass essential oil presented lower degradation temperatures with up to a 10% mass loss, along with a higher residual mass in films containing the oil. FTIR analysis confirmed the good homogeneity of the films and effective incorporation of lemongrass essential oil. However, microbiological analysis indicated that none of the formulations inhibited bacterial growth. Thus, it was concluded that the incorporation of lemongrass essential oil improved the physical, chemical, and thermal properties of the films, although further optimization is needed to enhance antibacterial efficacy.

**Keywords:** Films. Corn starch. Lemongrass essential oil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microscopia eletrônica de diferentes amidos (4500x). .....	18
Figura 2 – Estrutura molecular da amilopectina e amilose.....	18
Figura 3 – A: Ilustração do processo de gelatinização; B: MEV da microestrutura do amido nativo; C: MEV da microestrutura do gel de amido.....	20
Figura 4 – Corte transversal do grão de milho. ....	22
Figura 5 – Estrutura molecular do glicerol e sorbitol. ....	24
Figura 6 – Alguns dos principais componentes dos óleos essenciais. ....	26
Figura 7 – Mecanismo de ação dos óleos essenciais. ....	28
Figura 8 – <i>Melaleuca alternifolia</i> .....	29
Figura 9 – Principais componentes do óleo essencial de melaleuca. ....	31
Figura 10 – Termograma do óleo essencial de melaleuca.....	32
Figura 11 – <i>Cymbopogon flexuosus</i> .....	33
Figura 12 – Principais componentes do óleo essencial de capim-limão.....	35
Figura 13 – Termograma do óleo essencial de capim-limão.....	36
Figura 14 – Técnica de <i>casting</i> . ....	39
Figura 15 – Ilustração da incorporação de OE no filme de amido.....	41
Figura 16 – Matérias-primas utilizadas na preparação dos filmes de amido. ....	46
Figura 17 – Etapas de estudo. ....	47
Figura 18 – Fluxograma do processo de incorporação do óleo essencial de.....	50
capim-limão.....	50
Figura 19 – Fluxograma do processo de obtenção dos filmes de amido incorporados com OECL.....	51
Figura 20 – Medida da espessura dos filmes nas posições determinadas.....	52
Figura 21 – CIM (círculos amarelos) e CBM (círculos vermelhos) do OEM, após 24h, contra <i>S. enterica</i> (A), <i>E. coli</i> (B) e <i>S. aureus</i> (C).....	55
Figura 22 – CIM (círculos amarelos) e CBM (círculos vermelhos) do OECL, após 24h, contra <i>S. enterica</i> (A), <i>E. coli</i> (B) e <i>S. aureus</i> (C).....	57
Figura 23 – Aspecto visual dos filmes de amido em fundos branco e preto: (B) Branco, (C1) 1,6% de OECL, (C2) 3,2% de OECL e (C3) 6,3% de OECL. ....	61
Figura 24 – Absorção de água dos filmes. ....	62
Figura 25 – Solubilidade dos filmes.....	64
Figura 26 – Amostras dos filmes antes da etapa de degradação.....	65

Figura 27 – Amostras dos filmes após a etapa de degradação: 1 – meio ácido; 2 – meio alcalino; 3 – meio salino. ....	65
Figura 28 – Degradação em meio ácido (A) e em meio salino (B). ....	67
Figura 29 – Gráficos TGA (a) e DTG (b) para o óleo essencial (OECL) e para os filmes estudados.....	69
Figura 30 – Espectro FTIR nos filmes de amido sem óleo essencial (Branco), 1,6% OECL (C1), 3,2% OECL (C2), 6,3% OECL (C3) e do OECL puro. ....	71
Figura 31 – Áreas destacadas da análise FTIR. ....	73
Figura 32 – FTIR para verificar a homogeneidade do OE nos filmes: C1) 1,6% OECL; C2) 3,2% OECL; C3) 6,3% OECL. ....	74
Figura 33 – Análise microbiológica dos filmes para as bactérias <i>Salmonella enterica</i> e <i>Escherichia coli</i> . ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Amilose e amilopectina presentes em diferentes fontes de amido.....	19
Tabela 2 – Intervalo de temperaturas de gelatinização para diferentes fontes de amido. .....	21
Tabela 3 – Perfil cromatográfico do óleo essencial de melaleuca.....	30
Tabela 4 – Composição química do óleo essencial de melaleuca determinada através de GC-MS. ....	31
Tabela 5 – Perfil cromatográfico do óleo essencial de capim-limão.....	34
Tabela 6 – Composição química do óleo essencial de capim-limão determinada através de GC-MS.....	34
Tabela 7 – Valores de CIM e CBM do OEM e OECL para diferentes bactérias.....	37
Tabela 8 – Concentração dos OE's em cada poço para a determinação de CIM e CBM. .....	48
Tabela 9 – Porcentagem de OECL em cada um dos filmes.....	49
Tabela 10 – CIM e CBM do óleo essencial de melaleuca contra as bactérias <i>S.</i> <i>enterica</i> , <i>E. coli</i> e <i>S. aureus</i> .....	56
Tabela 11 – CIM e CBM do óleo essencial de capim-limão contra as bactérias <i>S.</i> <i>enterica</i> , <i>E. coli</i> e <i>S. aureus</i> .....	57
Tabela 12 – Espessura dos diferentes tipos de filmes. ....	59
Tabela 13 – Principais resultados da degradação térmica para os filmes estudados. .....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBM	Concentração Bactericida Mínima
CIM	Concentração Inibitória Mínima
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
OE	Óleo essencial
OECL	Óleo essencial de Capim-Limão
OEM	Óleo essencial de Melaleuca
TGA	Análise Termogravimétrica
TPS	<i>Thermoplastic starch</i>

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	14
1.1 OBJETIVOS .....	16
1.1.1 Objetivo geral .....	16
1.1.2 Objetivos específicos .....	16
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	17
2.1 AMIDO.....	17
2.1.1 Amido de milho.....	21
2.2 AMIDO TERMOPLÁSTICO .....	22
2.3 ÓLEO ESSENCIAL .....	24
2.3.1 Óleo essencial de Melaleuca ( <i>Melaleuca alternifolia</i> ).....	28
2.3.2 Óleo essencial de Capim-Limão ( <i>Cymbopogon flexuosus</i> ).....	32
2.3.3 Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida Mínima (CBM).....	36
2.4 TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE FILMES DE AMIDO.....	38
2.4.1 Incorporação do óleo essencial em filmes de amido.....	40
2.4.1.1 Incorporação do OE sem surfactante.....	41
2.4.1.2 Incorporação do OE com surfactante.....	42
2.4.2 Possíveis aplicações .....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 MATERIAIS .....	46
3.2 METODOLOGIA.....	46
3.2.1 Caracterização do OEM e OECL: Concentração Mínima Inibitória (CIM) e Concentração Bactericida Mínima (CBM) .....	47
3.2.2 Caracterização do amido de milho: Teor de umidade .....	48
3.2.3 Desenvolvimento dos filmes.....	49
3.2.4 Técnicas de caracterização dos filmes.....	51
3.2.4.1 Espessura .....	51
3.2.4.2 Absorção de água .....	52
3.2.4.3 Solubilidade.....	52
3.2.4.4 Degradação em meio ácido, alcalino e salino .....	53
3.2.3.5 Análise termogravimétrica (TGA) .....	53
3.2.3.6 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	53

3.2.3.7 Análise microbiológica.....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	55
4.1 CONCENTRAÇÃO INIBITÓRIA MÍNIMA (CIM) E CONCENTRAÇÃO BACTERICIDA MÍNIMA (CBM) DO OEM E OECL.....	55
4.2 TEOR DE UMIDADE DO AMIDO DE MILHO.....	59
4.3 ESPESSURA E ASPECTO VISUAL .....	59
4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	61
4.5 SOLUBILIDADE .....	63
4.6 DEGRADAÇÃO EM MEIO ÁCIDO, ALCALINO E SALINO .....	64
4.7 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) .....	68
4.8 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	70
4.9 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA.....	74
5 CONCLUSÕES .....	77
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	79
REFERÊNCIAS.....	80

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem ocorrido um aumento significativo no interesse pelo estudo dos óleos essenciais (OE) vegetais devido às suas propriedades funcionais e ativas. Os óleos essenciais são líquidos hidrofóbicos e voláteis, naturalmente presentes em plantas ou ervas aromáticas, sintetizadas em estruturas glandulares das células vegetais. Podem ser extraídos de várias partes das plantas, incluindo folhas, caules, flores e raízes (Konfo et al. 2023; Su et al., 2024).

Estes metabólicos secundários correspondem a menos de 5% da matéria seca vegetal e são constituídos por diversos compostos voláteis, principalmente terpenos, compostos aromáticos (álcool, fenol, aldeído, etc.) e componentes alifáticos, que conferem a eles aromas distintos (Zhou et al., 2021; Konfo et al. 2023).

Por serem de uma classe de substâncias bioativas naturais, os óleos essenciais podem ser aplicados nas áreas médica, agrícola, perfumaria e alimentícia, devido às suas propriedades antibacterianas, antioxidantes e antifúngicas (Bassolé; Juliani, 2012). Dessa forma, tornam-se uma alternativa promissora aos conservantes sintéticos (Su et al., 2024). No entanto, sua aplicação direta tem algumas limitações, pois a maioria dos compostos bioativos dos OE's é altamente volátil e facilmente desestabilizada quando exposta à luz, umidade, calor ou estresse mecânico, ocasionando uma rápida degradação com alteração em suas propriedades (Hossen et al., 2024; Almeida et al., 2020).

Diante desta problemática, diversos materiais porosos tem sido empregados para a incorporação de óleos essenciais. Dentre eles, pode-se citar o amido, zeólitas, estruturas metal-orgânicas e sílica mesoporosa (Su et al., 2024). Materiais baseados em amido possuem a vantagem de serem renováveis, biodegradáveis, amplamente disponíveis e baratos (Wang et al., 2021).

Em suma, o amido é uma substância polissacarídica proveniente de fontes vegetais e serve como reserva de energia produzida por algumas plantas. Sua estrutura possui uma organização semicristalina e é composta por amilose e amilopectina, que consistem em moléculas de glicose unidas por ligações covalentes, cuja composição e proporção são responsáveis pelas propriedades físico-químicas dos filmes à base de amido (Diniz, 2021; Malafatti et al., 2021; Srivastava et al., 2024). Este material é escolhido para estudos de desenvolvimento de filmes devido a sua boa estabilidade e sua característica de gelatinização, quando em contato com água,

a qual ocorre em baixas temperaturas (Padilha, 2019). No entanto, em comparação com outros polímeros sintéticos tradicionais, a presença de quantidades abundantes de grupos hidroxila na estrutura do amido o torna muito hidrofílico e solúvel em água, com alta permeabilidade ao vapor de água, o que limita sua aplicação (Ardjoum et al., 2023).

Todavia, estudos recentes demonstram que a incorporação de óleos essenciais em filmes de amido de diferentes fontes pode melhorar diversas propriedades dos filmes, como sua resistência à tração (Chenchen et al., 2020; Ardjoum et al., 2023; Martins et al., 2021; Syafiq; Sapuan; Zuhri, 2021; Zhou et al., 2021; Tian et al., 2024), resistência à água (Chenchen et al., 2020; Ardjoum et al., 2023; Pirouzifard et al., 2019; Al-Hashimi et al., 2020; Syafiq; Sapuan; Zuhri, 2021; Zhou et al., 2021; Tian et al., 2024), elasticidade (Martins et al., 2021; Mendes et al., 2020; Perdana et al., 2021) e também diminuição de sua solubilidade e permeabilidade (Martins et al., 2021; Mendes et al., 2020; Perdana et al., 2021; Pirouzifard et al., 2019).

Portanto, diante do exposto, este estudo teve como objetivo investigar a incorporação de diferentes concentrações do óleo essencial de capim-limão (*Cymbopogon flexuosus*) em filmes de amido, escolhido a partir de revisão literária em comparação com o óleo essencial de melaleuca (*Melaleuca alternifolia*). A intenção deste estudo foi aprimorar as características físicas, químicas e térmicas dos filmes de amido de milho, além de promover ação antibacteriana aos mesmos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da incorporação de diferentes concentrações de óleo essencial de capim-limão nas propriedades térmicas, químicas, físicas e antibacterianas de filmes de amido de milho.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a. Identificar um óleo essencial para ser utilizado no desenvolvimento dos filmes, de acordo com a relação entre a composição do óleo e as propriedades antibacterianas;
- b. Determinar o potencial antimicrobiano do óleo essencial escolhido através da concentração inibitória mínima (CIM) e concentração bactericida mínima (CBM);
- c. Desenvolver uma metodologia de adição de óleo essencial, em diferentes teores, em filmes de amido;
- d. Caracterizar os filmes de amido incorporados com óleo essencial, através de análises físicas de espessura, absorção de água e solubilidade, além de análises químicas de degradação em meio ácido, alcalino e salino;
- e. Avaliar, através da caracterização de termogravimetria (TGA), as propriedades de decomposição térmica dos filmes de amido incorporados com óleo essencial;
- f. Analisar, através da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), a homogeneidade dos filmes quanto à incorporação dos óleos essenciais, e as interações entre os constituintes;
- g. Verificar, por meio de análise microbiológica, as propriedades antibacterianas dos filmes de amido incorporados com óleo essencial;

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 AMIDO

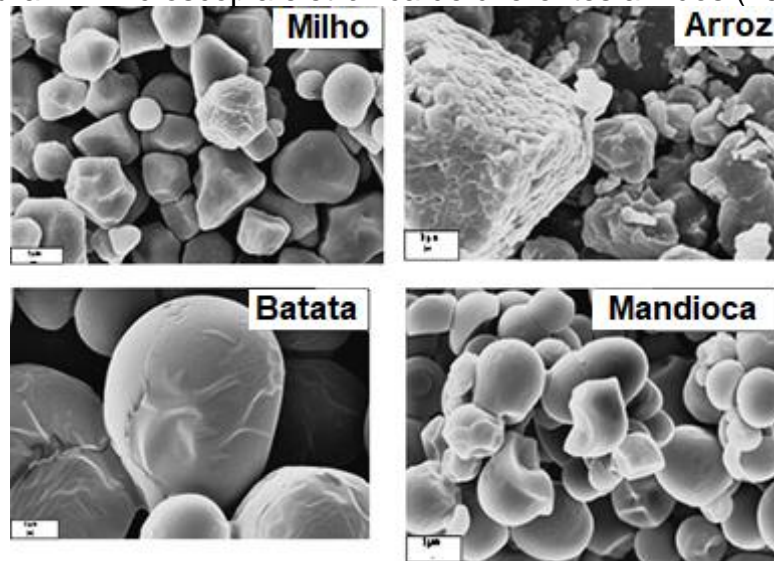
O amido, cuja fórmula molecular é  $C_6H_{10}O_5$ , é o polissacarídeo natural, renovável e biodegradável mais abundante e também é a principal fonte de carboidratos, constituindo um importante suprimento de energia para os seres humanos (Miao et al., 2012; Bertoft, 2017). Estando presente nas folhas de todas as plantas verdes e na maioria das sementes, frutos, caules, raízes e tubérculos (Robyt, 2008), é produzido nos cloroplastos, durante a fotossíntese, e utilizado no processo metabólico da planta (Perez; Agama-Acevedo, 2017), sendo acumulado durante o dia e degradado à noite (Diniz, 2021).

Dentre as suas principais vantagens, estão a rápida biodegradação, baixo-custo, a não-toxicidade e a abundância (Yu et al., 2021). A produção mundial de amido é predominantemente baseada em quatro matérias-primas: milho, trigo, mandioca e batata, com mais de 75% do amido proveniente de milho (Vilpoux; Brito; Cereda, 2019). No Brasil, a extração de amido em escala industrial é realizada exclusivamente com mandioca e milho (Santos et al., 2013). De acordo com a ReportLinker (2020), estima-se que o mercado global de amido atinja 156,3 milhões de toneladas métricas até 2025.

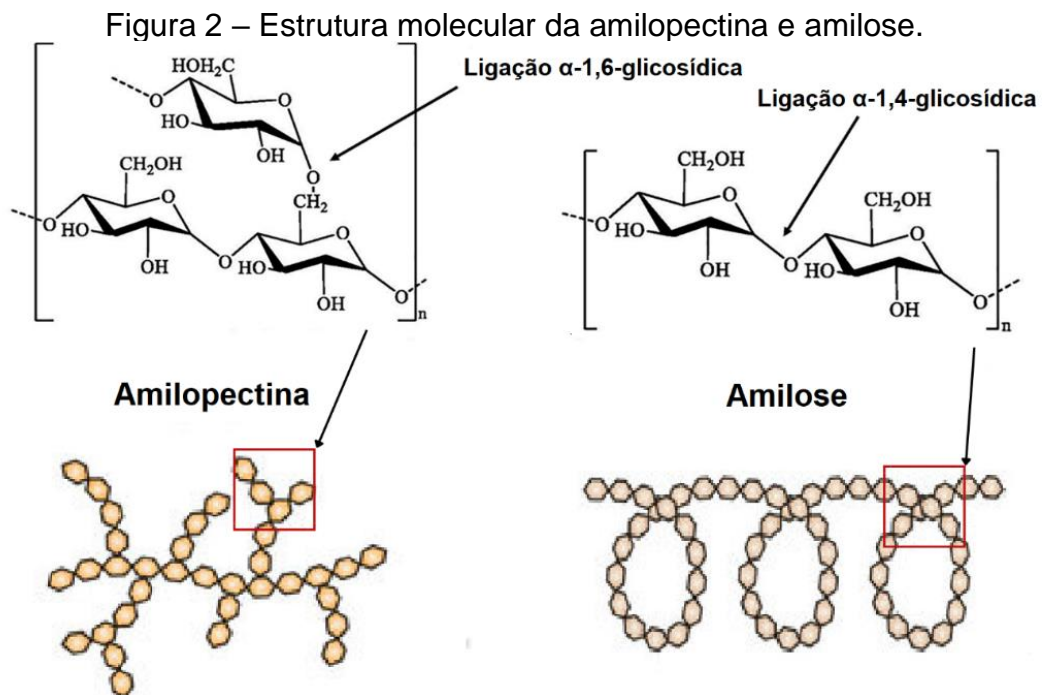
O amido se apresenta na forma de grânulos brancos, com dimensões, estrutura e forma diferentes para cada espécie vegetal, conforme mostra a Figura 1, e suas propriedades são influenciadas pela origem botânica, área de cultivo e clima (Bertoft, 2017; Castro et al., 2020). Em geral, os diâmetros variam entre 1 a 100  $\mu\text{m}$  e os formatos podem ser tanto regulares como irregulares (Isotton, 2013).

Os grânulos de amido são semicristalinos compostos por regiões amorfas e cristalinas em camadas alternadas formadas pela associação de dois polissacarídeos: amilose e amilopectina (Bertoft, 2017; Zhong et al., 2020; Alcázar-Alay; Meireles, 2015). A cristalinidade dos grânulos de amido geralmente varia de 20 a 45%, dependendo da proporção desses dois polímeros e, conseqüentemente, da fonte e idade do amido (Ojogbo; Ogunsona; Mekonnen, 2020). Na Figura 2, estão representadas as estruturas de ambas as moléculas.

Figura 1 – Microscopia eletrônica de diferentes amidos (4500x).



Fonte: adaptado de Guinesi et al. (2006).



Fonte: adaptado de Vianna et al. (2021).

A amilose é um polímero essencialmente linear com uma estrutura helicoidal, composta por unidades de glicose que estão ligadas umas às outras por uma ligação glicosídica  $\alpha$ -1,4 (Lemos et al., 2018). Já a amilopectina é composta de glicose em ligações glicosídicas  $\alpha$ -1,4, conectadas por pontos de ramificação, correspondendo a 5% da molécula, e ligadas a  $\alpha$ -1,6, resultando em uma estrutura complexa (Bertoft, 2017; Montero et al., 2017; Lemos et al., 2018).

Devido à estrutura ramificada, a amilopectina apresenta maior solubilidade, portanto, quanto maior a fração de amilopectina, maior a estabilidade do amido em um meio aquoso, bem como a flexibilidade do filme. Por outro lado, uma fração maior de amilose no amido pode formar filmes mais resistentes e mais firmes (Melo, 2018), com menor tendência a se expandir e solubilizar, devido a um maior conteúdo de moléculas hidrofóbicas (Alcázar-Alay; Meireles, 2015; Ojogbo; Ogunsona; Mekonnen, 2020).

Com exceções, a amilopectina constitui o principal componente em massa do amido, enquanto a amilose constitui de 15 a 30% (Bertoft, 2017). Pode-se observar, por exemplo, que enquanto o amido de milho apresenta 28,0% de amilose, o amido de mandioca possui 18,6%, levando a diferenças quanto à viscosidade e capacidade de gelatinização (Isotton, 2013; Gonçalves et al., 2024). As frações de amilose e amilopectina variam de acordo com a fonte de amido, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Amilose e amilopectina presentes em diferentes fontes de amido.

Fontes de amido	Amilose, %	Amilopectina, %
Araruta	20,5	79,5
Banana	17,0	83,0
Mandioca	18,6	81,4
Milho	28,0	72,0
Batata	17,8	82,2
Arroz	35,0	65,0
Trigo	20,0	80,0

Fonte: adaptado de Gonçalves et al (2024).

As estruturas moleculares de amilopectina e amilose, assim como suas respectivas frações, são críticas para as propriedades físico-químicas gerais do amido (Zhong et al., 2020; Li et al., 2020). Por exemplo, Yong et al. (2018) realizaram uma comparação entre as propriedades físicas e químicas de sete variedades de batata-doce. Diferenças significativas foram encontradas no tamanho dos grânulos, cristalinidade, teor de amilose e propriedades de gelatinização entre as diferentes variedades.

De acordo com Bobbio e Bobbio (2001), o amido é praticamente insolúvel em água fria, absorvendo até 30% da sua massa. No entanto, quando aquecido entre

65–90 °C na presença de água em excesso ou outros solventes que formam ligações de hidrogênio, seus grânulos absorvem água. Isso promove a quebra da matriz de amilopectina e a liberação de amilose no meio aquoso através do espaço intergranular.

Em decorrência disso, a estrutura semicristalina é desorganizada, causando inchaço, desordem molecular e solubilização dos grânulos de amido até alcançar uma fase irreversível conhecida como gelatinização, conforme ilustrado na Figura 3 (Gonçalves et al., 2024).

Figura 3 – A: Ilustração do processo de gelatinização; B: MEV da microestrutura do amido nativo; C: MEV da microestrutura do gel de amido.



Fonte: adaptado de Chen, Xu e Wang (2006).

A gelatinização depende das condições de processamento, como disponibilidade de água, tempo e temperatura (Alcázar-Alay; Meireles, 2015). Além disso, a temperatura mais alta de gelatinização observada nos amidos indica maior capacidade de resistir ao inchaço e ruptura (Kumar; Singh; Khatkar, 2023). Na Tabela 2, pode-se observar as diferentes temperaturas de gelatinização para variadas fontes de amido.

Tabela 2 – Intervalo de temperaturas de gelatinização para diferentes fontes de amido.

Fontes de amido	Inicial, °C	Final, °C
Mandioca	58,0	70,0
Milho	62,0	72,0
Batata	56,0	66,0
Arroz	61,0	72,0
Trigo	52,0	63,0

Fonte: adaptado de Isotton (2013).

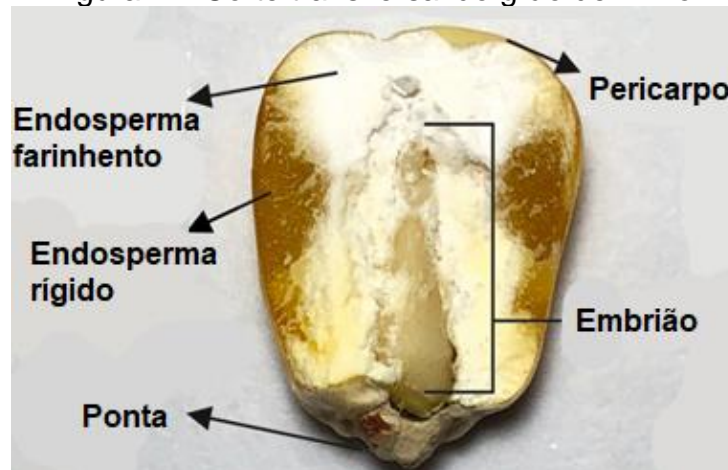
### 2.1.1 Amido de milho

O milho (*Zea mays L.*) é uma cultura de cereais herbácea anual pertencente à família das gramíneas. Acredita-se que tenha origem na Mesoamérica e agora é cultivado globalmente em regiões tropicais e temperadas, como as Américas, Ásia Oriental, Ásia Meridional, Sudeste Asiático e União Europeia (Wrigley et al., 2016). É a principal e mais importante cultura de cereais do mundo, sendo os EUA os principais produtores, seguidos da China e Brasil (Vilpoux; Brito; Cereda, 2019).

Cerca de 40% do amido de milho proveniente do processamento úmido é usado para a indústria não alimentícia, como fabricação de papel, têxteis, lavanderia, placas de gesso, adesivos e bioplásticos (Ranum; Peña-Rosas; Garcia-Casal, 2014). Além disso, com o desenvolvimento da biotecnologia, o amido de milho agora é o principal material usado na produção de bioetanol, pois pode ser facilmente convertido em açúcares simples (Lim, 2015).

O milho, como a principal fonte de amido, fornece mais de 85% do amido produzido em todo o mundo. Os grãos de milho consistem em 61–78% de amido, polissacarídeos não amiláceos (cerca de 10%), proteínas (6–12%) e lipídios (3–6%) (Zhang et al., 2021). O endosperma, região esbranquiçada do grão, representa aproximadamente 83% do peso seco do grão, sendo constituído principalmente de amido (88%), organizado na forma de grânulos (Liu et al., 2024). Na Figura 4, está a representação dos diferentes constituintes do grão de milho.

Figura 4 – Corte transversal do grão de milho.



Fonte: adaptado de Zhang et al. (2021).

## 2.2 AMIDO TERMOPLÁSTICO

O amido nativo possui propriedades desvantajosas para processamento e uso, pois seu ponto de fusão é acima de sua temperatura de degradação (Jumaidin et al., 2020). Portanto, para ser viável para uso e processamento, pode-se adicionar plastificantes na etapa de gelatinização.

Durante esse processo, a adição de plastificantes quebra as ligações de hidrogênio inter e intramoleculares na estrutura original do amido (Chen et al., 2019), estabelecendo assim novas interações por ligações de hidrogênio com grupos hidroxila nas moléculas, o que resulta em uma redução na temperatura de transição vítrea e uma melhoria na processabilidade do amido (Gomes-Caturla et al., 2024; Malafati et al., 2021).

Dessa forma, ocorre a formação de um amido termoplástico, do inglês *thermoplastic starch* (TPS), que é obtido por meio da adição do plastificante desejado como glicerol (Larrea-Wachtendorff; Nobile; Ferrari, 2020), ácido cítrico (Shi et al., 2007), formamida (Wang et al., 2008), sorbitol (Arezoo et al., 2020) e óleo de soja (Gao et al., 2020), em uma faixa de temperatura entre 80°C a 180°C (Malafati et al., 2021), reduzindo a força intermolecular entre as moléculas de amido e, conseqüentemente, melhorando sua mobilidade.

Os plastificantes mais estudados em combinação com os filmes de amido são os polióis, como o glicerol e o sorbitol, materiais que interagem com as cadeias de amido, aumentando a mobilidade molecular e, conseqüentemente, a flexibilidade dos filmes. Outro efeito é o aumento da hidrofiliçidade e permeabilidade ao vapor de água

dos filmes plastificados, já que a maioria dos plastificantes empregados em filmes de amido tem caráter hidrofílico (Shimazu; Mali; Grossmann, 2007; Mali et al., 2004).

No processo de plastificação ocorre a adição de moléculas de baixa massa molar miscível no polímero. Essas moléculas ocupam os espaços entre as cadeias, afastando-as e reduzindo as forças secundárias, levando a uma resistência mecânica menor, ou seja, uma redução no módulo elástico de tração e dureza. Esse efeito leva a um aumento da elongação na ruptura, ao mesmo tempo em que melhora a resistência ao impacto e facilita o processamento (Canevarolo, 2006; Santana; Jose; Rigoli, 2022).

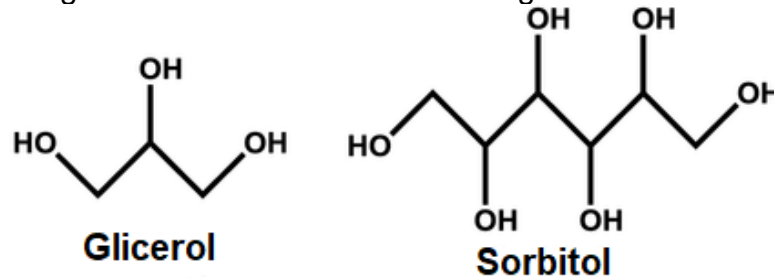
Os plastificantes são adicionados em proporções de 10 a 60 g por 100 g de amido, variando conforme a rigidez do material. No entanto, em concentrações baixas, menores de 20 g por 100 g de amido, podem causar um efeito contrário chamado antiplastificante, diminuindo a flexibilidade e hidrofiliabilidade. Isso acontece quando a quantidade de plastificante não é suficiente para aumentar a mobilidade molecular, o que também depende das condições de armazenamento (Shimazu; Mali; Grossmann, 2007).

O grupo hidroxila presente na estrutura da molécula de amido pode estabelecer fortes ligações de hidrogênio com a água (Gao et al., 2021), resultando em uma maior hidrofiliabilidade. O tamanho pequeno e alta permeabilidade de moléculas de água a tornam um plastificante eficaz, levando ao inchamento e desdobramento completo das cadeias de amido, dessa forma, facilitando a penetração de outros plastificantes (Yang et al., 2024b).

O glicerol e o sorbitol, conhecidos como polióis, são aditivos comumente utilizados e são populares devido ao seu baixo custo, mas principalmente porque fornecem características de flexibilidade aos filmes, reduzindo as ligações de hidrogênio nas cadeias poliméricas e aumentando o espaço molecular, por sua vez, adicionando uma melhor aparência visual (González-Torres et al., 2021; Madhumitha et al., 2018).

O glicerol é uma molécula orgânica que pode penetrar nas moléculas de amido. Já o sorbitol é uma molécula parcialmente hidrofóbica, com interação molecular mais forte com as cadeias poliméricas (Hazrol et al., 2021). Ambos otimizam as características desejadas do filme (González-Torres et al., 2021) e estão representados na Figura 5.

Figura 5 – Estrutura molecular do glicerol e sorbitol.



Fonte: adaptado de Orelma et al. (2019).

De modo geral, o glicerol confere aos filmes características como alta solubilidade, maior elasticidade e baixa resistência à tração, enquanto o sorbitol contribui para o brilho, menor transmissão de vapor para a água e maior suporte mecânico (Hu; Chen; Gao, 2009).

González-Torres et al. (2021) produziram filme de amido de batata utilizando glicerol e sorbitol como plastificantes, através da técnica de *casting*. Os autores relataram uma melhora nas propriedades do filme. Com base nos testes de resistência mecânica, os plastificantes aumentaram a flexibilidade dos filmes, promovendo uma redução na resistência à tração. Isso contribuiu para evitar a ruptura, conferindo ao material maior elasticidade. Wang et al. (2021), Syafiq, Sapuan e Zuhri (2021) e Arezoo et al. (2020) obtiveram resultados semelhantes.

### 2.3 ÓLEO ESSENCIAL

O termo óleo essencial foi criado no século XVI e refere-se à teoria da "*Quinta essentia*" proposta pelo famoso alquimista e médico alemão-suíço Paracelso (1493–1541), que definia o papel da alquimia ao desenvolver extratos de plantas e medicamentos à base de ervas. Ele acreditava que o processo de destilação extraía a parte mais significativa da planta, ou seja, a "*quintessência para a cura*" ou "*alma da planta*", separando os constituintes "essenciais" dos demais (Sousa et al., 2023a; Sadgrove; Padilla-González; Phumthum, 2022).

Diversos autores tentaram fornecer uma definição para óleos essenciais. De acordo com a ISO 9235:2021, óleo essencial é um produto obtido a partir de uma matéria-prima vegetal de origem natural através de diferentes métodos, tais como destilação a vapor, extração mecânica do epicarpo de frutas cítricas ou destilação a seco. Além disso, a ISO 9235:2021 afirma que após a obtenção, o óleo pode passar

por processos físicos para separar a fase aquosa e também pode ser tratado fisicamente sem alterar sua composição.

A maioria dos OE's são líquidos à temperatura ambiente (Konfo et al., 2023). No entanto, sua pressão de vapor é suficientemente alta para que sejam encontrados parcialmente no estado de vapor, nas condições de temperatura ambiente e pressão atmosférica (Dhifi et al., 2016).

Embora haja algumas exceções notáveis, como os óleos de canela, sassafrás e vetiver, óleos essenciais possuem uma densidade menor que a da água (Dhifi et al., 2016; Malik, 2019). Além disso, os componentes químicos dos OE's tendem a ter um peso molecular relativamente baixo, geralmente inferior a 300 g/mol. Alguns desses componentes são opticamente ativos e podem ser dissolvidos em solventes orgânicos comuns, como éter, álcool e acetona (Dhifi et al., 2016, Malik, 2019). Além disso, OE's são hidrofóbicos devido à sua natureza lipofílica, permitindo que eles atravessem facilmente a membrana das células de microrganismos (Su et al., 2024), despertando interesse pelo estudo desses compostos.

Em suma, os OE's estão localizados no citoplasma de certas secreções de células vegetais, que estão presentes em um ou mais órgãos da planta (Dhifi et al., 2016), correspondendo a menos de 5% da matéria seca vegetal (Konfo et al. 2023). Estes metabólitos secundários são constituídos por 20 a 60 compostos aromáticos, dos quais 85 a 99% são de natureza volátil (Varghese; Siengchin; Parameswaranpillai, 2020) presentes em folhas, caules, flores e raízes de plantas ou ervas aromáticas (Su et al., 2024).

Os constituintes voláteis definem as propriedades biológicas do óleo e são principalmente terpenos, compostos aromáticos (aldeído, álcool, fenol, etc.) e alifáticos (Bassolé; Juliani, 2012; Konfo et al., 2023). O odor característico dos óleos essenciais é atribuído aos álcoois, aldeídos e cetonas presentes no óleo (Santos et al., 2018).

A composição química dos OE's é formada por geralmente dois ou três componentes que estão presentes em proporções elevadas em comparação a outros constituintes presentes em pequenas concentrações (Chouhan; Sharma; Guleria, 2017). Por exemplo, o limoneno (93,9%) é o componente principal do óleo essencial de laranja (Evangelho et al., 2019) e o cinamaldeído (68,6%) do óleo essencial de canela (Tian et al., 2024). Para o OE de tomilho, Luna et al. (2024) encontraram como componente majoritário o cimeno (52,2%), no entanto para os autores Furlan,

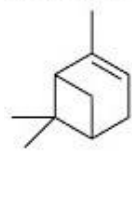
Silvestre e Baldasso (2023), foi o timol (33,0%). O rendimento dessas substâncias é influenciado por fatores como as condições de cultivo da planta, a composição química da espécie vegetal, a parte da planta da qual o óleo foi extraído e os métodos de secagem e extração (Angane et al., 2022).

Tipicamente, os principais componentes dos óleos essenciais são os responsáveis pelas suas propriedades biológicas. No entanto, compostos presentes em menores quantidades também podem desempenhar um papel importante na atividade biológica, seja potencializando a ação dos principais componentes ou por meio de efeitos antagonistas ou aditivos (Bassolé; Juliani, 2012). De modo geral, os principais constituintes dos OE's estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Alguns dos principais componentes dos óleos essenciais.

## Terpenos

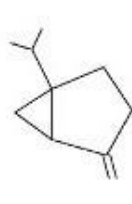
### Monoterpenos



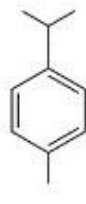
$\alpha$ -Pineno



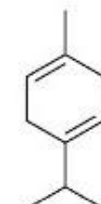
Limoneno



Sabineno

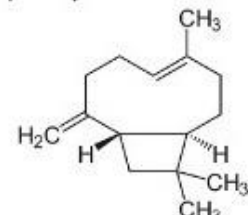


P-cimeno



$\gamma$ -Terpineno

### Sesquiterpenos



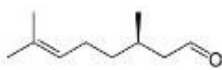
$\beta$ -Cariofileno

## Terpenóides

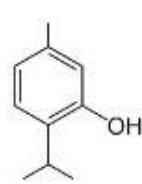
### Monoterpenóides



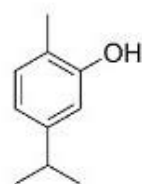
Linalol



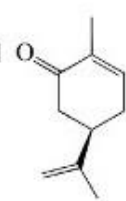
Citronelal



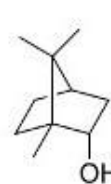
Timol



Carvacrol

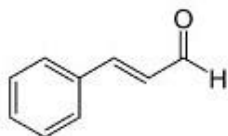


Carvona

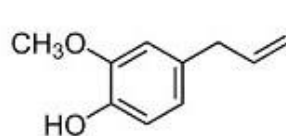


Borneol

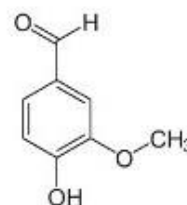
## Fenilpropanóides



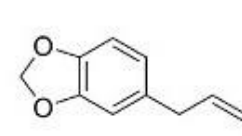
Cinamaldeído



Eugenol



Vanilina



Safrol

Fonte: adaptado de Hyltdgaard, Mygind e Meyer (2012).

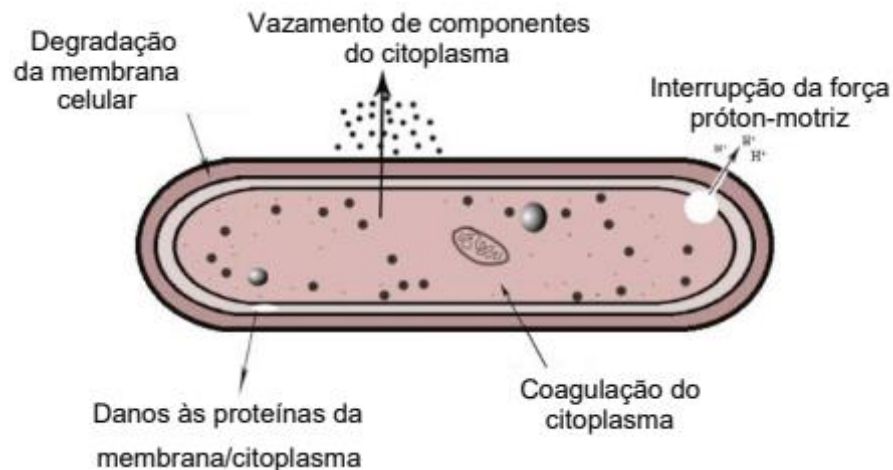
Terpenos são hidrocarbonetos produzidos a partir da combinação de várias unidades de isopreno ( $C_5H_8$ ) e, de modo geral, estão presentes nos OE's na forma de monoterpenos ( $C_{10}H_{16}$ ) ou sesquiterpenos ( $C_{15}H_{24}$ ) (Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012; Angane et al., 2022). Os terpenos não representam um grupo de constituintes com alta atividade antimicrobiana inerente. Por exemplo, o *p*-cimeno, um dos principais constituintes do OE de tomilho, não é o principal composto que confere a atividade antimicrobiana. No entanto, o *p*-cimeno melhora a atividade de outros agentes antimicrobianos (Marchese et al., 2017).

Os terpenóides são terpenos modificados por enzimas que adicionam oxigênio e movem ou removem grupos metil. A sua atividade antimicrobiana está relacionada aos seus grupos funcionais e a presença de elétrons deslocalizados. Os terpenóides são compostos antimicrobianos contra um amplo espectro de microorganismos, sendo o carvacrol e o timol os mais ativos (Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012).

Já os fenilpropanóides são sintetizados a partir do precursor aminoácido fenilalanina em plantas e também possuem atividade antibacteriana comprovada (Hyldgaard; Mygind; Meyer, 2012). Segundo Marchese et al. (2017), o composto eugenol, um fenilpropanóide, apresenta atividades antibacterianas poderosas contra *Helicobacter pylori*, uma bactéria resistente a antibióticos. Com o aumento das pesquisas e publicações na literatura, os OE's estão sendo amplamente utilizados em diversos países como medicamentos, perfumes, cosméticos e como conservantes de alimentos (Bassolé; Juliani, 2012), principalmente devido às suas propriedades antibacterianas (Bai et al., 2023; Sun et al., 2020; Amassmoud et al., 2022), inseticidas (Fouad et al., 2023; Yang; Isman; Tak, 2020), antivirais (Silva et al., 2020a; Castro et al., 2021; Baker et al., 2021) e antifúngicas (Martins; Bicas, 2024; Rashed et al., 2021).

As propriedades mencionadas anteriormente têm sido explicadas pela deterioração da integridade estrutural e funcional de membranas dos microorganismos. De fato, devido ao seu caráter lipofílico, os monoterpenos cíclicos preferencialmente se distribuiriam da fase aquosa para o ambiente da membrana lipídica (Iacovelli et al., 2023). Dessa forma, ocasionando a degradação da membrana celular dos microorganismos, vazamento dos constituintes da célula, danos às proteínas da membrana celular, interrupção da força próton-motriz e coagulação do citoplasma, conforme a Figura 7 (Calo et al., 2015; Varghese; Siengchin; Parameswaranpillai, 2020).

Figura 7 – Mecanismo de ação dos óleos essenciais.



Fonte: adaptado de Varghese, Siengchin e Parameswaranpillai (2020).

As propriedades antimicrobianas de vários óleos essenciais têm sido amplamente estudadas como aditivos em filmes biodegradáveis, porém seus efeitos nas propriedades químicas, físicas e térmicas dos filmes ainda são pouco discutidos na literatura. A natureza oleosa e volátil dos OE's podem afetar a integridade dos filmes poliméricos, alterando suas propriedades (Evangelho et al., 2019). Isso dependerá da composição química do aditivo e de como ele interage com o filme (Luna et al., 2024).

Portanto, são necessários estudos para examinar o potencial de cada óleo essencial como agente antibacteriano, assim como sua interação com o material utilizado para produzir os filmes de amido ativo. Os OE's de Melaleuca (*Melaleuca alternifolia*) e Capim-Limão (*Cymbopogon flexuosus*) são pouco estudados para a presente aplicação e não há relatos na literatura de incorporação destes óleos em filmes de amido de milho.

### 2.3.1 Óleo essencial de Melaleuca (*Melaleuca alternifolia*)

A *Melaleuca alternifolia* é um arbusto do gênero *Melaleuca*, pertencente à família Myrtaceae e possui cerca de 230 espécies. Quando cresce naturalmente, a *Melaleuca alternifolia* pode atingir uma altura de aproximadamente 5 a 8 m. As árvores com mais de 3 anos costumam florescer nos períodos de outubro a novembro, produzindo flores em cachos soltos de cor creme, conforme a Figura 8 (Carson; Hammer; Riley, 2006).

Figura 8 – *Melaleuca alternifolia*.



Fonte: Safari (2024).

Popularmente conhecida como “árvore de chá”, a *Melaleuca alternifolia* é uma planta nativa da Austrália que não ocorre naturalmente em nenhum outro lugar do mundo (Carson; Hammer; Riley, 2006; Yue et al., 2020). Foi originalmente explorada pelos povos aborígenes do norte de Nova Gales do Sul, estado australiano, com o intuito de ser utilizada como um antisséptico para tratar tosse, resfriado ou doenças de pele (Iacovelli et al., 2023). No entanto, o uso do próprio óleo, ao invés do material vegetal não extraído, só se tornou uma prática comum quando os primeiros relatos de sua atividade antimicrobiana foram relatados por Penfold nas décadas de 1920 e 1930 (Carson; Hammer; Riley, 2006).

Portanto, o principal produto da *Melaleuca alternifolia* é o óleo essencial (OEM), trivialmente conhecido como *Tea Tree* (Iacovelli et al., 2023). O OEM é um óleo amarelo claro com um odor agradável produzido por destilação a vapor das folhas e ramos terminais da planta. De modo geral, o OEM consiste em uma mistura complexa, com mais de 100 componentes, entre terpenos e seus álcoois associados (Silveira et al., 2019).

A ISO 4730:2017 não especifica qual espécie de *Melaleuca* deve ser utilizada para produzir o óleo. Ao invés disso, ela estabelece a concentração mínima e máxima dos principais componentes do OEM, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Perfil cromatográfico do óleo essencial de melaleuca.

Componentes	Mínimo, %	Máximo, %
$\alpha$ -pineno	1,0	4,0
Sabineno	< 0,01	3,5
$\alpha$ -terpineno	6,0	12,0
Limoneno	0,5	1,5
<i>p</i> -cimeno	0,5	8,0
1,8-cineol	< 0,01	10,0
$\gamma$ -terpineno	14,0	28,0
Terpinoleno	1,5	5,0
Terpinen-4-ol	35,0	48,0
$\alpha$ -terpineol	2,0	5,0
Aromadendreno	0,2	3,0
Ledene	0,1	3,0
$\delta$ -cadineno	0,2	3,0
Globulol	< 0,01	1,0
Viridiflorol	< 0,01	1,0

Fonte: adaptado de ISO 4730:2017 (2017).

Os principais constituintes do OEM da marca dōTERRA (Barueri – SP), analisados através de cromatografia gasosa – espectrometria de massa (GC-MS), estão apresentados na Tabela 4. Pode-se observar que todos os componentes do OEM estão de acordo com os parâmetros da ISO 4730:2017.

O OEM possui eficiência antimicrobiana comprovada entre uma ampla variedade de microrganismos. Essa eficácia é corroborada por estudos recentes, como os de Brun et al. (2019) e Haines et al. (2022), que relataram a atividade do OEM contra as bactérias *Candida glabrata* e *Pseudomonas aeruginosa*, respectivamente. Além disso, Nguyen et al. (2023) demonstraram que o OEM foi eficaz na eliminação das células de *Escherichia coli* e *Staphylococcus epidermidis*.

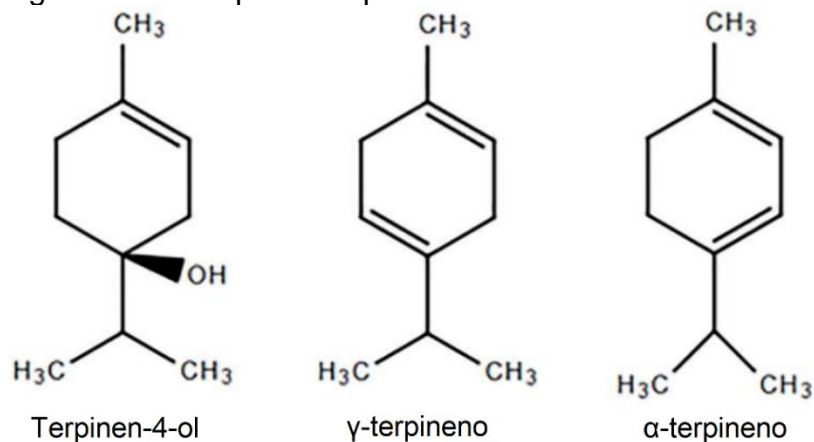
Tabela 4 – Composição química do óleo essencial de melaleuca determinada através de GC-MS.

Componente	Concentração, %
Terpinen-4-ol	36,13
$\gamma$ -terpineno	23,44
$\alpha$ -terpineno	11,17
Terpinoleno	3,78
1,8-cineol	3,74
Outros	21,74

Fonte: dōTERRA (2024).

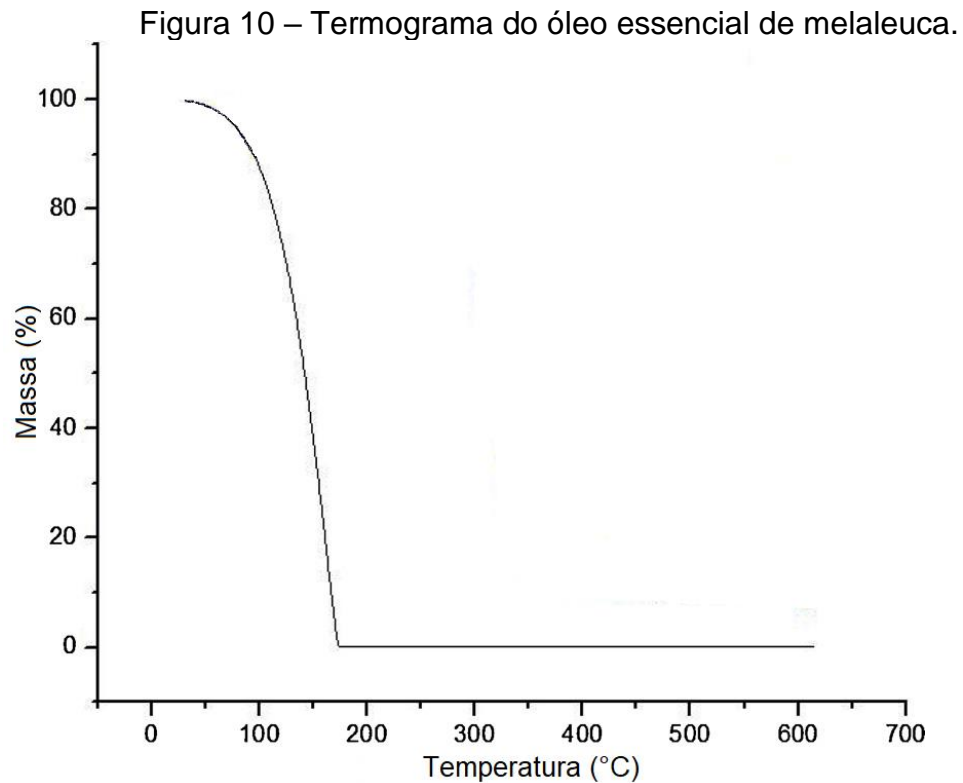
O mecanismo antibacteriano se deve principalmente ao composto terpinen-4-ol (Silveira et al., 2019), representado na Figura 4, que é um monoterpene que possui aroma apimentado e argiloso, com um toque amadeirado (Neto et al., 2022). No entanto, supõe-se que o mecanismo antimicrobiano do OEM resulte de interações complexas entre seus diferentes componentes (Silveira et al., 2019). Segundo os autores Nguyen et al. (2023), o terpinen-4-ol é o principal componente que exerce os efeitos antibacterianos do OEM, erradicando completamente as células persistentes das bactérias *E. coli* e *S. epidermidis* após apenas 1 h de tratamento. No entanto,  $\alpha$ -terpineno (Figura 9) também pode contribuir com a ação antibacteriana em pequeno grau.

Figura 9 – Principais componentes do óleo essencial de melaleuca.



Fonte: adaptado de Rahman et al. (2018).

Na Figura 10 é apresentada a análise termogravimétrica do OEM. É possível observar que a degradação ocorre, aproximadamente, entre 100 a 170 °C (Yue et al., 2020).



Fonte: adaptado de Yue et al. (2020).

### 2.3.2 Óleo essencial de Capim-Limão (*Cymbopogon flexuosus*)

*Cymbopogon flexuosus*, conhecida como capim-limão, é uma grama perene pertencente ao gênero *Cymbopogon* da família Poaceae (Figura 11), conhecida por seu óleo essencial (OECL). Este gênero contém entre 102 e 104 espécies (Bhatnagar, 2020) e é amplamente cultivado em vários países, incluindo China, Indonésia, México, Madagascar, Brasil, Haiti e República Dominicana (Haque; Remadevi; Naeve, 2018), sendo a Índia o maior produtor do mundo (Mukarram et al., 2022).

A Índia possui cerca de 4000 hectares de terras cultivadas com capim-limão, produzindo cerca de 250 toneladas de óleo essencial (Gupta; Dhawan; Lal, 2015). Durante a pandemia de Covid-19, a demanda por desinfetantes aumentou significativamente, aumentando também a demanda por óleo essencial de capim-limão em todo o mundo (Kumar et al., 2022a).

Figura 11 – *Cymbopogon flexuosus*.



Fonte: Annie's Heirloom Seeds (2024)

A cultura de capim-limão está ganhando popularidade devido à sua simplicidade de cultivo (Kumar et al., 2022b). No entanto, embora *C. flexuosus* possa persistir em uma ampla variedade de condições climáticas e tipos de solo, o crescimento ótimo é alcançado em solos arenosos bem drenados, caracterizados por luz solar adequada e alta fertilidade do solo (Mwithiga et al., 2024).

O óleo essencial de capim-limão se acumula principalmente nas folhas através de células específicas localizadas em tecidos parenquimatosos (Mwithiga et al., 2022) e equivale entre 1–2% do peso seco total da planta (Ranade; Thiagarajan, 2015). O óleo geralmente é extraído por meio da extração por solvente, destilação a vapor ou hidrodestilação. A escolha do processo de extração adequado depende, de modo geral, da localização histológica dos óleos na planta e de seus usos (Balti et al., 2018).

Em particular, o OECL contém citral (Balti et al., 2018), um aldeído monoterpene acíclico com aroma de limão, composto por uma combinação racêmica de dois isômeros, neral ( $\beta$ -Citral) e geranial ( $\alpha$ -Citral) (Kumar et al., 2022a). O citral é um componente vital que possui propriedades significativas anti-inflamatórias (Han; Parker, 2017), antimicrobianas (Adukwu et al., 2016; Silva et al., 2020b; Farias et al., 2019), antifúngicas (Lee et al., 2020; Wan et al., 2019) e repelentes de mosquitos (Bhatt; Kale, 2019). De modo geral, a presença de neral e geranial no OECL é utilizada como medida da qualidade dos óleos essenciais (Balti et al., 2018).

A ISO 4718:2004 não especifica qual espécie de capim-limão deve ser utilizada para produzir o óleo. No entanto, na Tabela 5, estão apresentados os principais componentes presentes no OECL e suas concentrações mínimas e máximas.

Tabela 5 – Perfil cromatográfico do óleo essencial de capim-limão.

Componentes	Mínimo, %	Máximo, %
Limoneno	0,5	3,5
6-Metil-5-hepteno-2-ona	0,1	2,0
Cariofileno	0,2	3,5
Neral	25,0	35,0
Geranial	35,0	47,0
Acetato de geranila	0,5	6,0
Geraniol	1,5	8,0

Fonte: adaptado de ISO 4718:2004 (2004).

Os principais constituintes do OECL da marca dōTERRA (Barueri – SP), analisados através de cromatografia gasosa – espectrometria de massa (GC-MS), estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do óleo essencial de capim-limão determinada através de GC-MS.

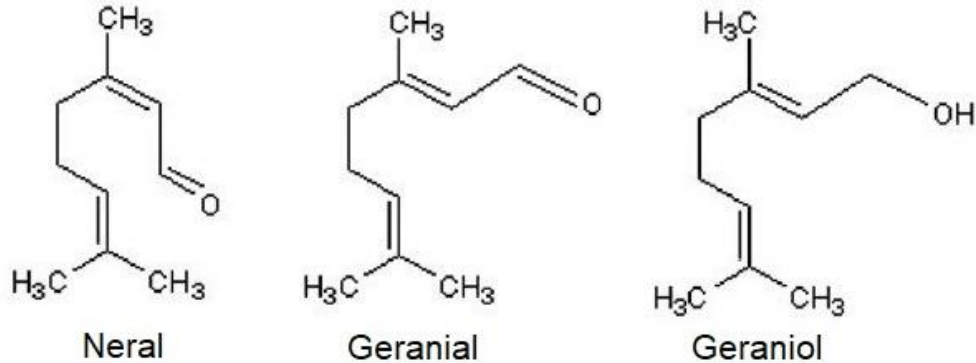
Componente	Concentração, %
Geranial	40,37
Neral	29,72
Geraniol	7,52
Acetato de geranila	5,26
4-Nonanona	1,76
6-Metil-5-hepteno-2-ona	1,73
Outros	13,64

Fonte: dōTERRA (2024).

Pode-se observar que todos os componentes do OECL estão de acordo com os parâmetros da ISO 4718:2004. Além disso, os componentes do OECL apresentam diferentes níveis de potencial antimicrobiano, onde fenóis e aldeídos apresentam as atividades mais altas, enquanto ésteres e hidrocarbonetos apresentam as mais baixas

(Mukarram et al., 2022). No entanto, a atividade antimicrobiana do OECL é amplamente atribuída ao citral (aldeído) presente em seu óleo (Adukwu et al., 2016; Alagawany et al., 2021; Sharma et al., 2019). A estrutura dos principais componentes do óleo essencial de capim-limão está apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Principais componentes do óleo essencial de capim-limão.



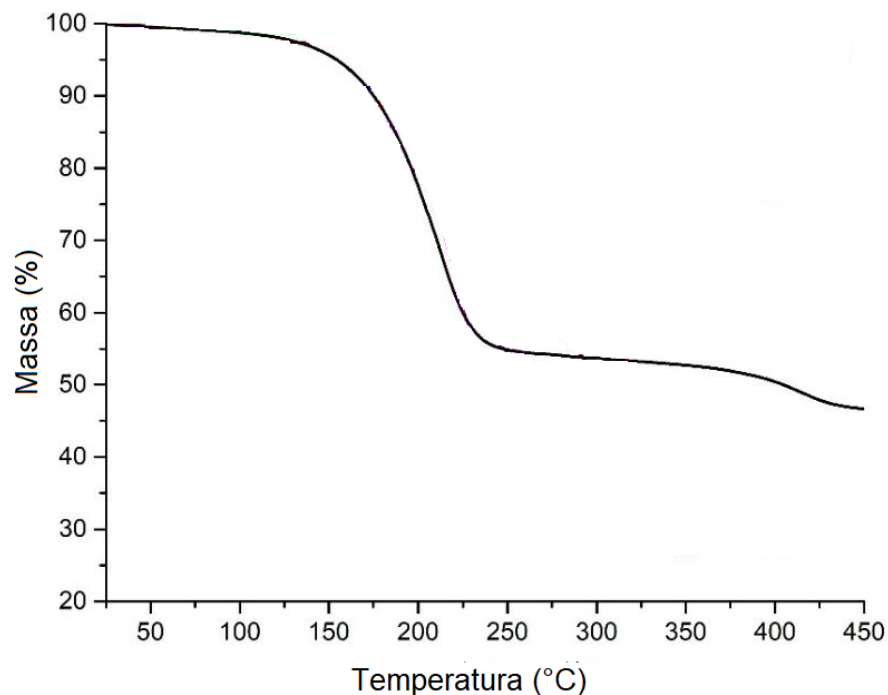
Fonte: adaptado de Shah et al. (2011).

De acordo com Al-Ghanayem (2022), o mecanismo de ação dos componentes do OECL funciona desestabilizando as ligações entre a bicamada lipídica e inibindo as bactérias através da desintegração da membrana. O óleo essencial de capim-limão também pode causar mudanças estruturais em diferentes bactérias. Foi relatado que causou completa desfiguração e distorção nas cepas de *Pseudomonas* spp. (Aiemsraad et al., 2011).

Mangalagiri, Panditi e Jeevigunta (2021) comprovaram a eficiência antibacteriana do OECL diante de 10 tipos de bactérias, sendo o óleo essencial que apresentou os melhores resultados comparado com os OE's de eucalipto, gerânio, menta, citronela, cravo-selvagem e palma rosa. Segundo os autores, a atividade antibacteriana provém do citral (81,84%).

Na Figura 13 é apresentada a análise termogravimétrica do óleo essencial de capim-limão. É possível observar que a decomposição térmica inicia, de forma sutil aos 107 °C e, de forma mais abrupta, de 170 a 240 °C. Após isso, um segundo evento de perda de massa é registrado aos 359 °C (Silva et al., 2023).

Figura 13 – Termograma do óleo essencial de capim-limão.



Fonte: adaptado de Silva et al., 2023.

### 2.3.3 Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida Mínima (CBM)

Dois parâmetros importantes para a escolha das concentrações de OE foram as análises de Concentração Inibitória Mínima (CIM) e Concentração Bactericida Mínima (CBM). Em suma, a CIM é a menor concentração que inibe o desenvolvimento bacteriano, mas não o elimina por completo. Por outro lado, a CBM refere-se à menor concentração de um agente antimicrobiano que é capaz de matar completamente uma determinada bactéria (Silva et al., 2021).

Com base nestes parâmetros, as concentrações escolhidas de óleo essencial foram o valor da CIM, um valor intermediário entre a CIM e a CBM e o valor da CBM. A seguir, na Tabela 7, encontram-se os valores indicados pela literatura da CIM e CBM do OEM e do OECL para as bactérias *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Salmonella enterica*.

Tabela 7 – Valores de CIM e CBM do OEM e OECL para diferentes bactérias.

Estudo	Óleo essencial	Bactéria	CIM	CBM
Manzanelli et al. (2023)	OEM	<i>S. aureus</i>	3,50 mg/mL	7,00 mg/mL
Kwiecinski, Eick e Wójcik (2009)	OEM	<i>S. aureus</i>	0,50% (v/v)	0,50% (v/v)
Mazzarrino et al. (2015)	OEM	<i>S. enterica</i>	0,01 mg/mL	0,02 mg/mL
Silva (2019)	OEM	<i>S. aureus</i> (Cepa b)	3,20 mg/mL	-
		<i>S. aureus</i> (Cepa c)	Sem inibição	-
		<i>E. coli</i> (Cepa a)	1,60 mg/mL	-
		<i>E. coli</i> (Cepa b)	3,20 mg/mL	-
		<i>E. coli</i> (Cepa c)	Sem inibição	-
	OECL	<i>S. aureus</i> (Cepa a)	0,40 mg/mL	-
		<i>S. aureus</i> (Cepa b)	0,10 mg/mL	-
		<i>S. aureus</i> (Cepa c)	0,80 mg/mL	-
		<i>E. coli</i> (Cepa a)	0,40 mg/mL	-
		<i>E. coli</i> (Cepa b)	0,40 mg/mL	-
Silveira et al. (2012)	OECL	<i>S. aureus</i>	0,31 mg/mL	0,31 mg/mL
		<i>E. coli</i>	0,62 mg/mL	0,62 mg/mL
Adukwu et al. (2016)	OECL	<i>S. aureus</i>	0,06% (v/v)	0,13% (v/v)
Gao et al. (2020)	OECL	<i>S. aureus</i>	0,08% (v/v)	-
Silval et al. (2018)	OECL	<i>E. coli</i>	1,19 mg/mL	-
		<i>S. enterica</i>	3,08 mg/mL	-
		<i>S. aureus</i>	0,43 mg/mL	-

Fonte: Autora (2024).

Apesar das variações nos dados da literatura, causadas pelas diferentes composições de cada óleo e pelas cepas bacterianas, as referências indicam que o

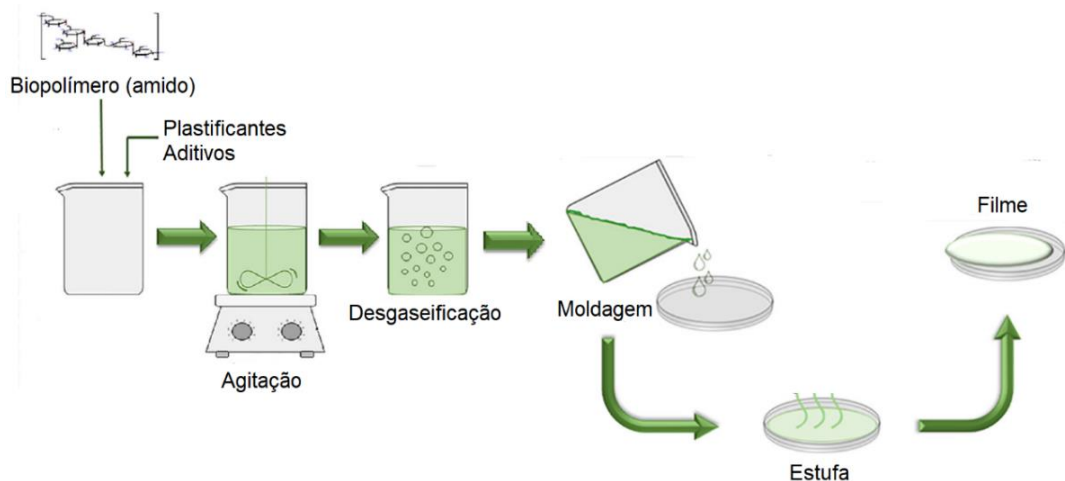
OECL necessita de uma menor concentração para inibir e matar completamente as bactérias *E.coli* (gram-negativa) e *S. aureus* (gram-positiva), comparando-se com o OEM que necessitou de uma menor CIM para a bactéria *S. enterica* (gram-negativa).

De acordo com Patterson, McElmeel e Wiederhold (2019) e Liu et al. (2020), a maioria dos óleos essenciais possuem maior eficácia antibacteriana contra bactérias gram-positivas. De modo geral, as bactérias gram-positivas possuem uma parede celular espessa composta por várias camadas de peptidoglicano (Silva et al., 2021). No entanto, as bactérias gram-negativas possuem, além da camada de peptidoglicano, uma membrana externa composta por lipopolissacarídeos (Silva et al., 2021). Portanto, as bactérias gram-negativas tendem a ser mais resistentes aos óleos essenciais, pois possuem uma membrana externa hidrofílica, impedindo a entrada de compostos hidrofóbicos dos OE's (Valeriano et al., 2012).

## 2.4 TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE FILMES DE AMIDO

De acordo com Padilha (2019), os filmes de amido são formados devido à capacidade de gelatinização do amido quando em contato com a água, o que ocorre em temperaturas relativamente baixas em comparação com outros polímeros. Na maioria dos casos, os filmes são obtidos por técnicas como *casting* (Ardjoum et al., 2023; Perdana et al., 2021; Syafiq; Sapuan; Zuhri, 2021; Zhou et al., 2021) e termoformagem (Tian et al., 2024; Cruz-Tirado et al., 2020; Debiagi et al., 2014; Ketkaew et al., 2018), resultando em materiais de baixa flexibilidade, natureza hidrofílica e alta permeabilidade ao vapor de água, sendo as propriedades mecânicas geralmente inferiores às dos polímeros sintéticos (Brandelero; Almeida; Alfaro, 2015).

Segundo Moraes et al. (2013), a fabricação de filmes de amido usando o método *casting* envolve o despejo de uma suspensão em placas, controlando a espessura do filme pela quantidade de suspensão vertida. Nesse processo, o amido é gelatinizado através da adição de água, aquecido e agitado para garantir a hidratação de suas moléculas (Lumdubwong, 2019). Isso assegura uma mistura adequada dos componentes da formulação, onde a absorção e o tempo de mistura são parâmetros cruciais para uma dispersão uniforme dos compostos na matriz polimérica (Madhumitha et al., 2018). A Figura 14 exemplifica o passo a passo da técnica de *casting*.

Figura 14 – Técnica de *casting*.

Fonte: adaptado de Vianna et al. (2021).

As principais limitações que tornam a técnica de *casting* inviável em termos industriais estão relacionadas à sua dificuldade em ser dimensionada para produções maiores e à exigência de longos períodos de secagem (Moraes et al., 2013). Uma variação desse método, conhecida como *tape casting*, permite que a suspensão formadora de filme seja espalhada em grandes suportes e em esteiras transportadoras contínuas, possibilitando o controle da espessura dos filmes com lâmina ajustável, uma técnica já empregada industrialmente (Moraes et al., 2013; Vianna et al., 2021).

Embora a maioria dos estudos sobre filmes à base de amido tenha sido realizada utilizando o método *casting*, a termoformagem tem surgido como uma alternativa para aumentar a escala e alcançar resultados em nível industrial (Vianna et al., 2021; Huntrakul et al., 2020). Esse processo envolve altas temperaturas, pressão e força de cisalhamento, o que resulta na quebra das ligações do amido, levando à sua gelatinização (Lumdubwong, 2019).

Berti et al. (2024) compararam as técnicas de *casting* e termoformagem para a obtenção de filmes de amido. Segundo os autores, o método de processamento afetou significativamente as propriedades do filme, sendo o método *casting* o mais indicado por não ocasionar perda na funcionalidade dos filmes.

Ademais, Moraes et al. (2013) corroboram afirmando que os filmes de amido preparados por processos de termoformagem não apresentam boas propriedades, devido às altas taxas de cisalhamento aplicadas. Além disso, de acordo com os

autores, a técnica *casting* é ideal para a preparação de filmes de pequenas dimensões.

#### 2.4.1 Incorporação do óleo essencial em filmes de amido

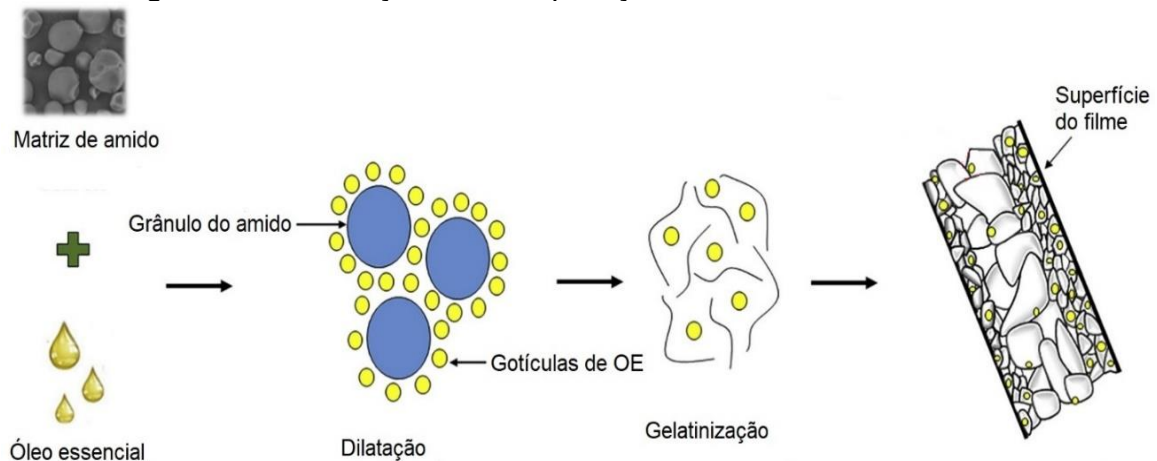
Chenchen et al. (2020) e Ardjoum et al. (2023) incorporaram OE de tomilho em filmes de amido de milho para melhorar sua resistência à tração e resistência à água. Martins et al. (2021) constataram que a incorporação de OE de orégano aumentou a resistência à tração e elasticidade de filmes de amido de arroz, além de reduzir a solubilidade e permeabilidade.

Mendes et al. (2020) e Perdana et al. (2021) também obtiveram resultados semelhantes ao adicionar OE de capim-limão em filmes de amido de mandioca. Pirouzifard et al. (2019) adicionaram OE de *Salvia officinalis* em filme de amido de batata para reduzir a solubilidade e conteúdo de água do filme, melhorando assim o desempenho de resistência à água.

Al-Hashimi et al. (2020) adicionaram OE de cravo ao filme de amido de milheto para melhorar a hidrofobicidade do filme. Syafiq, Sapuan e Zuhri (2021) prepararam o filme composto adicionando OE de canela ao amido de palmeira açucareira e descobriram que a adição de OE de canela poderia melhorar a resistência à água e as propriedades mecânicas dos filmes compostos. Resultados semelhantes foram encontrados por Zhou et al. (2021) e Tian et al. (2024) que adicionaram OE de canela em filmes de amido de mandioca e amido de milho, respectivamente.

De modo geral, a adição do OE pode se dar de duas maneiras: aplicação direta na superfície do filme (Debiagi et al., 2014) ou adição na formulação, antes do processamento (Cruz-Tirado et al., 2020; Debiagi et al., 2014; Al-Hashimi et al., 2020; Ardjoum et al., 2023; Chenchen et al., 2020; Martins et al., 2021; Perdana et al., 2021; Syafiq; Sapuan; Zuhri, 2021; Tian et al., 2024; Zhou et al., 2021). A seguir, a Figura 15 apresenta uma ilustração da incorporação do OE na matriz polimérica do amido, diretamente na formulação do filme.

Figura 15 – Ilustração da incorporação de OE no filme de amido.



Fonte: adaptado de Cruz-Tirado et al. (2020).

Em um estudo realizado por Debiagi et al. (2014), foi realizada uma comparação entre os dois métodos. Os resultados mostraram que a adição direta de OE na superfície levou a uma perda da sua atividade antimicrobiana, provavelmente devido às condições de processamento.

Por outro lado, foi observado que os filmes produzidos a partir do segundo método apresentaram zonas de inibição durante a análise microbiológica. Corroborando com isso, Cruz-Tirado et al. (2020) verificaram ação antibacteriana no filme através da adição do OE direta na formulação e associaram a inibição das bactérias à retenção de gotas de OE nas primeiras camadas do filme, através da formação de ligações de hidrogênio entre amido, óleo essencial e glicerol.

De acordo com Peng, Yin e Li (2013), a incorporação pode ser realizada com o auxílio de um surfactante, a fim de se obter uma melhor incorporação do OE na solução do filme, através do aumento da solubilidade do composto orgânico na fase aquosa.

#### 2.4.1.1 Incorporação do OE sem surfactante

Um estudo de Song, Zuo e Chen (2018) sobre a incorporação de óleo essencial de limão em filmes de amido de trigo e milho mostrou que, sem surfactantes, os óleos essenciais tendem a formar gotas grandes, o que impacta negativamente a resistência mecânica, a transparência dos filmes e a distribuição do OE na matriz do amido. No entanto, diversos estudos que vêm sendo relatados na literatura prezam pela

simplicidade do processo e à manutenção da naturalidade dos filmes, dessa forma, evitando aditivos sintéticos na formulação.

Os autores Al-Hashimi et al. (2020) dissolveram 5 g de amido de milho em 150 mL de água destilada em um agitador aquecido contínuo a 75 °C até a solução gelatinizar. Após esta etapa, adicionou-se no agitador 2 mL de glicerol como plastificante, aquecendo até 60 °C por 30 min. Em seguida, deixou-se a mistura resfriar até 30 °C e, logo após, OE de cravo foi adicionado lentamente à solução com agitação contínua. A solução obtida foi despejada em placas de vidro e, em seguida, cobertas com papel alumínio. Estas placas foram deixadas até a solução ficar firme durante 5 h de secagem a 75 °C.

De forma semelhante, Martins et al. (2021) formularam os filmes com 3% de amido de arroz (m/v), 30% de glicerol e diferentes concentrações de OE de orégano. O amido foi dissolvido em água destilada e a solução foi aquecida a 80 °C sob agitação mecânica. O glicerol foi adicionado e a solução foi agitada por 20 min. A solução filmogênica foi resfriada a 35 °C e o OE foi adicionado e agitado por 20 min. A mistura foi colocada em placas de Petri e seca em forno a 40 °C por 8 h. Após a secagem, os filmes foram mantidos por 24 h em dessecadores a 25 °C com umidade relativa de 52%.

Arezoo et al. (2020) descrevem um filme baseado em amido de sagu por incorporação de OE de canela e nano dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>). Diferentes concentrações de TiO<sub>2</sub> foram usadas para preparar dispersões aquosas de amido de sagu. Uma mistura de glicerol e sorbitol (1:3) em 40% (em peso) do total de amido de sagu foi adicionada à dispersão. Os nanocompósitos de amido de sagu foram aquecidos a 90 ± 2 °C e mantidos por 45 min para realizar a gelatinização do amido e uma dispersão homogeneizada. Em seguida, a dispersão foi resfriada para cerca de 45 °C e foram adicionadas diferentes concentrações de OE de canela e misturadas por 60 min à mesma temperatura para obter dispersões homogeneizadas. Porções das dispersões homogeneizadas foram depositadas em placas. Todos os filmes foram secos nas mesmas condições controladas de 40 ± 2 °C e 50 ± 5% de umidade relativa.

#### 2.4.1.2 Incorporação do OE com surfactante

Apesar de melhorar a solubilidade do OE na matriz do amido, a adição de surfactantes pode aumentar a permeabilidade e solubilidade dos filmes,

comprometendo sua resistência e durabilidade, o que limita seu uso em embalagens que necessitam de proteção contra umidade (Cao; Song, 2019). Além disso, em altas concentrações, o surfactante pode aumentar a rugosidade dos filmes, afetando suas propriedades ópticas e sensoriais (Yang et al., 2024a). No entanto, surfactantes como o Tween 80 e Span 80 são amplamente relatados na literatura, sendo utilizados para promover a dispersão uniforme dos óleos essenciais, a fim de melhorar a formação de filmes homogêneos.

De acordo com Wang et al. (2021), filmes à base de amido de milho foram preparados, utilizando-se 6 g de amido de milho dissolvidos em 100 mL de água destilada, e em seguida o amido de milho foi completamente gelatinizado por 30 min a 90 °C utilizando um agitador magnético (800 rpm). Em seguida, 25% de glicerol (v/v), diferentes concentrações de OE de *Zanthoxylum bungeanum*, e 1% de Tween 80 (v/v) foram adicionados e misturados com a solução gelatinizada a 90 °C. A solução foi constantemente dispersada com um homogeneizador a uma velocidade de 20.000 rpm por 10 min, e em seguida a solução de filme foi vertida em um molde e seca em um forno a 30 °C por 48 h. Após a secagem, o filme final foi removido do molde e então armazenado a 25 °C e 60% de umidade relativa por 48 h.

Mendes et al. (2020) utilizaram uma metodologia semelhante à de Wang et al. (2021). Porém, previamente, os autores prepararam uma solução aquosa de pectina de éster metílico e 2% de glicerol, homogeneizando essa solução em agitador mecânico (15.500 rpm) por 4 min. Posteriormente, 0,1% de Tween 80 e diferentes concentrações de OE de capim-limão foram adicionadas à solução, criando uma emulsão. A emulsão foi adicionada, em uma proporção de peso 1:1, a uma mistura de amido de mandioca, 8% de água ultrapura e 20% de glicerol, previamente gelatinizada e resfriada até 40 °C. Após a adição da emulsão, a solução foi agitada a 15.500 rpm por 15 min. Os filmes formados foram depositados em placas de poliestireno e secos a 90 °C em estufa até completa secagem.

O surfactante Span 80 é utilizado de forma semelhante ao Tween 80, como relatam os autores Song, Zuo e Chen (2018). Soluções filmogênicas de amido de milho/trigo (6%, m/v) foram preparadas dissolvendo-se 36 g de amido de trigo e 24 g de amido de milho em 1000 mL de água destilada, aquecendo a 100 °C por 15 min com agitação a 700 rpm para completa solubilização e gelatinização. Após essa etapa, foram adicionados 6 g de sorbitol, 25 g de ácido cítrico, 14 g de carboximetilcelulose sódica e 14 g de alginato de sódio, e a mistura foi agitada por 1 h. Em seguida, óleo

essencial de limão (0,5%, 1% e 2%, v/v) foi adicionado à solução polimérica, previamente dissolvido em Span 80 a 0,1% (v/v). As soluções foram homogenizadas a 10.000 rpm por 4 min.

Como alternativa ao uso do Tween 80 e Span 80, Pinhelli et al. (2019) utilizou etanol como surfactante para a incorporação do OE de capim-limão em filmes de amido de banana. Para que ocorresse a homogeneização entre o óleo e a solução do filme, o etanol foi utilizado em uma proporção de 2:1 (etanol:água). Essa solução foi agitada por aproximadamente 10 min e, posteriormente, adicionada à solução do filme em temperatura ambiente.

#### 2.4.2 Possíveis aplicações

Os filmes de amido incorporados com óleo essencial são uma inovação promissora no campo dos materiais biodegradáveis. Eles oferecem uma alternativa sustentável para diversas aplicações, em especial no âmbito das embalagens para alimentos. Ao combinar as propriedades biodegradáveis do amido com as propriedades antimicrobianas e hidrofílicas do óleo essencial, esses filmes têm o potencial de atender às exigências atuais por materiais mais ecológicos e funcionais (Li et al., 2018; Vianna et al., 2021).

A contaminação microbiana durante o processamento, transporte e armazenamento pode causar a deterioração dos alimentos, resultando em perdas econômicas significativas e riscos potenciais para a saúde humana (Vetchapitak et al., 2021). Para prolongar a vida útil dos alimentos e manter sua qualidade, várias pesquisas já estão sendo publicadas na literatura.

Souza et al. (2023) objetivaram a produção de um revestimento biodegradável, adicionado com óleo essencial de manjeriço ao filme de amido, no intuito de prolongar a vida útil do requeijão em temperatura ambiente, reduzindo a multiplicação microbiana e a deterioração do produto.

Fan et al. (2024) produziram um filme à base de amido de milho incorporado com OE de cravo para investigar a vida útil de pães, durante 15 dias. Notou-se que o filme manteve a integridade e não demonstrou sinais de fragilidade durante o armazenamento, além de demonstrar atividade antibacteriana, aumentando em 9 dias a vida útil do pão em comparação com a amostra controle.

O estudo realizado por Adame et al. (2024) desenvolveu uma embalagem biodegradável ativa para produtos de carne, utilizando óleo essencial de *Litsea cubeba* e amido de mandioca. O filme demonstrou propriedades significativas de barreira, reduzindo a permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio e aumentando sua atividade antioxidante. Ademais, demonstrou atividade antibacteriana significativa contra patógenos transmitidos por alimentos como *S. aureus* e *E. coli*, preservando efetivamente a qualidade da carne a 4 °C, evitando a deterioração e prolongando o período de armazenamento, conforme evidenciado pelo crescimento bacteriano, pH, cor e textura.

Assim como Adame et al. (2024), Caetano et al. (2018) mostraram que as atividades antioxidante e antibacteriana dos filmes de fécula de mandioca com OE de orégano apresentaram proteção contra a oxidação da carne moída até o terceiro dia de armazenamento. O uso de filmes de fécula de mandioca misturados com OE de capim-limão também resultou em menor contagem microbiana da carne durante todo o armazenamento.

Enidiok et al. (2024) visaram desenvolver um filme de amido de gengibre funcionalizado com óleo de chia para aplicação como revestimento em tomates. Os dados gerados a partir deste estudo revelam efeitos significativos em suas propriedades físico-químicas, mecânicas, térmicas e conservantes. O revestimento foi aplicado em tomates por 21 dias, atrasando o amadurecimento dos mesmos, em comparação com os tomates sem a proteção.

Outros estudos como Aquino, Blank e Santana (2015) estudaram os impactos de revestimentos do amido de mandioca com OE de *Lippia gracilis* na preservação de goiabas após 10 dias de armazenamento a 25 °C. Neste estudo, os filmes mostraram ser eficientes na inibição do desenvolvimento da maioria das bactérias. Autores como Filipe et al. (2022) estudaram as características físico-químicas e qualitativas da manga utilizando filmes de amido contendo microcápsulas de OE de tomilho. Filmes de amido com OE aplicados em mangas levaram a uma vida útil de 10 dias em temperatura ambiente, indicando o potencial do filme para preservação de manga.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento dos filmes foi utilizado o amido de milho da marca Adicel (Belo Horizonte – MG). De acordo com o boletim técnico, possui umidade máxima de 14%, pH entre 4,5 – 5,5 e não apresenta sujidades. Como agentes plastificantes, foram utilizados glicerol P.A. da marca Êxodo Científica (Diadema - SP), sorbitol da marca FilloVita Store (Penha da França – SP) e água deionizada.

Para a incorporação nos filmes de amido de milho foi utilizado o óleo essencial de capim-limão da marca dōTERRA (Barueri – SP) extraído das folhas da planta, através da técnica de destilação a vapor. O OECL foi escolhido a partir do referencial bibliográfico, demonstrando necessitar de menores concentrações para inibir e aniquilar bactérias, além de ser mais resistente à degradação térmica, quando comparado ao OEM. As matérias-primas utilizadas para a preparação dos filmes podem ser vistas na Figura 16.

Figura 16 – Matérias-primas utilizadas na preparação dos filmes de amido.



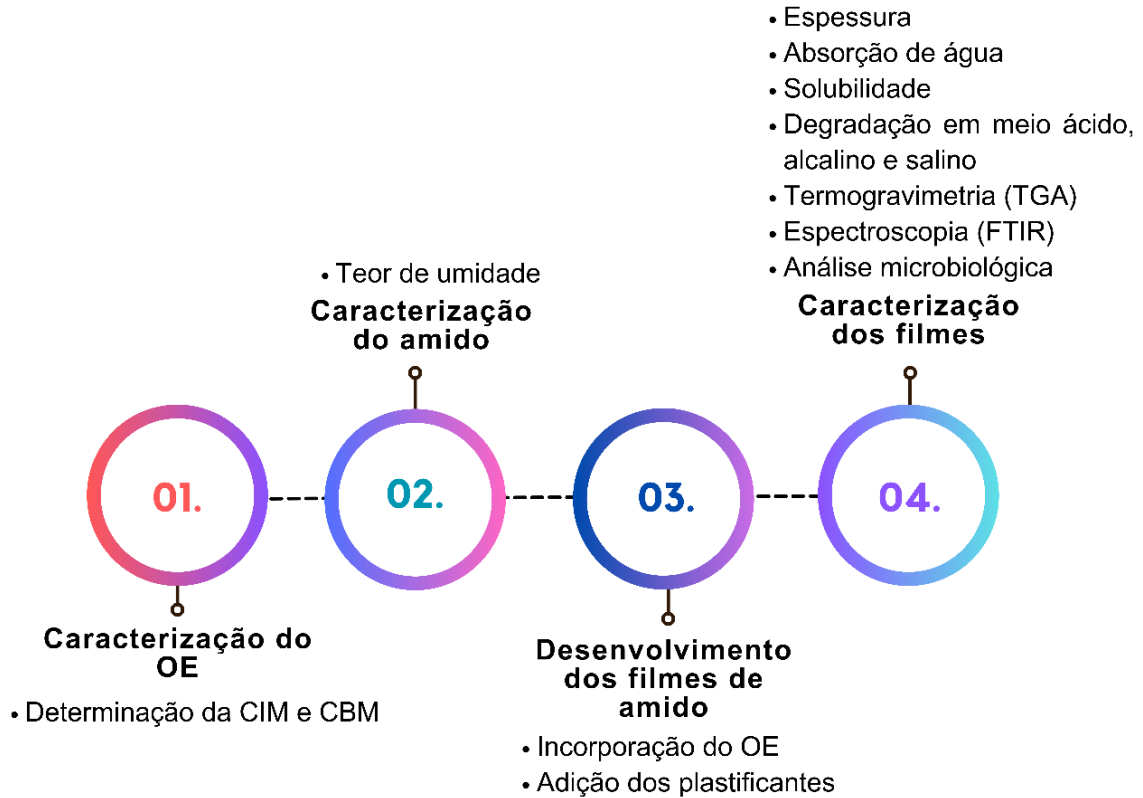
Fonte: Autora (2024).

#### 3.2 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste estudo foi dividida em quatro etapas, representadas na Figura 17. Primeiramente, foi realizada a caracterização dos óleos essenciais de capim-limão e melaleuca quanto à sua ação antibacteriana, com o objetivo de confirmar os resultados descritos na literatura e determinar a CIM e CBM para uso posterior na formulação. Na segunda etapa, o amido de milho foi caracterizado em relação ao seu teor de umidade. Na terceira fase, os filmes de amido foram desenvolvidos, utilizando plastificantes e o OE de capim-limão previamente

incorporado no amido. Posteriormente, na quarta etapa, foi realizada a caracterização física, química, térmica e antibacteriana dos filmes.

Figura 17 – Etapas de estudo.



Fonte: Autora (2024).

### 3.2.1 Caracterização do OEM e OECL: Concentração Mínima Inibitória (CIM) e Concentração Bactericida Mínima (CBM)

Estes ensaios foram conduzidos pelo Centro de Laboratório Regional IAL Santo André (Santo André – SP). Os isolados foram avaliados em relação à suscetibilidade por diluição em caldo modificado, atendendo às diretrizes estabelecidas no documento do *Clinical Laboratory Standard Institute (CLSI) M07-M10* de 2022. A análise atende aos padrões de desempenho para testes de suscetibilidade antimicrobiana, conforme descrito na 32ª edição do M100 do Instituto de padrões clínicos e laboratoriais, Wayne, PA.

Os testes de concentração mínima inibitória (CIM) e concentração bactericida mínima (CBM) foram conduzidos em triplicata, em microplacas com 96 poços de fundo plano, utilizando a técnica de diluição seriada. Em cada poço foram adicionados 100

$\mu\text{L}$  de Caldo Mueller Hinton (KASVI) com 20% de surfactante polissorbato (Tween® 20, da Sigma Aldrich). Foram utilizadas suspensões bacterianas de *Salmonella enterica* (ATCC 10708), *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) e *Escherichia coli* (ATCC 11229).

No primeiro poço foram adicionados 200  $\mu\text{L}$  de OE (100%). Em seguida, 100  $\mu\text{L}$  (50%) deste volume foram transferidos para o 2º poço, e assim sucessivamente até o 12º poço, para os óleos essenciais de melaleuca e de capim-limão. As concentrações de OE adicionadas em cada poço estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Concentração dos OE's em cada poço para a determinação de CIM e CBM.

Número do poço	Concentração do OE (% v/v)
1	100
2	50
3	25
4	12,5
5	6,25
6	3,125
7	1,56
8	0,78
9	0,39
10	0,195
11	0,097
12	0,0488

Fonte: Autora (2024).

### 3.2.2 Caracterização do amido de milho: Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado em triplicata, pesando 1 g de amido de cada amostra e submetendo-o à estufa a 100 °C por 24 h. Para essa análise, seguiram-se os parâmetros da norma ASTM E104-02 (2012). Após a secagem, a massa foi medida, e a umidade foi calculada pela diferença entre a massa inicial ( $m_i$ ), contendo umidade, e a massa final ( $m_f$ ), após a secagem, conforme a Equação 1.

$$Umidade (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

### 3.2.3 Desenvolvimento dos filmes

A fim de desenvolver uma metodologia para a incorporação do óleo essencial, visando melhorar o aspecto visual e a homogeneidade dos filmes sem a adição de surfactante, em um primeiro momento, 9,98 g de amido de milho em base seca foram submetidos ao cisalhamento através de um moedor (Philco) durante 5 min até atingir 50 °C, com o objetivo de romper as cadeias de amilose e amilopectina para melhorar a incorporação e distribuição do óleo essencial nos grânulos de amido.

Finalizada esta etapa, o OECL foi adicionado, lentamente, no moedor junto ao amido de milho até completa homogeneização (Figura 18). Nas duas etapas citadas, a temperatura do processo foi controlada através de um termômetro a laser digital (Zyhum). A seguir, na Tabela 9, pode-se verificar o percentual de OECL utilizada em cada formulação, calculado em base seca de amido.

Tabela 9 – Porcentagem de OECL em cada um dos filmes.

Código	OECL (%)
Branco	0,0
C1	1,6
C2	3,2
C3	6,3

Fonte: Autora (2024).

Após a etapa de incorporação do OECL no amido de milho (Figura 18), as formulações dos filmes foram desenvolvidas através do método de *casting*, sendo a metodologia adaptada de Arezoo et al. (2020), Martins et al. (2021) e Al-Hashimi et al. (2020). O amido de milho previamente incorporado com OECL foi misturado com 250 mL de água deionizada para ocorrer a gelatinização, permanecendo sob agitação mecânica (Centouro) por 10 min, em torno de 70 a 80 °C.

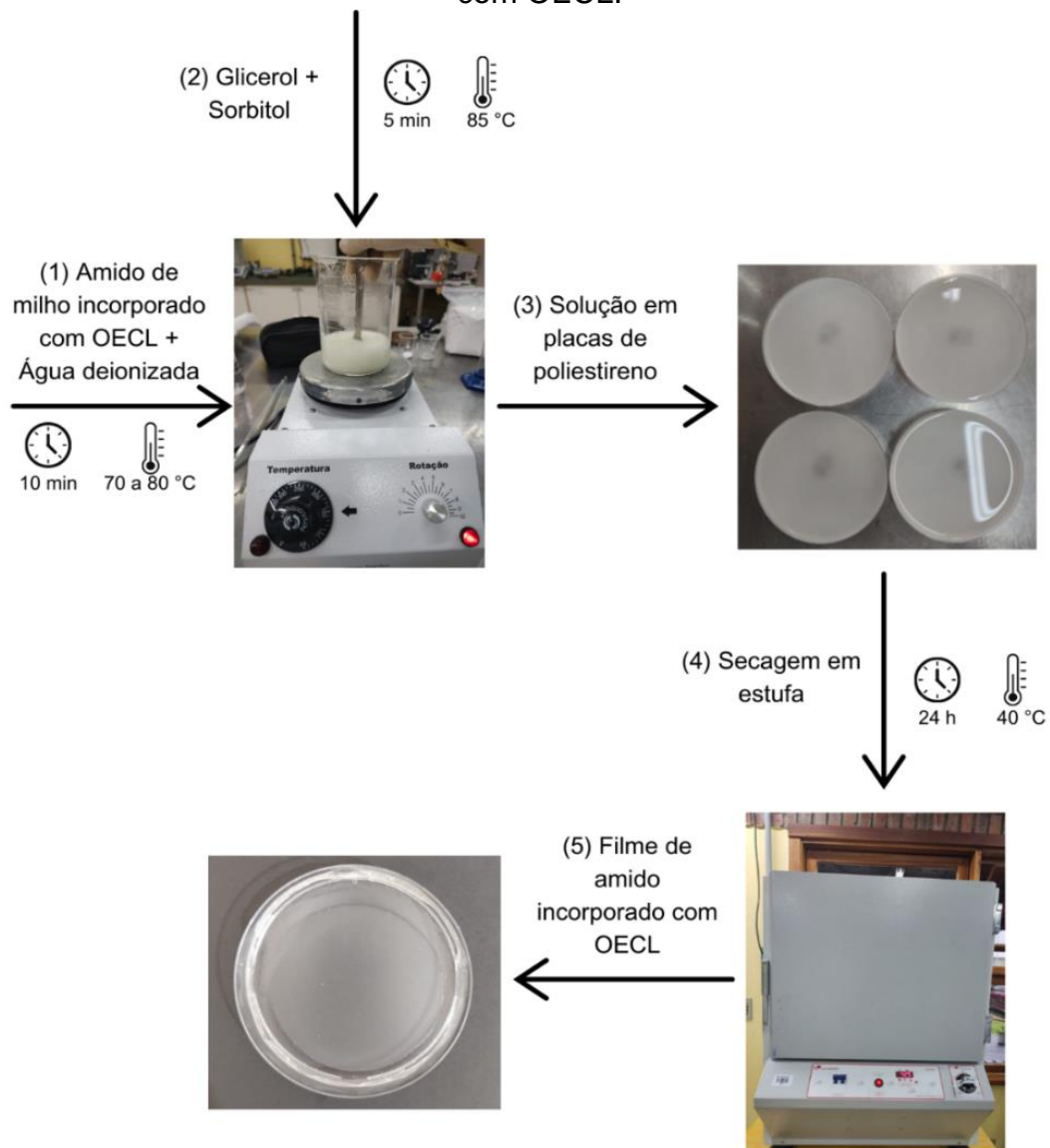
Figura 18 – Fluxograma do processo de incorporação do óleo essencial de capim-limão.



Fonte: Autora (2024).

Após essa etapa, foram preparados os filmes de amido, conforme representado pela Figura 19. Nesta etapa, foram adicionados na solução gelatinizada 1,96 g de glicerol e 1,96 g de sorbitol como agentes plastificantes, o que corresponde a uma relação de 1:1 entre os plastificantes (39% em massa de amido em base seca). A solução permaneceu sob agitação mecânica por 5 min a 85 °C. Em seguida, a mistura foi colocada em placas de Petri de poliestireno (8,5 cm de diâmetro) e seca em estufa (Lucadem, SP) a 40 °C por 24 h. Após a secagem, os filmes foram cuidadosamente removidos, envolvidos em papel filme e armazenados em um local protegido da luz.

Figura 19 – Fluxograma do processo de obtenção dos filmes de amido incorporados com OECL.



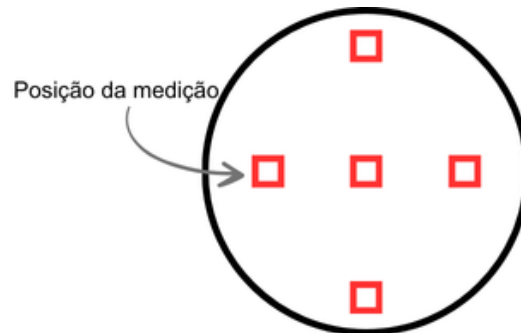
Fonte: Autora (2024).

### 3.2.4 Técnicas de caracterização dos filmes

#### 3.2.4.1 Espessura

A espessura dos filmes de amido foi medida com o auxílio de um micrômetro da marca Cosa com escala de 0 a 0,25 mm e com precisão de 0,001 mm. A espessura final correspondeu à média aritmética de cinco pontos de cada amostra, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Medida da espessura dos filmes nas posições determinadas.



Fonte: Autora (2024).

#### 3.2.4.2 Absorção de água

A taxa de absorção de água foi determinada, pois afeta as propriedades de barreira, a resistência bacteriana e as propriedades mecânicas das amostras (Sanhawong et al, 2017). Os ensaios foram realizados em triplicata, utilizando filmes com dimensões de 1 x 1 cm. As amostras foram previamente pesadas e, em seguida, imersas em água destilada por 24 h. Após esse período, o excesso de água foi cuidadosamente removido com papel toalha, e o material foi novamente pesado. O percentual de absorção de água foi obtido através da Equação 2, em que  $w_i$  é a massa inicial (g) e  $w_f$  é a massa final (g).

$$\text{Abs. de água (\%)} = \frac{w_f - w_i}{w_i} \times 100 \quad (2)$$

#### 3.2.4.3 Solubilidade

A determinação da solubilidade dos filmes foi realizada a partir de uma adaptação de Liu et al. (2024). Os filmes foram cortados em dimensões de 2 x 2 cm, em triplicata para cada amostra, sendo secos por 24 h em estufa a 40 °C. Após esse período, a massa das amostras foi verificada, e os filmes foram submersos em béqueres contendo 80 mL de água deionizada por 24 h, com agitação manual branda esporádica. Por fim, o excesso de água foi removido, e as amostras foram secas em

estufa a 60 °C até massa constante por 12 h. O percentual de solubilidade foi obtido através da Equação 3, em que  $w_i$  é a massa inicial (g) e  $w_f$  é a massa final (g).

$$\text{Solubilidade (\%)} = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100 \quad (3)$$

#### 3.2.4.4 Degradação em meio ácido, alcalino e salino

O teste de degradação em meio ácido, alcalino e salino foi realizado utilizando soluções de ácido acético 10% (m/v), hidróxido de sódio 10% (m/v) e cloreto de sódio 10% (m/v), conforme relatado por Oliveira et al. (2023). A metodologia aplicada para cada solução consiste na verificação das massas e submersão das amostras dos filmes (com dimensões de 1 x 1 cm, em triplicata) por um tempo total de 24 e 48 h nas diferentes soluções. Após este período, as soluções foram filtradas e as amostras dos filmes foram pesadas para a obtenção de sua massa final. A porcentagem de perda de massa foi obtida conforme a Equação 4, em que  $w_i$  é a massa inicial (g) e  $w_f$  é a massa final (g).

$$\text{Perda de massa (\%)} = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100 \quad (4)$$

#### 3.2.3.5 Análise termogravimétrica (TGA)

Com o objetivo de avaliar a degradação térmica do óleo essencial de capim-limão puro e das quatro formulações de filmes de amido de milho, foi realizada a análise termogravimétrica (TGA) utilizando um analisador térmico (Perkin Elmer TGA, EUA) no IFRS – Campus Farroupilha. Os testes foram conduzidos em atmosfera de nitrogênio (50 mL/min) com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, na faixa de temperatura de 30 a 800 °C.

#### 3.2.3.6 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Com o intuito de verificar as interações das diferentes concentrações do óleo essencial de capim-limão nos filmes de amido, utilizou-se a Espectroscopia de

Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR). O ensaio foi realizado em espectrofotômetro (Perkin Elmer FTIR, EUA), empregando a técnica de refletância total atenuada (ATR) no IFRS – Campus Farroupilha. Os espectros foram registrados na faixa de região entre 4000 e 500  $\text{cm}^{-1}$  com uma resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e 16 varreduras.

### 3.2.3.7 Análise microbiológica

A atividade antimicrobiana dos filmes contra *Salmonella enterica* e *Escherichia coli* foi determinada pelo Centro de Laboratório Regional IAL Santo André (Santo André – SP), através do teste de difusão em disco, realizado em triplicata. A suspensão das cepas padrão bacterianas isoladas foi preparada com turbidez padrão de 0,5 de McFarland, correspondendo a uma concentração padrão de  $1,5 \times 10^8$  UFC/mL (unidades formadoras de colônia por mililitro). Essas cepas foram utilizadas para contaminar placas com ágar Mueller-Hinton (KASVI). As amostras dos filmes Branco, C1, C2 e C3, que apresentavam diâmetros de 10 mm, foram adicionadas nas placas, inoculadas e incubadas em estufa a 37 °C por 24 h.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

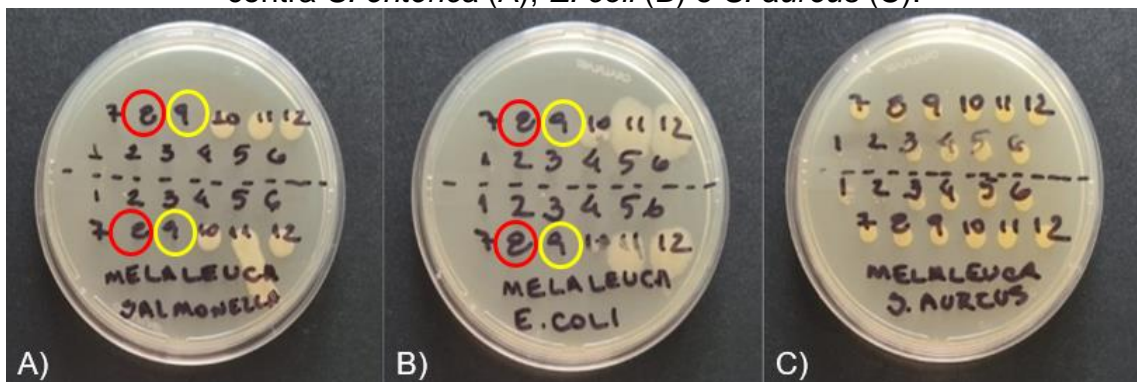
### 4.1 CONCENTRAÇÃO INIBITÓRIA MÍNIMA (CIM) E CONCENTRAÇÃO BACTERICIDA MÍNIMA (CBM) DO OEM E OECL

A CIM e CBM dos óleos essenciais de melaleuca e de capim-limão foram determinadas com o intuito de definir o OE a ser utilizado e sua concentração apropriada, a fim de fornecer propriedades antibacterianas ao filme de amido. A avaliação do crescimento das bactérias ocorreu através da detecção de turbidez nas diferentes concentrações de OE testadas (Silva et al., 2021). As soluções de cada um dos óleos essenciais, em diferentes concentrações, foram adicionadas em placas de Petri contendo os microrganismos. Os resultados dos ensaios em duplicata são apresentados na Figura 21 e na Tabela 10 para o OEM e na Figura 22 e Tabela 11 para o OECL.

A CIM se trata do poço com a menor concentração que inibe o desenvolvimento da bactéria e foi indicada por círculos amarelos. Por outro lado, a CBM é o poço que se refere à menor concentração que é capaz de matar completamente a bactéria e foi indicada por círculos vermelhos.

Conforme observado na Figura 21 e Tabela 10, o OEM foi eficaz contra a *Salmonella enterica* e a *Escherichia coli*, porém foi incapaz de inibir e de matar a bactéria *Staphylococcus aureus*.

Figura 21 – CIM (círculos amarelos) e CBM (círculos vermelhos) do OEM, após 24h, contra *S. enterica* (A), *E. coli* (B) e *S. aureus* (C).



Fonte: Autora (2024).

Tabela 10 – CIM e CBM do óleo essencial de melaleuca contra as bactérias *S. enterica*, *E. coli* e *S. aureus*.

Bactéria	CIM (%)	CBM (%)
<i>Salmonella enterica subsp.</i>		
Enterica serovar Choleraesuis ATCC 10708	0,39	0,78
<i>Escherichia coli</i> ATCC 11229	0,39	0,78
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538	Não houve inibição	Não houve inibição

Fonte: Autora (2024).

Os autores Sakkas et al. (2018) testaram os valores de CIM e CBM de diversos óleos essenciais contra a bactéria *S. aureus*. O OEM conseguiu inibir a bactéria com valores de 0,25% (v/v) e eliminá-la com uma concentração de 4,0% (v/v). No entanto, os principais constituintes do OEM utilizado no estudo são terpinen-4-ol e *p*-cimeno, diferentemente do OEM do presente estudo, em que os constituintes majoritários são terpinen-4-ol (36,13%) e  $\gamma$ -terpineno (23,44%).

De acordo com Silveira et al. (2019), o mecanismo antibacteriano se deve principalmente ao composto terpinen-4-ol. Este principal constituinte do OEM é capaz de danificar a membrana plasmática das bactérias, levando à disfunção e morte celular. No entanto, segundo Marchese et al. (2017), o *p*-cimeno apesar de não apresentar alta atividade antibacteriana, pode potencializar a ação de outros agentes antibacterianos, como o terpinen-4-ol.

De acordo com a Tabela 10, a CIM e CBM, para a bactéria *E. coli* foram de respectivamente, 0,39 e 0,78% (v/v). Nguyen et al. (2023), encontraram um valor de CBM de 0,5% (v/v) para a mesma bactéria com um OEM constituído majoritariamente de terpinen-4-ol (42,59%),  $\alpha$ -terpineno (9,12%) e  $\gamma$ -terpineno (20,10%), os mesmos 3 principais componentes do OEM do presente estudo. Outras pesquisas corroboram a eficácia do OEM contra a *E. coli*, assim como Silva (2019) e Liu et al. (2020), com a variação do principal componente antibacteriano, terpinen-4-ol, variando de 43,1 a 37,29%, respectivamente.

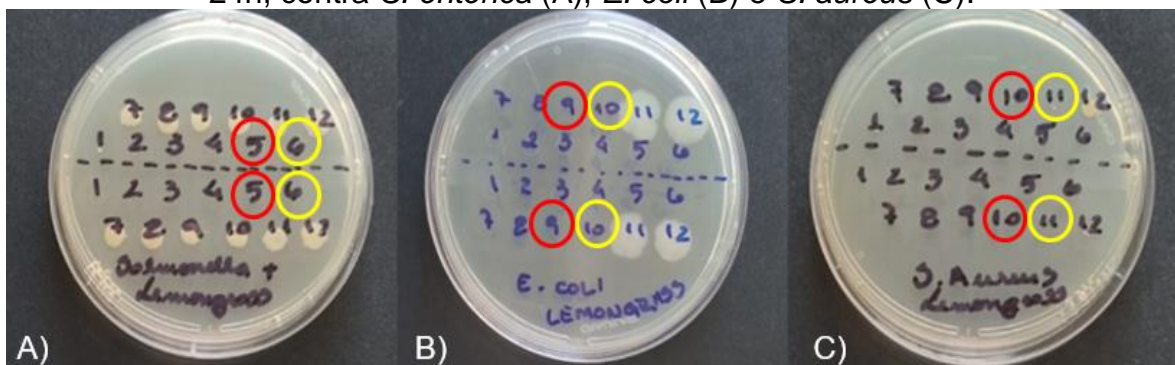
Neste estudo, para a bactéria *S. enterica*, a CIM e CBM foram de respectivamente, 0,38 e 0,78% (v/v), conforme indicado na Tabela 10. Várias

pesquisas, como as de Mazzarrino et al. (2015) e Kiymaci et al. (2023), reforçam a eficácia antibacteriana do OEM contra essa bactéria.

Puvača et al. (2021) utilizaram um óleo essencial de melaleuca com o terpinen-4-ol como principal composto (38,53%), de composição semelhante ao OEM do presente estudo. Os autores observaram um efeito antibacteriano significativo contra bactérias gram-negativas, como *E. coli*, *S. Typhi* e *C. koseri*, enquanto não houve inibição contra a bactéria gram-positiva *S. aureus*. De maneira similar, o OEM da marca dōTERRA também demonstrou maior eficácia contra bactérias gram-negativas, como *S. enterica* e *E. coli*, em contraste com seu desempenho limitado contra bactérias gram-positivas, como *S. aureus*.

Em contrapartida, conforme observado na Figura 22 e Tabela 11, o OECL foi eficaz contra todas as cepas bacterianas: *Salmonella enterica*, *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, tendo menores valores de CIM e CBM para a bactéria gram-positiva.

Figura 22 – CIM (círculos amarelos) e CBM (círculos vermelhos) do OECL, após 24h, contra *S. enterica* (A), *E. coli* (B) e *S. aureus* (C).



Fonte: Autora (2024).

Tabela 11 – CIM e CBM do óleo essencial de capim-limão contra as bactérias *S. enterica*, *E. coli* e *S. aureus*.

Bactéria	CIM (%)	CBM (%)
<i>Salmonella enterica</i> subsp.		
Enterica serovar Choleraesuis ATCC 10708	3,125	6,25
<i>Escherichia coli</i> ATCC 11229	0,195	0,39
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538	0,097	0,195

Fonte: Autora (2024).

O OECL do presente estudo possui 40,37% de geranial e 29,72% de neral, que, segundo Adukwu et al. (2016), são os principais constituintes antibacterianos e juntos formam o citral. Os mesmos autores obtiveram resultados semelhantes de CIM e CBM para a bactéria *S.aureus* de 0,06 e 0,13% (v/v), respectivamente, com um OECL constituído de 50,51% de geranial e 38,49% de neral. Resultados concordantes foram obtidos por Gao et al. (2020).

Antara et al. (2013) testaram um OECL constituído majoritariamente de geranial (37,85%) e citral (27,93%) contra as bactérias *E.coli* e *S.aureus*, tendo valores de CIM de 1,0 e 0,8% (v/v), respectivamente. A menor eficácia antibacteriana observada, em comparação com o presente estudo, pode ser atribuída à concentração reduzida de geranial e neral no óleo utilizado por Antara et al. (2013) em relação ao OECL deste estudo. Carvalho et al. (2015) destacam que pequenas variações na composição química do óleo essencial podem influenciar significativamente sua atividade antimicrobiana.

Silva et al. (2017) avaliaram o óleo essencial de capim-limão contra diversas bactérias que afetam tartarugas de estimação, incluindo *S. enterica*. O óleo utilizado continha 86% de citral, e os autores relataram valores de CIM e CBM de 0,125% (v/v) para ambos. A maior eficácia observada pode ser explicada pela alta concentração de citral, resultando em concentrações significativamente menores para inibir o crescimento bacteriano, conforme apresentado na Tabela 11, em comparação ao óleo do presente estudo (70,09%).

De maneira semelhante a este trabalho, Kang e Song (2018) verificaram que o OECL apresentou maior atividade antimicrobiana contra bactérias gram-positivas, com menores valores de concentração inibitória mínima (CIM) em comparação com as bactérias gram-negativas testadas. Esse estudo está alinhado com as observações de Gutiérrez-del-Río, Fernández e Lombó (2018) e de Antara et al. (2013) que indicam uma tendência de resposta mais eficaz do OECL contra bactérias gram-positivas em relação às gram-negativas.

As análises foram realizadas para patógenos alimentares devido à possível aplicação dos filmes de amido incorporados com OE em embalagens alimentícias, o que exige ação antibacteriana eficaz contra patógenos alimentares comumente associados a infecções bacterianas no organismo humano. Com base nos resultados descritos, escolheu-se preparar filmes de amido com concentrações de OECL de 1,6%, 3,2% e 6,3% em massa (calculado em base seca de amido), visando avaliar os

efeitos de diferentes concentrações de OE nos filmes. O óleo essencial de capim-limão foi escolhido por sua eficácia contra todas as bactérias testadas.

#### 4.2 TEOR DE UMIDADE DO AMIDO DE MILHO

O amido de milho utilizado apresentou teor de umidade médio de  $12,18 \pm 0,09\%$ , valor próximo ao indicado no boletim técnico do produto ( $<14\%$ ). De acordo com Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 711 de 1º de julho de 2022, é permitida a umidade máxima de 15% (g/100g) para amido de cereais, farelos e farinhas. Sendo assim, os valores obtidos na análise estão dentro do padrão.

#### 4.3 ESPESSURA E ASPECTO VISUAL

O controle da espessura dos filmes é importante para avaliar a uniformidade, repetibilidade da medida de suas propriedades e a validade das comparações entre os filmes (Oliveira, 1996). De acordo com Silva (2011), manter um padrão de espessura nos filmes é desafiador devido ao processo de *casting*. Nesse processo, os filmes são secos em suportes que, se não forem perfeitamente planos, resultam em filmes com espessuras desiguais. Além disso, a espessura final pode variar conforme a quantidade de massa utilizada em cada placa.

A espessura dos filmes de amido variou de 0,290 a 0,310 mm e a incorporação de 1,6%, 3,2% e 6,3% de OECL quando comparado ao filme de amido sem óleo não afetou significativamente a espessura dos filmes resultantes ( $p > 0,05$ ). As espessuras referentes a cada um dos filmes estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Espessura dos diferentes tipos de filmes.

Código	Espessura (mm)*
Branco	$0,310^a \pm 0,033$
C1	$0,290^a \pm 0,012$
C2	$0,290^a \pm 0,024$
C3	$0,300^a \pm 0,031$

\*Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.

Fonte: Autora (2024).

Dessa forma, pode-se afirmar que os resultados foram satisfatórios, uma vez que apresentaram variação superficial insignificante, demonstrando a homogeneidade dos filmes formados. Segundo Silva et al. (2019), filmes que apresentam espessura variada em um mesmo lote, podem comprometer o desempenho funcional da embalagem.

Atualmente, não há uma legislação específica que determine valores exatos de espessura para filmes de amido, especialmente no contexto de filmes biodegradáveis. Wang et al. (2021) desenvolveram filmes de amido incorporados com OE de *Zanthoxylum bungeanum* e obtiveram filmes de espessura de  $0,285 \pm 0,05$  mm. De modo semelhante, Perdana et al. (2021) incorporaram OECL em filmes de amido de mandioca com diferentes concentrações (1%, 1,5% e 2%) e não observaram influência do óleo na espessura dos filmes ( $0,260 \pm 0,01$  mm).

De acordo com Ferreira (2014), a concentração das matérias-primas utilizadas pode influenciar a espessura dos filmes formados, uma vez que soluções mais viscosas tendem a gerar filmes mais espessos. No entanto, o principal fator responsável pela variação na espessura entre os filmes, no método *casting*, é a quantidade da solução filmogênica adicionada à placa.

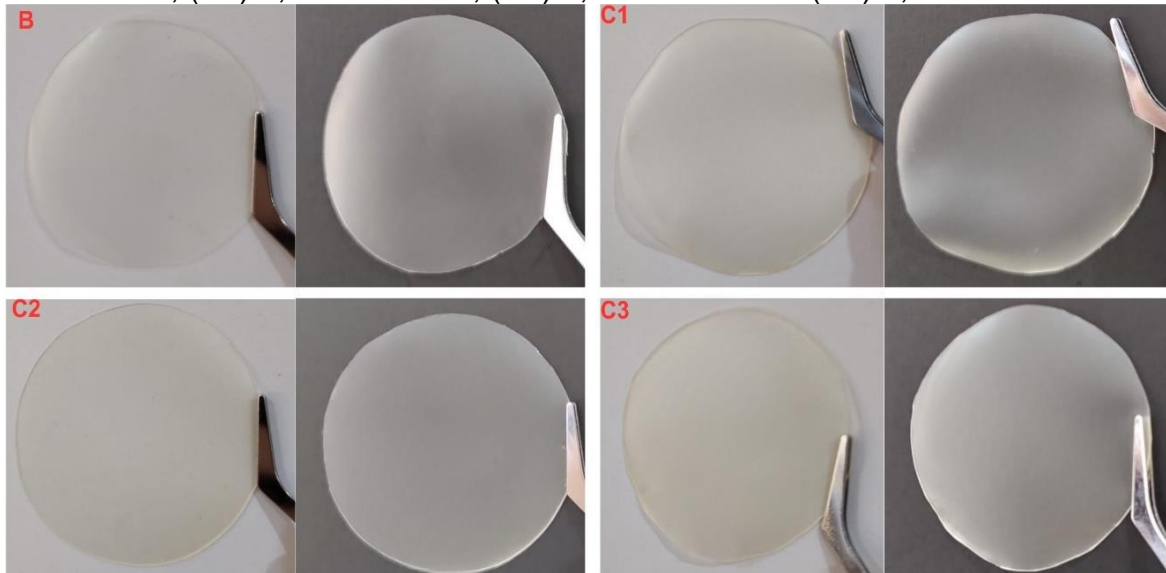
Uma das propriedades mais importantes de um filme está relacionada à sua aparência, que pode ser avaliada por meio de observações visuais e táteis. Segundo Castro (2020), o filme deve apresentar uma superfície contínua e homogênea, sem fissuras, partículas insolúveis ou poros abertos após o processo de secagem. Além disso, a coloração deve ser uniforme, sem áreas com tonalidades mais escuras ou mais claras.

Todas as formulações dos filmes preparadas apresentaram superfícies sem rupturas ou fraturas após a secagem, e mostraram-se homogêneas, isentas de bolhas e partículas insolúveis. Em relação às características de manuseio, todos os filmes foram facilmente removidos das placas de Petri de poliestireno após a secagem, sem risco de rupturas, conforme ilustrado na Figura 23.

Os filmes de amido de milho contendo OECL apresentaram cor ligeiramente mais amarelada à medida que os níveis de óleo essencial foram aumentados, embora a transparência tenha sido mantida. Todos os filmes apresentaram brilho, boa transparência e o aroma característico do capim-limão nas formulações que continham o óleo, enquanto a formulação sem óleo permaneceu inodora. Ademais, os filmes de amido de milho se mostraram mais brilhantes e lisos no lado em contato com

a placa de Petri durante a secagem, em comparação com o lado exposto ao ar, conforme observado por Basiak, Lenart e Debeaufort. (2018) e por Castro (2020).

Figura 23 – Aspecto visual dos filmes de amido em fundos branco e preto: (B) Branco, (C1) 1,6% de OECL, (C2) 3,2% de OECL e (C3) 6,3% de OECL.



Fonte: Autora (2024).

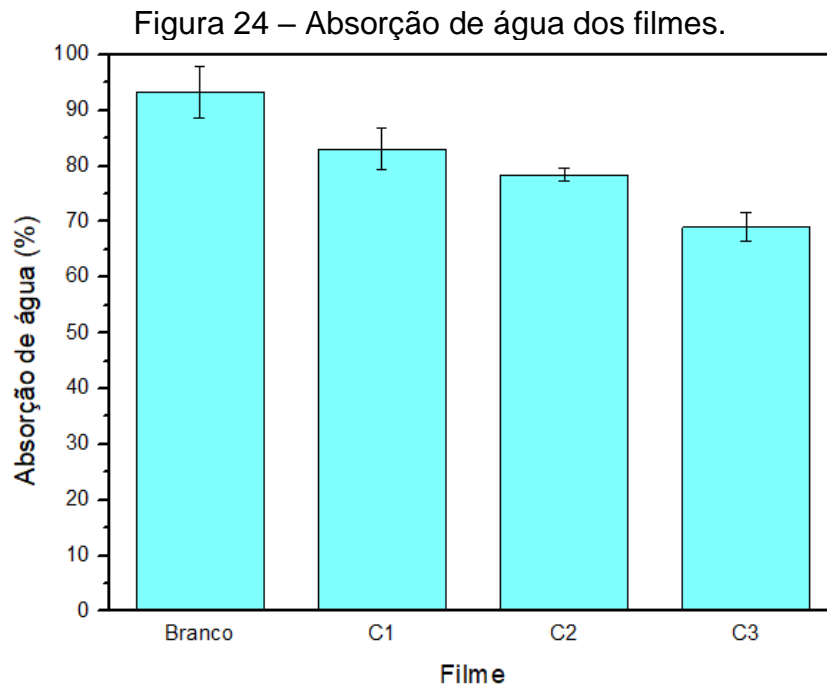
Assim como obtido neste estudo, Ghasemlou et al. (2013) constataram que todos os filmes preparados à base de amido de milho apresentaram superfície homogênea, boa transparência e brilho, sem bolhas e ausência de partículas insolúveis e de fraturas, apresentando um leve amarelamento nos filmes contendo óleo essencial de *Zataria multiflora* e *Mentha pulegium*.

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O amido é um biopolímero hidrofílico composto por duas frações principais: amilose e amilopectina, ambas ricas em grupos hidroxila (-OH) que formam pontes de hidrogênio com moléculas de água, facilitando sua absorção pela matriz do filme. No entanto, a incorporação de óleos essenciais, geralmente compostos por moléculas hidrofóbicas como terpenos, modifica essa interação (Zinoviadou; Koutsoumanis; Biliaderis, 2009).

Segundo Ardjoum et al. (2023), os compostos hidrofóbicos do óleo se dispersam na estrutura do filme, criando barreiras que dificultam a penetração da água, reduzindo a interação entre as moléculas de água e os grupos hidrofílicos do

amido, o que resulta em uma menor absorção de água. A Figura 24 apresenta os resultados de absorção de água dos filmes de amido de milho incorporados com OECL.



Fonte: Autora (2024).

Entre os filmes analisados, o filme branco, sem adição de OECL, apresentou a maior absorção de água, com um valor de  $90,29 \pm 4,67\%$ . O filme C1, contendo 1,6% de OECL, apresentou uma absorção de  $83,09 \pm 3,70\%$ , seguido pelo filme C2, com 3,2% de OECL, que absorveu  $78,40 \pm 1,19\%$ . O filme C3, com a maior concentração de OECL (6,3%), teve a menor absorção de água, registrando  $69,05 \pm 2,60\%$ . Além disso, observou-se que todos os filmes mantiveram sua integridade após o teste de absorção de água.

De acordo com Martins et al. (2021), a adição do óleo essencial aumenta diretamente o caráter hidrofóbico da matriz polimérica dos filmes. Desta forma, como observado pela Figura 24, os filmes contendo óleo essencial absorveram menos água, com essa absorção sendo inversamente proporcional à concentração de óleo essencial adicionada ao filme. Portanto, à medida que a concentração de óleo essencial aumentou, observou-se uma redução na absorção de água durante os ensaios (Zinoviadou; Koutsoumanis; Biliaderis, 2009; Pires et al., 2011). Estudos

como os de Ardjoum et al. (2023), Chenchen et al. (2020) e Al-Hashimi et al. (2020) consolidam estes resultados.

Šuput et al. (2016) desenvolveram filmes de amido de milho com diferentes concentrações de óleo essencial de orégano. O filme sem a adição de óleo essencial apresentou uma absorção de água de  $231 \pm 2\%$ . Com a incorporação de 1% de óleo essencial, a absorção foi reduzida para  $156 \pm 1\%$ , enquanto a adição de 2% resultou em uma absorção de  $118 \pm 1\%$ .

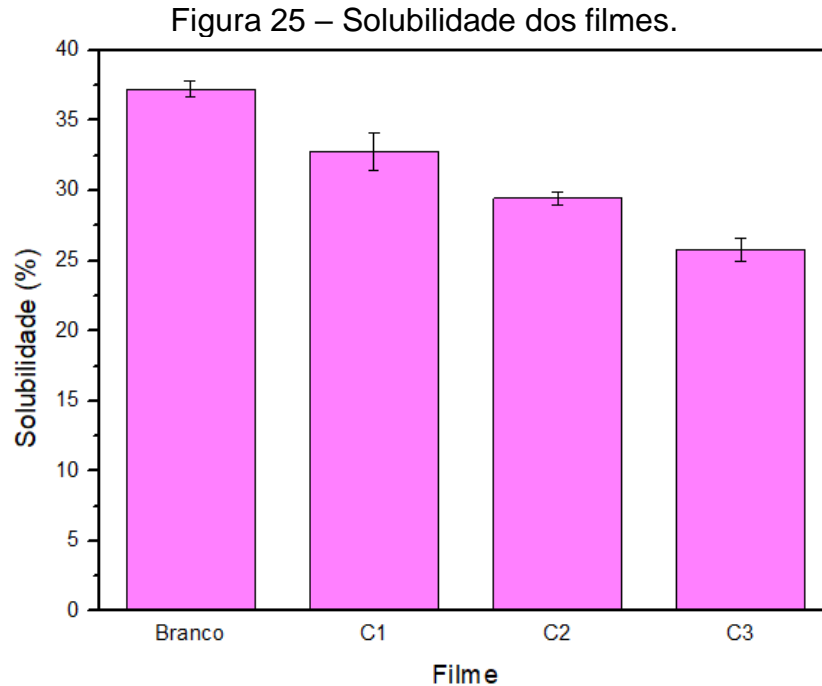
De acordo com Fan et al. (2024), a quantidade de absorção de água em filmes de amido com óleo essencial é influenciada por diversos fatores, relacionados tanto à natureza do amido quanto à composição e estrutura do filme após a incorporação do óleo. Esses fatores afetam diretamente a capacidade do filme de reter ou repelir água, o que é fundamental para aplicações em embalagens biodegradáveis e outros usos em que as propriedades de barreira à umidade são importantes.

Por exemplo, a presença de plastificantes, pode aumentar a absorção de água, pois eles aumentam a flexibilidade e a mobilidade das cadeias de amido, facilitando a entrada de água na matriz do filme (Lima et al, 2007). Malafatti et al. (2021) observaram que a presença de plastificantes aumentou a espessura e a retenção de água, bem como a solubilidade.

#### 4.5 SOLUBILIDADE

De acordo com Fakhouri et al. (2007), determinar a solubilidade é um parâmetro de grande importância e pode indicar a aplicação dos filmes formados. Embalagens com alta solubilidade em água podem ser desejáveis em alguns casos, como embalagens usadas para alimentos pré-preparados, de modo que durante a preparação a embalagem possa ser solubilizada juntamente com o alimento. No entanto, para aplicações em alimentos com alto teor de umidade, são indicadas embalagens com baixa solubilidade em água, para que a embalagem proteja o alimento e não se degrade devido ao contato com água (Martins et al., 2021).

Pires et al. (2011) elucidam que a adição de óleo essencial reduz a absorção de água pelos filmes, consequentemente reduzindo a solubilidade. Os resultados da análise de solubilidade do presente estudo podem ser vistos na Figura 25.



Fonte: Autora (2024).

Assim como no teste de absorção de água, observou-se uma tendência clara de que, à medida que a concentração de óleo essencial nos filmes aumenta, a solubilidade diminui. O filme branco, sem adição de OECL, apresentou a maior solubilidade, com um valor de  $37,24 \pm 0,59\%$ . O filme C1, contendo 1,6% de OECL, teve uma solubilidade de  $32,79 \pm 1,36\%$ , seguido pelo filme C2, com 3,2% de OECL, que apresentou solubilidade de  $29,44 \pm 0,46\%$ . O filme C3, com a maior concentração de OECL (6,3%), registrou a menor solubilidade, com  $25,79 \pm 0,81\%$ .

Esses resultados estão de acordo com o estudo de Ghasemlou et al. (2013), que também observaram uma redução na solubilidade em filmes de amido de milho com a incorporação de óleo essencial de *Mentha pulegium*. Com a adição de 1% v/v de óleo essencial, a solubilidade em água foi reduzida para  $23,18 \pm 1,65\%$ , enquanto a adição de 3% v/v resultou em uma solubilidade ainda menor, de  $19,55 \pm 0,78\%$ . O filme controle, sem a adição de óleo essencial, apresentou uma solubilidade de  $27,88 \pm 2,01\%$ .

#### 4.6 DEGRADAÇÃO EM MEIO ÁCIDO, ALCALINO E SALINO

Segundo Behera, Mohanta e Thirugnanam (2022), o teste de efeito alcalino, ácido e salino verifica a resistência do filme à ação química do meio, o que é

importante para possível aplicação em embalagens de alimentos, sendo fundamental para avaliar a estabilidade e a durabilidade desses materiais em diferentes condições ambientais e de uso. No entanto, não foram encontrados estudos de filmes de amido incorporados com óleo essencial avaliando este parâmetro na literatura.

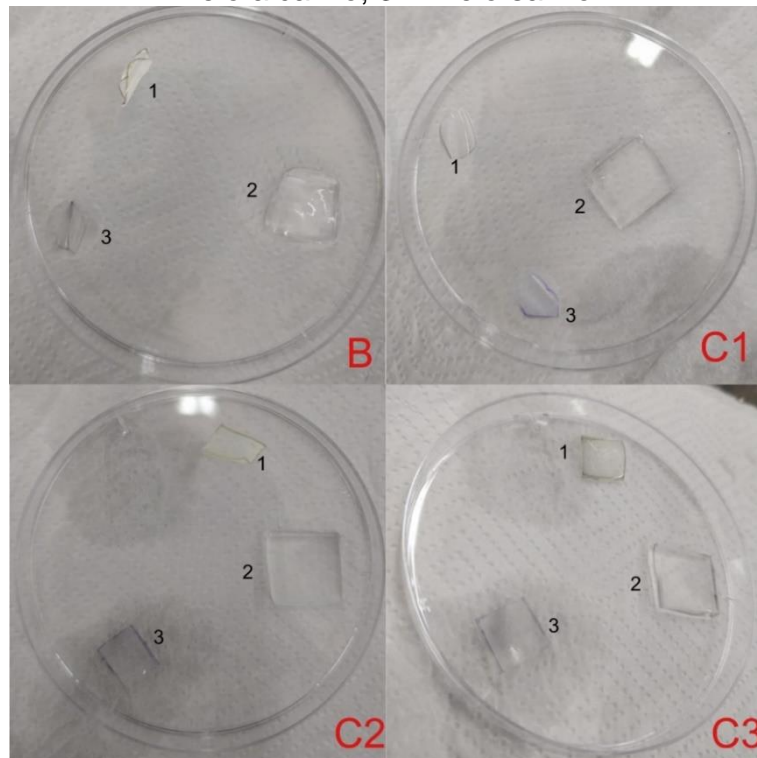
A seguir, na Figura 26, estão as amostras de cada tipo de filme antes das 48 h do teste de degradação nos meios ácido, alcalino e salino. Após este tempo, pode-se observar como cada filme respondeu a cada meio químico através da Figura 27.

Figura 26 – Amostras dos filmes antes da etapa de degradação.



Fonte: Autora (2024).

Figura 27 – Amostras dos filmes após a etapa de degradação: 1 – meio ácido; 2 – meio alcalino; 3 – meio salino.



Fonte: Autora (2024).

A partir da análise visual, nota-se que os filmes de amido submersos em soluções de ácido acético (1) e cloreto de sódio (3) exibiram uma aparência “envergada”, especialmente na formulação sem óleo essencial (Branco) e na

formulação com menor concentração de óleo essencial (C1). Com o aumento da concentração de OECL, observou-se que os filmes submersos nas soluções ácida (1) e salina (3) apresentaram uma aparência progressivamente mais uniforme, sem a envergadura nas pontas do filme.

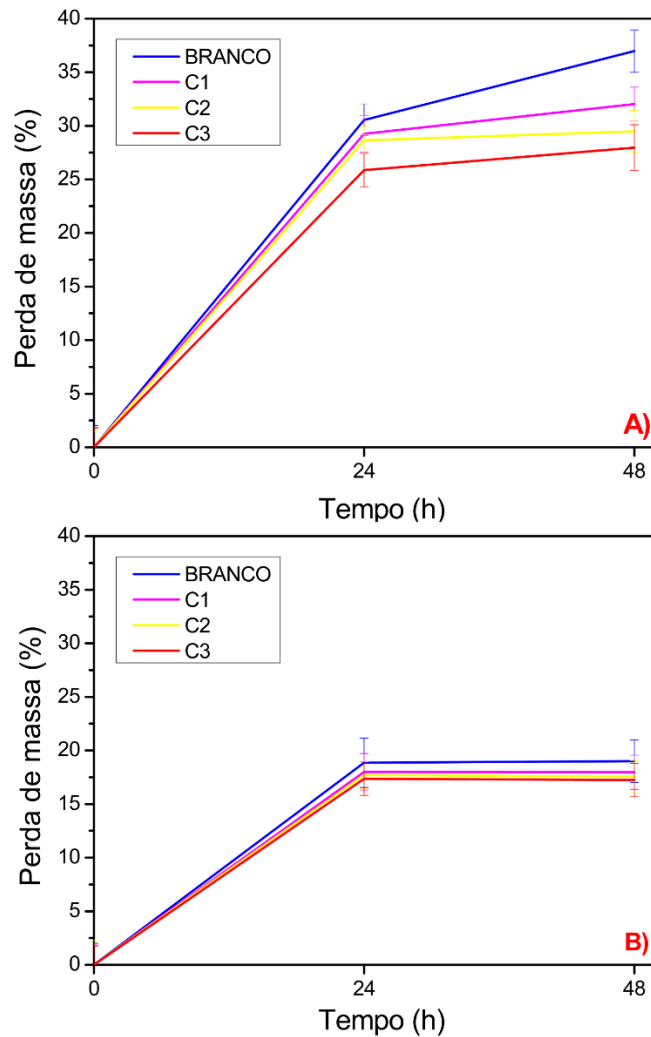
Em relação ao efeito alcalino, observou-se que todas as formulações não se mostraram resistentes a este meio, evidenciada pelo inchaço dos filmes. Resultado semelhante foi observado em estudo de Oliveira et al. (2023), ao produzirem filmes de amido de milho reforçados com nanocristais de celulose.

Uma possível explicação para o inchaço dos filmes na presença de hidróxido de sódio (NaOH), de acordo com Behera, Mohanta e Thirugnanam (2022), é a ruptura das ligações de hidrogênio devido à sua natureza altamente alcalina, que facilita a dissociação das moléculas de água e a interação com substratos polares. O NaOH rompe as ligações de hidrogênio entre as moléculas de amido, causando o relaxamento da estrutura do polímero. Isso permite que as moléculas de água penetrem com mais facilidade, resultando no inchaço do filme. Por conta do estado final das amostras submersas em solução alcalina, não foi possível realizar a pesagem final, pois, ao retirar as amostras da submersão, houve muita perda de massa durante o processo por estarem extremamente sensíveis.

A seguir, na Figura 28 estão relatadas as perdas de massa que ocorreram no processo de submersão das amostras nos meios ácido e salino, respectivamente. Corroborando com o que foi observado visualmente, notou-se que a perda de massa das amostras em solução ácida foi mais acentuada naquelas sem óleo essencial (Branco), apresentando uma perda final de  $36,97 \pm 1,98\%$ . Para a concentração de 1,6% de OECL (C1), a perda foi de  $32,02 \pm 1,59\%$ , seguida por  $29,49 \pm 1,96\%$  na concentração de 3,2% de OECL (C2). A menor perda de massa ocorreu com a maior concentração de óleo essencial (C3), 6,3%, resultando em  $27,97 \pm 1,14\%$ .

Uma possível explicação de acordo com Farias (2016) é que os óleos essenciais podem atuar como uma barreira física, dificultando a penetração de água e ácidos no interior da matriz do amido. Dessa forma, reduzindo a exposição das cadeias de amido ao ácido e, portanto, diminuindo a degradação por hidrólise.

Figura 28 – Degradação em meio ácido (A) e em meio salino (B).



Fonte: Autora (2024).

Conforme observado na Figura 28, os filmes de amido permaneceram íntegros e estáveis na solução salina. O filme sem óleo essencial (Branco) apresentou uma perda de massa ligeiramente maior em comparação aos demais, com uma redução de  $19,01 \pm 1,77\%$ . O filme com 1,6% de OECL (C1) apresentou uma perda de  $17,97 \pm 1,59\%$ , seguido pelo filme com 3,2% de OECL (C2), com  $17,56 \pm 1,52\%$ . O filme com a maior concentração de óleo essencial, 6,3% (C3), apresentou a menor perda, com  $17,25 \pm 1,56\%$ . Segundo Farias (2016), os óleos essenciais por serem hidrofóbicos tendem a criar uma barreira para a absorção dos filmes em meio aquoso. Essa é uma provável explicação para a ligeira diferença entre a perda de massa de cada tipo de filme.

De acordo com Zortéa et al. (2024), os filmes de amido podem durar até 45 dias em meio salino semelhante ao mar. Segundo os autores, a capacidade de degradação

dos biofilmes representa uma alternativa promissora para substituir polímeros convencionais por materiais mais sustentáveis, que se decomponham mais rapidamente em ambientes salinos. Esse aspecto é crucial para reduzir a poluição plástica nos oceanos, ajudando a proteger os ecossistemas marinhos.

#### 4.7 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A análise térmica fornece informações essenciais sobre a temperatura máxima que uma embalagem pode suportar sem comprometer sua integridade, ajudando a determinar as condições ideais para embalar os alimentos de forma segura e eficiente (Syafiq; Sapuan; Zuhri, 2021).

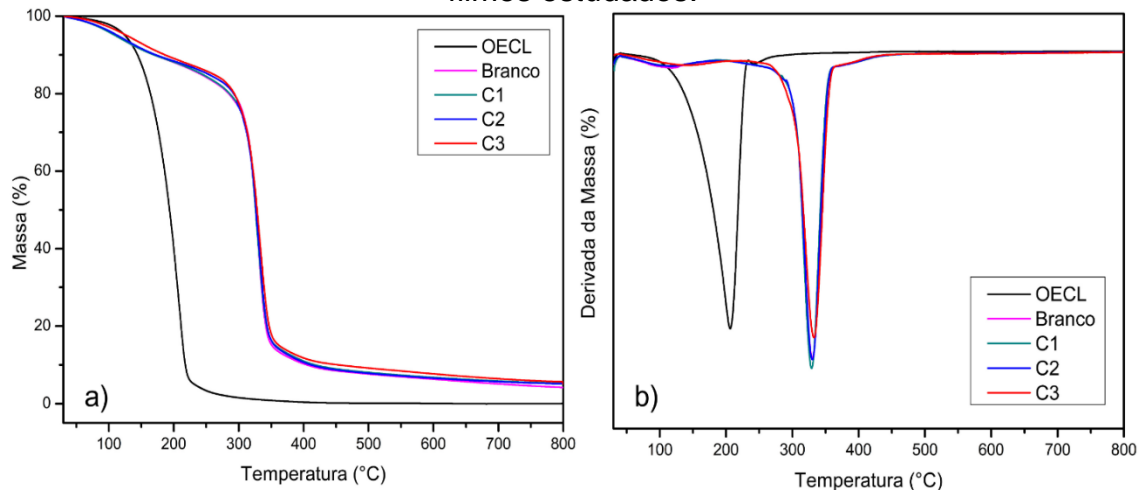
As curvas de TGA e DTG, apresentadas na Figura 29, evidenciam que todos os filmes produzidos exibiram perfis de decomposição térmica similares. As curvas de TGA obtidas apresentam eventos térmicos sobrepostos, conforme ficou evidenciado pelas curvas DTG, onde foi possível verificar que a decomposição ocorreu em dois estágios. As principais informações estão apresentadas na Tabela 13.

Na curva do óleo essencial de capim-limão foi observado apenas um evento de perda de massa, entre 50 e 230 °C, com velocidade máxima de degradação na temperatura de 206,2 °C. Esse evento está associado à completa volatilização de seus diferentes constituintes (Oliveira, 2023). Silva et al. (2023) também realizou a TGA para o OECL e obteve temperatura máxima de degradação de 210 °C.

Nas condições do teste, o primeiro evento de perda de massa para os filmes ocorre entre 100 e 190 °C, devido à evaporação gradual da água residual, que apresenta interações mais fracas com o amido (Terán et al., 2024). No entanto, não se observa uma maior degradação próxima à temperatura de pico do OECL (206,2 °C).

De acordo com Perdonés, Chiralt e Vargas (2016), a não observação de degradação na temperatura máxima de degradação do OE pode indicar que a maior parte dos compostos do OE não ligados à matriz de amido evaporou durante a etapa de secagem do filme pelo efeito de destilação a vapor associado à evaporação. Dessa forma, conforme a água se transforma em vapor, ela arrasta junto os compostos voláteis do óleo essencial, fazendo com que sua evaporação ocorra antes mesmo do filme ser exposto às temperaturas elevadas da análise térmica (Sullca et al., 2018).

Figura 29 – Gráficos TGA (a) e DTG (b) para o óleo essencial (OECL) e para os filmes estudados.



Fonte: Autora (2024).

Tabela 13 – Principais resultados da degradação térmica para os filmes estudados.

Amostra	$T_{\text{pico}}$ (°C)	Temperatura de degradação (°C)				Massa residual (%)
		$T_{5\%}$	$T_{10\%}$	$T_{25\%}$	$T_{50\%}$	
OECL	206,2	124,7	144,1	170,9	193,6	0,01
Branco	328,3	108,8	168,1	303,2	325,3	4,16
C1	328,5	109,9	169,7	303,7	325,5	5,09
C2	329,4	110,3	170,0	303,9	326,0	5,20
C3	331,5	127,9	186,7	305,3	327,8	5,62

Fonte: Autora (2024).

Através da Tabela 13 e da aproximação feita na Figura 29, observa-se que, no primeiro estágio (5 a 10% de perda de massa), as maiores temperaturas de degradação correspondem ao filme com maior teor de OECL (6,3%). Isso é atribuído à natureza lipídica do óleo essencial, que contribui para a redução do teor de umidade, aumentando a estabilidade térmica dos filmes e prevenindo a degradação precoce, resultando em maior durabilidade (Terán et al., 2024; Duarte, 2020). No entanto, nas menores concentrações de OECL (1,6 e 3,2%) essa diferença é muito sutil. Resultados semelhantes foram registrados por Castro (2020) que afirma que a baixa concentração testada de OE de canela (2 e 3%) não influenciou na estabilidade térmica dos filmes.

Após o primeiro estágio, todos os filmes apresentaram estabilidade térmica, mantendo sua massa praticamente inalterada até 250°C. Já no segundo estágio de

degradação para os filmes de amido, correspondente à maior perda de massa entre 250 °C e 400 °C, é referente ao processo de evaporação do glicerol presente no filme. No entanto, este estágio deve-se principalmente à decomposição da amilose e amilopectina no amido (Mendes et al, 2020), que, quando encontrado isoladamente, apresenta um pico DTG simétrico em torno de 321 °C (Terán et al., 2024).

Ademais, no segundo estágio de perda de massa, a Tabela 13 mostra as temperaturas que cada filme alcançou ao atingir degradações de 25 e 50%. Nesses pontos, não se observam mais diferenças significativas nas temperaturas de degradação, fenômeno também reportado por Castro (2020). Por isso, através de termogravimetria (TGA) e da derivada destes valores (DTG) não foi possível determinar de forma clara a eficiência de incorporação do óleo essencial de capim-limão nos filmes de amido de milho, através da análise da temperatura de degradação. Porém, o aumento da massa residual com a adição de OECL indica que os componentes do óleo essencial permaneceram no filme, possivelmente devido à retenção de compostos durante a decomposição térmica (Zhou et al., 2021).

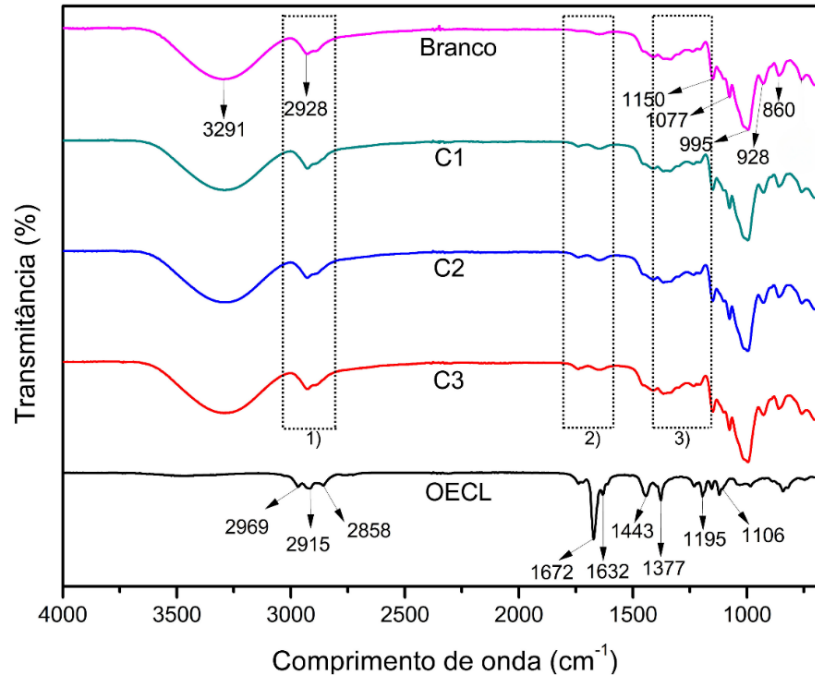
Resultados semelhantes aos deste estudo foram observados por Zhou et al. (2021). A curva de DTG mostrou que, comparado ao filme sem óleo essencial de canela, o filme com 1,5% de OE apresentou maior massa residual, juntamente com um aumento na temperatura máxima de perda de massa.

#### 4.8 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A caracterização dos filmes de amido por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) teve como objetivo evidenciar a presença de grupos funcionais que estão presentes na estrutura dos filmes. Em especial, a presença do óleo essencial de capim-limão, que pode ser avaliada através da comparação com a análise do óleo essencial puro, permitindo verificar sua incorporação nos filmes. Os espectros FTIR são úteis para investigar a miscibilidade dos componentes dos filmes (Queiroz, 2022).

Na Figura 30, são mostrados os espectros de cada tipo de filme e do óleo essencial de capim-limão puro, indicando quais são as bandas presentes na amostra de acordo com a transmitância e o comprimento de onda.

Figura 30 – Espectro FTIR nos filmes de amido sem óleo essencial (Branco), 1,6% OECL (C1), 3,2% OECL (C2), 6,3% OECL (C3) e do OECL puro.



Fonte: Autora (2024).

As principais bandas observadas no espectro de FTIR para filmes de amido estão relacionados às suas características moleculares, especialmente os grupos funcionais presentes na estrutura do amido. O espectro de FTIR exibiu uma banda intensa em  $3291\text{ cm}^{-1}$ , atribuída às vibrações de estiramento das ligações O-H, que são indicativas das interações de hidrogênio no material, como por exemplo, a presença de água nos filmes (Basiak; Lenart; Debeaufort, 2018). Além disso, de acordo com Luchese (2018) e Torres et al. (2011), essa banda é mais intensificada pela adição dos plastificantes, como o glicerol ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ) e sorbitol ( $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$ ).

Outra banda importante apareceu em  $2928\text{ cm}^{-1}$ , característica da deformação axial de ligações C-H do anel (Queiroz, 2022). As bandas em  $1150$  e  $995\text{ cm}^{-1}$  representam um conjunto de bandas associadas às vibrações C-O-C e C-O-H, que refletem a estrutura glicosídica do amido, sendo estas bandas características dos polissacarídeos (Torres et al., 2021). A banda em  $928\text{ cm}^{-1}$  indica vibrações do esqueleto da glicose, associadas a conformações helicoidais, ligadas ao estado amorfo. Já a banda em  $860\text{ cm}^{-1}$  está relacionada às vibrações C-H fora do plano, indicativas de formas cristalinas (Basiak; Lenart; Debeaufort, 2018).

O óleo essencial de capim-limão é majoritariamente composto por neral e geranial, que apresentam como grupos característicos aldeídos e alcenos. Por meio

da análise dos espectros FTIR do OECL puro, pode-se notar as três bandas identificadas em 2965, 2915 e 2858  $\text{cm}^{-1}$  atribuídas às vibrações de deformação axial da ligação C–H em moléculas alifáticas (Antonioli, 2019). A banda com absorção em 1672  $\text{cm}^{-1}$  é típica da vibração de deformação axial da ligação C=O de aldeídos  $\alpha,\beta$ -insaturados, refletindo a estrutura conjugada presente no neral e no geranial (Silva et al., 2023).

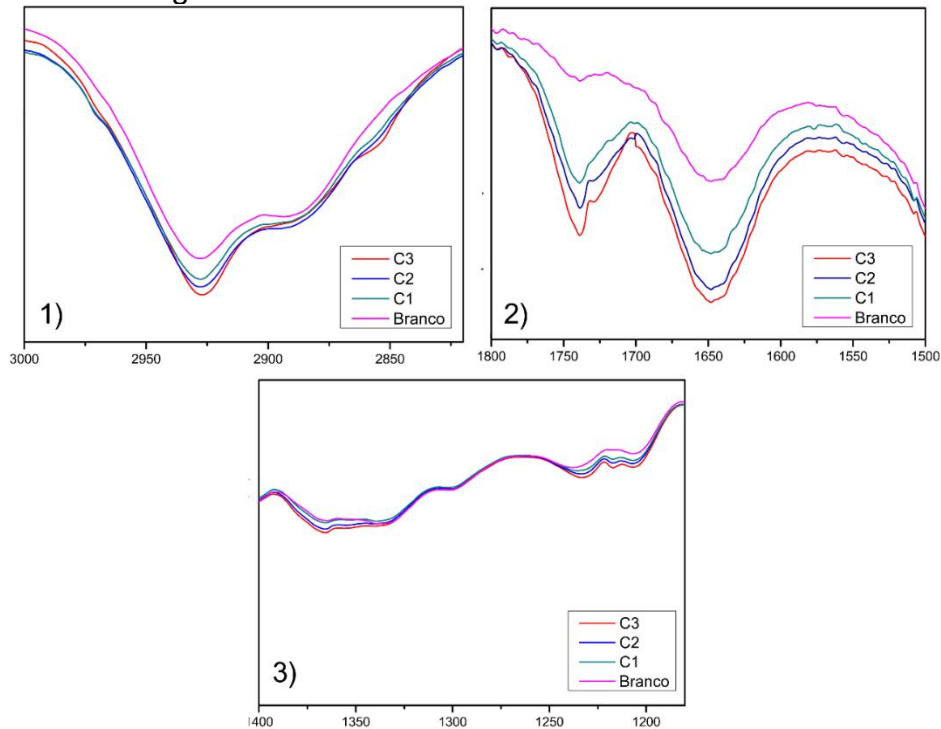
Já a banda localizada em 1632  $\text{cm}^{-1}$  está associada à ligação C=C (Antonioli, 2019). As bandas de intensidade média em 1443 e 1377  $\text{cm}^{-1}$  referem-se às ligações -CH (Silva et al, 2023). Já as bandas entre 1195 e 1106  $\text{cm}^{-1}$  estão relacionadas às ligações C–O de álcoois e ácidos carboxílicos, que fazem parte de alguns dos compostos minoritários encontrados no óleo essencial de capim-limão (Antonioli, 2019).

A seguir, na Figura 31, é apresentada uma aproximação das áreas destacadas na Figura 30 por meio de retângulos pontilhados. O objetivo é permitir uma análise mais detalhada das bandas características de cada formulação, facilitando a comparação e interpretação dos resultados.

Na Figura 31 – 1, os espectros FTIR são apresentados na faixa de 3000 a 2880  $\text{cm}^{-1}$ . Como mencionado anteriormente, essa faixa está associada às vibrações de estiramento C-H nos anéis de glicose do amido (Queiroz, 2022). No entanto, observa-se que, com o aumento da concentração de óleo essencial de capim-limão nos filmes, a intensidade das bandas também aumentou. Esse incremento reflete as vibrações de deformação axial da ligação C–H em moléculas alifáticas presentes no óleo essencial, confirmando, assim, a efetiva presença do OE nos filmes (Antonioli, 2019).

Corroborando com isso, a Figura 31 – 2, demonstra os espectros FTIR na faixa de 1800 a 1500  $\text{cm}^{-1}$ . Neste intervalo, está a banda mais forte do OECL, em 1672  $\text{cm}^{-1}$ , absorção típica da vibração de deformação axial da ligação C=O que reflete a estrutura conjugada presente no citral (Silva et al., 2023). Dessa forma, pode-se notar a presença deste componente nos filmes incorporados com óleo essencial, novamente, de forma proporcional à quantidade de OECL adicionada ao filme.

Figura 31 – Áreas destacadas da análise FTIR.



Fonte: Autora (2024).

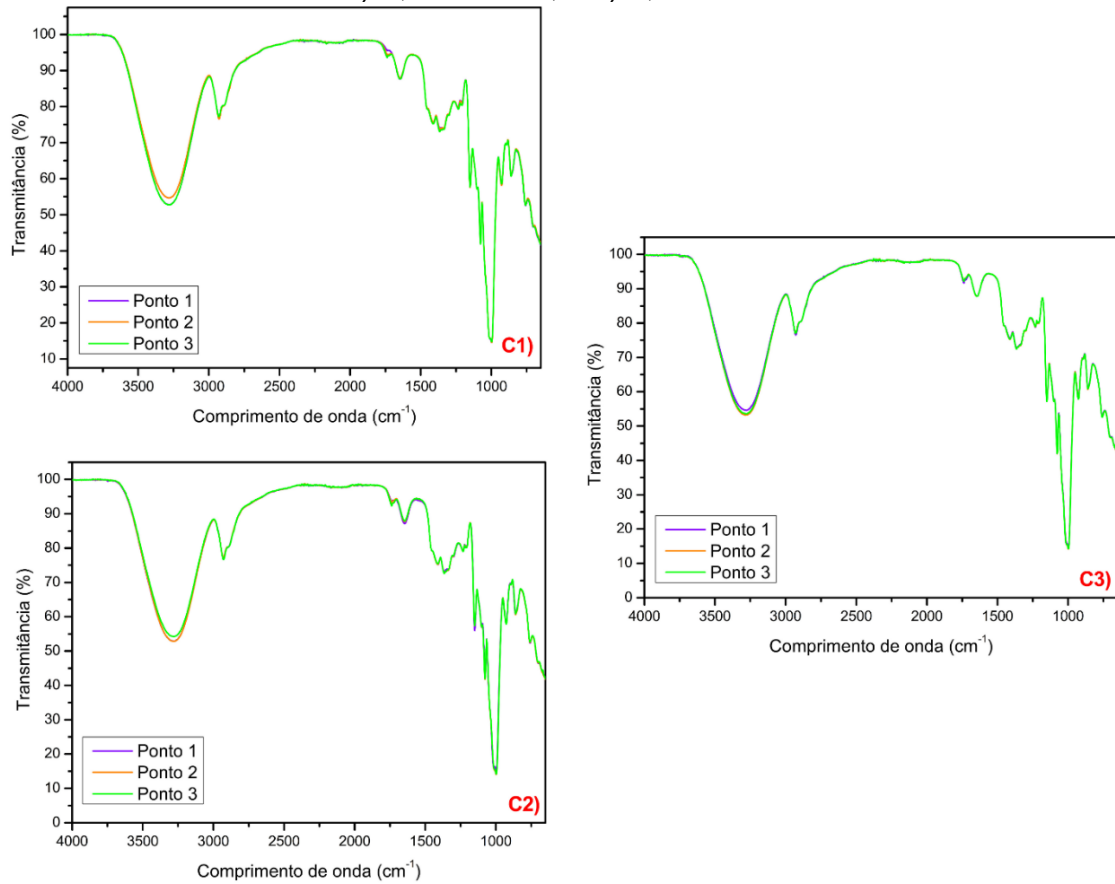
Já na Figura 31 – 3, pode-se observar de forma sutil a presença dos compostos minoritários do óleo essencial de capim-limão, como linalol, citronelol, nerol, geraniol e ácido gerânico, nos filmes incorporados com OECL. Esses compostos são identificados pela absorção na faixa de 1400 a 1240  $\text{cm}^{-1}$ , correspondendo às vibrações das ligações -CH de grupos metílicos ( $-\text{CH}_3$ ) e metilênicos ( $-\text{CH}_2-$ ), além de vibrações de estiramento C-O associadas a álcoois ou ésteres, que são frequentes em compostos terpenoides (Antonioli, 2019).

A fim de verificar a homogeneidade dos filmes de amido incorporados com óleo essencial, foram analisados três pontos aleatórios de cada amostra para examinar a distribuição dos componentes químicos, com foco especial na avaliação da distribuição do óleo essencial de capim-limão. A Figura 32 apresenta os espectros para cada filme contendo óleo essencial, permitindo uma comparação direta entre as diferentes áreas do filme, dessa forma, verificando a uniformidade da incorporação do óleo essencial.

A partir da Figura 32, observa-se que há uma boa homogeneidade nos três tipos de filmes. Isso assegura que o óleo essencial está distribuído de forma uniforme em toda a matriz do filme, o que é fundamental para garantir a consistência nas propriedades esperadas. A falta de homogeneidade pode comprometer a

reprodutibilidade dos resultados em experimentos ou aplicações industriais, afetando, assim, a confiabilidade e a eficácia dos filmes (Miguel, 2023).

Figura 32 – FTIR para verificar a homogeneidade do OE nos filmes: C1) 1,6% OECL; C2) 3,2% OECL; C3) 6,3% OECL.

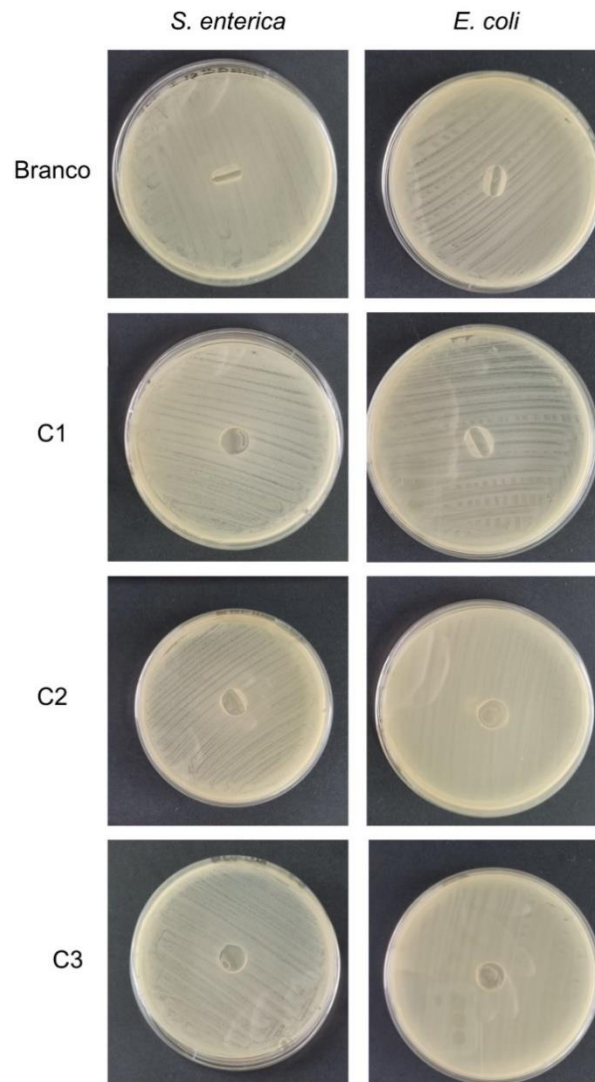


Fonte: Autora (2024).

#### 4.9 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

Os resultados das análises indicaram que nenhuma das formulações apresentou capacidade de inibir o crescimento das bactérias testadas. Como mostrado na Figura 33, não foi observado halo de inibição ao redor dos filmes em nenhuma das amostras analisadas. No entanto, durante a realização das análises microbiológicas, foram encontradas algumas dificuldades para manter os filmes adequadamente posicionados na solução de ágar. Em alguns casos, os filmes acabaram se curvando, o que pode ter influenciado nos resultados obtidos.

Figura 33 – Análise microbiológica dos filmes para as bactérias *Salmonella enterica* e *Escherichia coli*.



Fonte: Autora (2024).

Vários estudos investigaram a incorporação de óleos essenciais em filmes à base de amido para potenciais aplicações antimicrobianas em embalagens de alimentos. No entanto, nem todas as tentativas resultaram em propriedades antibacterianas bem-sucedidas.

Araújo (2014) descobriu que filmes de amido com extrato de própolis não apresentaram atividade antimicrobiana contra *S. aureus* e *E. coli*. Resultados semelhantes foram observados por Sousa et al. (2023b), que desenvolveram filmes de amido de trigo incorporados com óleo essencial de eucalipto. Nesse estudo, não houve inibição das bactérias *S. aureus* e *E. coli*, o que os autores atribuíram à concentração de óleo essencial utilizada (1,5%), considerada insuficiente para inibir esses microrganismos.

Por outro lado, estudos comprovam a atividade antimicrobiana do óleo essencial de capim-limão contra diversos microrganismos (Adukwu et al., 2016; Silva et al., 2020b; Farias et al., 2019). Porém, essas investigações utilizaram diferentes metodologias, predominantemente baseadas em métodos que aplicam o óleo essencial diretamente na solução do filme, após a gelatinização do amido e adição dos plastificantes.

Neste trabalho, o óleo essencial de capim-limão está incorporado ao filme através do cisalhamento junto ao amido. Com isso, uma possível explicação é que parte do óleo essencial ficou fortemente retido na matriz polimérica, o que impediu sua migração para a superfície do filme e, conseqüentemente, o contato necessário com as bactérias, resultando na ausência de inibição antimicrobiana.

## 5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi possível avaliar a influência da incorporação de diferentes concentrações de óleo essencial de capim-limão nas propriedades térmicas, químicas, físicas e antibacterianas de filmes de amido de milho. Os resultados obtidos confirmaram que a adição do óleo essencial trouxe modificações significativas nas características dos filmes, atingindo parte dos objetivos propostos de maneira eficaz.

✓ Realizou-se uma pesquisa literária a fim de encontrar óleos essenciais pouco estudados com potencial significativo na aplicação de filmes de amido, entre eles o OEM e o OECL. Através dos resultados dos estudos, o OECL demonstrava possuir melhor estabilidade térmica e menores valores de CIM e CBM, sendo este o escolhido para aplicação nos filmes de amido de milho.

✓ A fim de caracterizar os óleos essenciais abordados no referencial bibliográfico, realizou-se a determinação da CIM e CBM de ambos os óleos. Dessa forma, foi possível validar a escolha prévia do OECL pois ele foi eficaz contra todas as bactérias testadas, ao passo que o OEM não apresentou eficácia em relação à bactéria gram-positiva *Staphylococcus aureus*. Através dos resultados desta caracterização, estabeleceu-se as concentrações de OECL a serem utilizadas nos filmes, calculadas com base na massa seca do amido: 1,6%, 3,2% e 6,3%.

✓ Com todas as matérias-primas definidas, foi desenvolvida uma metodologia para a incorporação do OECL em diferentes teores nos filmes de amido. Essa metodologia consistiu em submeter o amido e o óleo essencial de capim-limão em um processo de cisalhamento por meio de um moedor, visando romper as cadeias de amilopectina e amilose, de modo a melhorar a incorporação e a distribuição do óleo essencial nos grânulos de amido.

✓ A espessura dos filmes variou de 0,290 a 0,310 mm, sem diferença significativa entre as formulações. Todos filmes apresentaram superfície homogênea, boa transparência e ausência de partículas insolúveis. Nos filmes incorporados com OECL, observou-se um leve amarelamento proporcional ao aumento da concentração de óleo essencial.

✓ Os testes de absorção de água e solubilidade indicaram que, com o aumento da concentração de OECL, houve redução da absorção de água e da solubilidade, atribuída ao caráter hidrofóbico do óleo.

✓ No teste de degradação em meio ácido, alcalino e salino nenhuma das formulações foram resistentes ao meio alcalino. No entanto, para os meios ácido e salino, os filmes se mostraram resistentes e aqueles contendo OECL exibiram menor perda de massa final.

✓ A análise termogravimétrica revelou que o filme com 6,3% de OECL apresentou menores temperaturas de degradação até 10% de perda de massa das amostras. Além disso, foi observado que a massa residual dos filmes que continham o óleo foi maior.

✓ A partir da FTIR foi possível notar a boa homogeneidade dos filmes e a incorporação do OECL em todas as formulações que o continham.

✓ E, por fim, a análise microbiológica demonstrou que nenhuma das formulações apresentou capacidade de inibir o crescimento das bactérias testadas. Provavelmente, devido à falta de liberação do óleo na matriz de amido.

Em suma, os resultados deste trabalho evidenciam que a incorporação do OECL em filmes de amido de milho promoveu alterações significativas nas propriedades térmicas, químicas e físicas dos filmes. No entanto, os resultados microbiológicos não indicaram atividade antibacteriana. Ainda assim, o estudo destaca o potencial promissor desses filmes para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis e funcionalizados, com aplicações na indústria de embalagens. Os resultados obtidos abrem novas perspectivas para pesquisas futuras sobre o uso de biopolímeros e óleos essenciais em uma variedade de aplicações.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo apresentou resultados significativos na análise de filmes de amido de milho incorporados com óleo essencial de capim-limão, mas algumas limitações e oportunidades para melhorias foram identificadas:

✓ Para aprofundar a exploração do potencial do óleo essencial de capim-limão em diferentes concentrações, recomenda-se a investigação de teores mais elevados, visando avaliar o impacto sobre as propriedades dos filmes.

✓ Embora a metodologia atual possibilite uma boa incorporação do óleo essencial na matriz do amido, ela não favorece a migração do óleo para a superfície dos filmes. Assim, estudos futuros devem considerar a avaliação de metodologias alternativas para a incorporação do óleo essencial, visando melhorar sua eficácia antibacteriana.

✓ Ademais, propõe-se a realização de análises complementares não abordadas neste trabalho, como a avaliação da permeabilidade dos filmes para uma caracterização detalhada das propriedades de barreira, além da aplicação de técnicas de microscopia, como a microscopia eletrônica de varredura (MEV), para uma análise aprofundada da superfície dos filmes.

## REFERÊNCIAS

- ADAME, M. Y.; SHI, C.; LI, C.; AZIZ, T.; ALHARBI, M.; CUI, H.; LIN, L. Fabrication and characterization of pullulan/tapioca starch-based antibacterial films incorporated with *Litsea cubeba* essential oil for meat preservation. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 268, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131775>.
- ADUKWU, E. C.; BOWLES, M.; JONES, V. E.; BONE, H. Antimicrobial activity, cytotoxicity and chemical analysis of lemongrass essential oil (*Cymbopogon flexuosus*) and pure citral. **Appl Microbiol Biotechnol**, [s. l.], v. 100, p. 9619-9627, 2016. DOI <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7807-y>.
- AIEMSAARD, J.; AIUMLAMAI, S.; AROMDEE, C.; TAWEECHAI SUPAPONG, S.; KHUNKITTI, W. The effect of lemongrass oil and its major components on clinical isolate mastitis pathogens and their mechanisms of action on *Staphylococcus aureus* DMST 4745. **Research in Veterinary Science**, [s. l.], v. 91, ed. 3, 2011. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2011.01.012>.
- AL-GHANAYEM, A. A. Phytochemical analysis of *Cymbopogon flexuosus* (lemongrass) oil, its antifungal activity, and role in inhibiting biofilm formation in *Candida albicans* MTCC854. **Journal of King Saud University – Science**, [s. l.], v. 34, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102072>.
- AL-HASHIMI, A. G.; AMMAR, A. B.; CACCIOLA, F.; LAKHSSASSI, N. Development of a Millet Starch Edible Film Containing Clove Essential Oil. **Foods**, [s. l.], v. 9, ed. 184, 2020. DOI <https://doi.org/10.3390/foods9020184>.
- ALAGAWANY, M.; EL-SAADONY, M. T.; ELNESR, S. S.; FARAHAT, M.; ATTIA, G.; MADKOUR, M.; REDA, F. M. Use of lemongrass essential oil as a feed additive in quail's nutrition: its effect on growth, carcass, blood biochemistry, antioxidant and immunological indices, digestive enzymes and intestinal microbiota. **Poultry Science**, [s. l.], v. 100, ed. 6, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101172>.
- ALCÁZAR-ALAY, S. C.; MEIRELES, M. A. A. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. **Food, Science and Technology**, [s. l.], v. 35, ed. 2, 2015. DOI <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6749>.
- ALMEIDA, P. P. DE; ALMEIDA, J. C. DE; GHERARDI, S. R. M. Potencial antimicrobiano de óleos essenciais: Uma revisão de literatura de 2005 a 2018. **Nutri-Time**, [s. l.], v. 17, ed. 1, p. 8623–8633, 2020.
- AMASSMOUD, O.; ABBAD, I.; IRITI, M.; HASSANI, L.; MEZRIOUI, N.; ABBAD, A. Antibacterial Activity of Essential Oils Combinations based on *Thymus broussonnetii*, and Their Synergism with some Antibiotics. **Current Microbiology**, [s. l.], v. 80, ed. 12, 2022. DOI <https://doi.org/10.1007%2Fs00284-023-03510-x>.
- ANGANE, M.; SWIFT, S.; HUANG, K.; BUTTS, C. A.; QUEK, S. Y. Essential Oils and Their Major Components: An Updated Review on Antimicrobial Activities, Mechanism

of Action and Their Potential Application in the Food Industry. **MDPI**, [s. l.], v. 11, ed. 464, 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/foods11030464>.

ANNIE'S Heirloom Seeds. East Indian Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.anniesheirloomseeds.com/east-indian-lemongrass-cymbopogon-flexuosus-tender-perennial/>. Acesso em: 14 abr. 2024.

ANTARA, N. S.; PARAMITA, D. A. K.; DUWIPAYANA, A. A.; GUNAM, I. B. W. Inhibitory activity of lemongrass essential oil against *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Vibrio cholera*. **Seminar Nasional Patpi**, [s. l.], 2013.

ANTONIOLI, G. **Desenvolvimento de nanocápsulas de poli(ácido láctico) contendo óleo essencial de capim-limão e avaliação contra fungos fitopatogênicos**. 2019. Tese (Pós-graduação em Biotecnologia) - UCS, [S. l.], 2019.

AQUINO, A. B. de; BLANK, A. F.; SANTANA, L. C. L. de A. Impact of edible chitosan–cassava starch coatings enriched with *Lippia gracilis* Schauer genotype mixtures on the shelf life of guavas (*Psidium guajava* L.) during storage at room temperature. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 171, p. 108-116, 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.077>.

ARAÚJO, G. K. P. Desenvolvimento de filmes biodegradáveis de amido incorporados com extrato de própolis. 2014. 43 p. (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação do Curso Superior de Tecnologia de Alimentos). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Campo Mourão, 2014.

ARDJOUR, N; CHIBANI, N; SHANKAR, S; SALMIERI, S; DJIDJELLI, H; LACROIX, M. Incorporation of *Thymus vulgaris* essential oil and ethanolic extract of propolis improved the antibacterial, barrier and mechanical properties of corn starch-based films. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 224, p. 578-583, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.146>.

AREZOO, E.; MOHAMMADREZA, E.; MARYAM, M.; ABDORREZA, M. N. The synergistic effects of cinnamon essential oil and nano TiO on 2 antimicrobial and functional properties of sago starch films. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 157, p. 743-751, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.244>.

ASTM - American Society for Testing and Materials, **ASTM E104-02 (2012) Prática padrão para manter a umidade relativa constante por meio de soluções aquosas**. In: Annual Book of ASTM Standarts, 2012.

BAI, J.; LI, J.; CHEN, Z.; BAI, X.; YANG, Z.; WANG, Z.; YANG, Y. Antibacterial activity and mechanism of clove essential oil against foodborne pathogens. **LWT**, [s. l.], 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114249>.

BAKER, D. H. A.; AMAROWICZ, R.; KANDEIL, A.; ALI, M. A. Antiviral activity of *Lavandula angustifolia* L. and *Salvia officinalis* L. essential oils against avian influenza H5N1 virus. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s. l.], v. 4, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100135>.

BALTI, M. A.; HADRIKH, B.; KRIAA, K.; KECHAOU, N. Lab-scale extraction of essential oils from Tunisian lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). **Chemical Engineering & Processing: Process Intensification**, [s. l.], v. 124, p. 163-173, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.12.012>.

BASIAK, E.; LENART, A.; DEBEAUFORT, F. How Glycerol and Water Contents Affect the Structural and Functional Properties of Starch-Based Edible Films. **MDPI**, [s. l.], v. 10, ed. 412, 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.3390/polym10>.

BASSOLÉ, I. H. N; JULIANI, H. R. **Essential Oils in Combination and Their Antimicrobial Properties**. **Molecules**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 3989-4006, 2012. MDPI AG. DOI <https://doi.org/10.3390/molecules17043989>.

BEHERA, L.; MOHANTA, M.; THIRUGNANAM, A. Intensification of yam-starch based biodegradable bioplastic film with bentonite for food packaging application. **Environmental Technology & Innovation**, [s. l.], v. 25, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102180>.

BERTI, S.; JAGUS, R. J.; FLORES, S. K.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C. Antimicrobial Edible Starch Films Obtained By Casting and Thermo-compression Techniques. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 17, p. 904-916, 2024. DOI <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03172-4>.

BERTOFT, E. Understanding Starch Structure: Recent Progress. **Agronomy**, [s. l.], v. 7, ed. 3, 2017. DOI <https://doi.org/10.3390/agronomy7030056>.

BHATNAGAR, A. Chemical composition and antioxidant activity of essential oil of *Cymbopogon flexuosus*. **Journal of Applied and Natural Science**, [s. l.], v. 12, ed. 1, p. 25-29, 2020. DOI <https://doi.org/10.31018/jans.v12i1.2207>.

BHATT, L.; KALE, R. D. Lemongrass (*Cymbopogon Flexuosus*) treated textile: A control measure against vector-borne diseases. **Heliyon**, [s. l.], v. 5, ed. 12, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02842>.

BOBBIO, P. A.; BOBBIO, F. O. Química do Processamento de Alimentos. 3. ed. São Paulo: Varela Editora e Livraria Ltda, p. 143, 2001.

BRANDELERO, R. P. H.; ALMEIDA, F. M. de; ALFARO, A. Microestrutura e propriedades de filmes de amido-álcool polivinílico-alginato adicionados de óleos essenciais de copaíba e capim-limão. **Química Nova**, [s. l.], v. 38, ed. 7, 2015. DOI <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150098>.

BRUN, P.; BERNABÈ, G.; FILIPPINI, R.; PIOVAN, A. In Vitro Antimicrobial Activities of Commercially Available Tea Tree (*Melaleuca Alternifolia*) Essential Oils. **Curr. Microbiol.** [s. l.], v. 76, p. 108-116, 2019. DOI <https://doi.org/10.1007/s00284-018-1594-x>.

CAETANO, K. dos S.; LOPES, N. A.; COSTA, T. M. H.; BRANDELLI, A.; RODRIGUES, E.; FLÔRES, S. H.; CLADERA-OLIVEIRA, F. Characterization of active biodegradable films based on cassava starch and natural compounds. **Food**

**Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 16, p. 138-147, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.03.006>.

CALO, J. R.; CRANDALL, P. G.; O'BRYAN, C. A.; RICKE, S. C. Essential oils as antimicrobials in food systems – A review. **Food Control**, [s. l.], v. 54, p. 111-119, 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.12.040>.

CANEVAROLO, JR. S. V. *Ciência dos Polímeros*, 3ªed. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

CAO, T. L.; SONG, K. B. Effects of gum karaya addition on the characteristics of loquat seed starch films containing oregano essential oil. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 97, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105198>.

CARSON, C. F.; HAMMER, K. A.; RILEY, T. V. *Melaleuca alternifolia* (Tea Tree) Oil: a Review of Antimicrobial and Other Medicinal Properties. **Clinical Microbiology Reviews**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 50-62, 2006. DOI <https://doi.org/10.1128/cmr.19.1.50-62.2006>.

CARVALHO, R. J. De; SOUZA, G. T. De; HONÓRIO, V. G.; SOUZA, J. P. De; CONCEIÇÃO, M. L. Da; MAGANANI, M.; SOUZA, E. L. De. Comparative inhibitory effects of *Thymus vulgaris* L. essential oil against *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* and mesophilic starter co-culture in cheese-mimicking models. **Food Microbiology**, [s. l.], v. 52, p. 59-65, 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2015.07.003>.

CASTRO, D. M.; AHMAR, S.; SHABBIR, R.; POBLETE, F. M. Antiviral Activities of Eucalyptus Essential Oils: Their Effectiveness as Therapeutic Targets against Human Viruses. **MDPI**, [s. l.], v. 14, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/ph14121210>.

CASTRO, L. M. G.; ALEXANDRE, E. M. C.; SARAIVA, J. A.; PINTADO, M. Impact of high pressure on starch properties: A review. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 106, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105877>.

CASTRO, M. V. B. S. **Desenvolvimento de filme ativo biodegradável de amido de araruta incorporado com óleo essencial de canela**. 2020. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, [S. l.], 2020.

CHEN, H. H.; XU, S. Y.; WANG, Z. Gelation properties of flaxseed gum. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 77, p. 295-303, 2006. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.033>.

CHEN, J.; CHEN, F.; MENG, Y.; WANG, S.; LONG, Z. Oxidized microcrystalline cellulose improve thermoplastic starch-based composite films: Thermal, mechanical and water-solubility properties. **Polymer**, [s. l.], v. 168, p. 228-235, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.02.026>.

CHENCHEN, C; MA, R; DUAN, M; DENG, Y; LIU, T; LU, D. Effect of starch film containing thyme essential oil microcapsules on physicochemical activity of mango. **LWT**, [s. l.], v. 131, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109700>.

CHOUHAN, S.; SHARMA, K.; GULERIA, S. Antimicrobial Activity of Some Essential Oils—Present Status and Future Perspectives. **MDPI**, [s. l.], v. 4, ed. 58, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.3390/medicines4030058>.

CRUZ-TIRADO, J. P.; FERREIRA, R.S.B.; LIZÁRRAGA, E.; TAPIA-BLÁCIDO, D. R.; SILVA, N. C. C.; ANGELATS-SILVA, L.; SICHE, R. Bioactive Andean sweet potato starch-based foam incorporated with oregano or thyme essential oil. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 23, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100457>.

DEBIAGI, F.; KOBAYASHI, R.K.T.; NAKAZATO, G.; PANAGIO, L. A.; MALI, S. Biodegradable active packaging based on cassava bagasse, polyvinyl alcohol and essential oils. **Industrial Crops And Products**, [s. l.], v. 52, p. 664-670, 2014. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.032>.

DHIFI, W.; BELLILI, S.; JAZI, S.; BAHLOUL, N.; MNIF, W. Essential Oils' Chemical Characterization and Investigation of Some Biological Activities: A Critical Review. **MDPI**, [s. l.], 2016. DOI <https://doi.org/10.3390/medicines3040025>.

DINIZ, C. S. **Modificação química de amido termoplástico por extrusão reativa**. 2021. Dissertação de Mestrado – Belo Horizonte, MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, [s. l.], 2021.

DUARTE, C. R. **Desenvolvimento de filmes ativos à base de amido de araruta (*maranta arundinaceae* L.) E extrato pectinoso aditivados com óleo essencial de alecrim (*rosmarinus officinalis*)**. 2020. Dissertação (Pós-graduação em Ciência de Materiais) - UFPE, [S. l.], 2020.

ENIDIOK, E. S.; ENIDIOK, S. E.; ANAKOR, D. O.; ERIFETA, G. O.; THANIKAIVELAN, P.; OLUBA, O. M. Development and characterization of chia oil-activated ginger starch-feather keratin biocomposite for prolonged post-harvest preservation of tomato fruits. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications** , [s. l.], v. 7, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100464>.

EVANGELHO, J. A. do; DANNENBERG, G. da S.; BIDUSKI, B.; HALAL, S. L. M. el; KRINGEL, D. H.; GULARTE, M. A.; FIORENTINI, A. M.; ZAVAREZE, E. da R. Antibacterial activity, optical, mechanical, and barrier properties of corn starch films containing orange essential oil. **Carbohydrate Polymers** , [s. l.], v. 222, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.114981>.

FAKHOURI, F. M.; FONTES, L. C. B.; GONÇALVES, P. V. de M.; MILANEZ, C. R.; STEEL, C. J.; COLLARES-QUEIROZ, F. P. Films and edible coatings based on native starches and gelatin in the conservation and sensory acceptance of Crimson grapes. **Food Science and Technology**, [s. l.], v. 27, ed. 2, 2007. DOI <https://doi.org/10.1590/S0101-20612007000200027>.

FAN, S.; YIN, X.; LIU, X.; WANG, G.; QIU, W. Enhancing bread preservation through

non-contact application of starch-based composite film infused with clove essential oil nanoemulsion. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 263, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130297>.

FARIAS, M. G. **Elaboração e caracterização de filmes de amido e polpa de acerola por casting, extrusão termoplástica e termoprensagem**. 2016. Tese (Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - UFRRJ, [S. l.], 2016.

FARIAS, P. K. S.; SILVA, J. C. R. L.; SOUZA, C. N. de; FONSECA, F. S. A. da; BRANDI, I. V.; MARTINS, E. R.; AZEVEDO, A. M.; ALMEIDA, A. C. de. Antioxidant activity of essential oils from condiment plants and their effect on lactic cultures and pathogenic bacteria. **Microbiology**, [s. l.], v. 49, ed. 2, 2019. DOI <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180140>.

FERREIRA, M. S. L. Functional capacity of flour obtained from residues of fruit and vegetables. **International Food Research Journal**, [s. l.], v. 21, ed. 4, p. 1675-1681, 2014.

FILIFE, A. C. J.; SILVA, M.V. F. da; SOARES, B. E. A. S.; RAMOS, G. K. R.; MARQUES, E. G. F.; SANTOS, A. A. dos; ALBUQUERQUE, J. M.; SILVA, J. de S.; ARGOLLO, L. D.; SILVA, C. de S. Aplicação de óleo essencial na conservação natural de mangas: uma revisão. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 11, ed. 17, 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i17.38856>.

FOUAD, H. A.; CÂMARA, C. A. G. da; MORAES, M. M. de; TAVARES, W. de S.; LEGASPI, J. C.; ZANUNCIO, J. C. Insecticidal and Repellent Activities of Four Essential Oils Against *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Dose-Response: An International Journal**, [s. l.], v. 21, ed. 4, 2023. DOI <https://doi.org/10.1177%2F15593258231210263>.

FURLAN, G. R.; SILVESTRE, W. P.; BALDASSO, C. Pectin-based films with thyme essential oil: production, characterization, antimicrobial activity, and biodegradability. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [s. l.], v. 33, ed. 3, 2023. DOI <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20230053>.

GAO, S.; LIU, G.; LI, J.; CHEN, J.; LI, L.; LI, Z.; ZHANG, X.; ZHANG, S.; THORNE, R. F.; ZHANG, S. Antimicrobial Activity of Lemongrass Essential Oil (*Cymbopogon flexuosus*) and Its Active Component Citral Against Dual-Species Biofilms of *Staphylococcus aureus* and *Candida* Species. **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology**, [s. l.], v. 10, 2020. DOI <https://doi.org/10.3389/fcimb.2020.603858>.

GAO, W.; ZHU, J.; KANG, X.; WANG, B.; LIU, P.; CUI, B.; EL-ATY, A. M. A. Development and characterization of starch films prepared by extrusion blowing: The synergistic plasticizing effect of water and glycerol. **LWT**, [s. l.], v. 148, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111820>.

GHASEMLOU, M.; ALIHEIDARI, N.; FAHMI, R.; SHOJAEE-ALIABADI, S.; KESHAVARZ, B.; CRAN, M. J.; KHAKSAR, R. Physical, mechanical and barrier properties of corn starch films incorporated with plant essential oils. **Institute for Sustainability and Innovation**, [s. l.], 2013.

GOMES-CATURLA, J.; IVORRA-MARTINEZ, J.; FENOLLAR, O.; BALART, R.; GARCIA-GARCIA, D.; DOMINICI, F.; PUGLIA, D.; TORRE, L. Development of starch-rich thermoplastic polymers based on mango kernel flour and different plasticizers. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 264, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130773>.

GONÇALVES, E. M.; SILVA, M.; ANDRADE, L.; PINHEIRO, J. From Fields to Films: Exploring Starch from Agriculture Raw Materials for Biopolymers in Sustainable Food Packaging. **Agriculture**, [s. l.], v. 14, ed. 453, 2024. DOI <https://doi.org/10.3390/agriculture14030453>.

GONZÁLEZ-TORRES, B.; ROBLES-GARCÍA, M. A.; GUTIÉRREZ-LOMELÍ, M.; PADILLA-FRAUSTO, J. J.; NAVARRO-VILLARRUEL, C. L.; DEL-TORO-SÁNCHEZ, C. L.; RODRÍGUEZ-FÉLIX, F.; BARRERA-RODRÍGUEZ, A.; REYNA-VILLELA, M. Z.; AVILA-NOVOA, M. G.; REYNOSO-MARÍN, F. J. Combination of Sorbitol and Glycerol, as Plasticizers, and Oxidized Starch Improves the Physicochemical Characteristics of Films for Food Preservation. **Polymers**, [s. l.], v. 13, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/polym13193356>.

GUINESI, L. S.; RÓZ, A. L. da; CORRADINI, E.; MATTOSO, L. H. C. Kinetics of thermal degradation applied to starches from different botanical origins by non-isothermal procedures. **Thermochimica Acta**, [s. l.], v. 447, ed. 2, p. 190-196, 2006. DOI <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.06.002>.

GUPTA, P.; DHAWAN, S. S.; LAL, R. K. Adaptability and stability based differentiation and selection in aromatic grasses (*Cymbopogon species*) germplasm. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 78, p. 1-8, 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.018>.

GUTIÉRREZ-DEL-RÍO, I.; FERNÁNDEZ, J.; LOMBÓ, F. Plant nutraceuticals as antimicrobial agents in food preservation: terpenoids, polyphenols and thiols. **International Journal of Antimicrobial Agents**, [s. l.], v. 52, p. 309-315, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2018.04.024>.

HAINES, R. R.; PUTSATHIT, P.; TAI, A. S.; HAMMER, K. A. Antimicrobial Effects of *Melaleuca Alternifolia* (Tea Tree) Essential Oil against Biofilm-Forming Multidrug-Resistant Cystic Fibrosis-Associated *Pseudomonas Aeruginosa* as a Single Agent and in Combination with Commonly Nebulized Antibiotics. **Microbiol.** [s. l.], v. 75, p. 578-587, 2022. DOI <https://doi.org/10.1111/lam.13589>.

HAN, X.; PARKER, T. L. Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) essential oil demonstrated anti-inflammatory effect in pre-inflamed human dermal fibroblasts. **Biochimie Open**, [s. l.], v. 4, p. 107-111, 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biopen.2017.03.004>.

HAQUE, A. N. Md A.; REMADEVI, R.; NAEBE, M. Lemongrass (*Cymbopogon*): a review on its structure, properties, applications and recent developments. **Review Paper**, [s. l.], v. 25, p. 5455-5477, 2018. DOI <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1965-2>.

HAZROL, M. D.; SAPUAN, S. M.; ZAINUDIN, E. S.; ZUHRI, M. Y. M.; WAHAB, N. I. A. Corn Starch (*Zea mays*) Biopolymer Plastic Reaction in Combination with Sorbitol and Glycerol. **MDPI**, [s. l.], v. 13, ed. 2, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/polym13020242>.

HOSSEN, M. A.; SHIMUL, I. M.; SAMEEN, D. E.; RASHEED, Z.; DAI, J.; LI, S.; QIN, W.; TANG, W.; CHEN, M.; LIU, Y. Essential oil-loaded biopolymeric particles on food industry and packaging: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 265, 2024. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.focha.2023.100312>.

HU, G.; CHEN, J.; GAO, J. Preparation and characteristics of oxidized potato starch films. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 76, ed. 2, p. 291-298, 2009. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.10.032>.

HUNTRAKUL, K.; YOKSAN, R.; SANE, A.; HARNKARNSUJARIT, N. Effects of pea protein on properties of cassava starch edible films produced by blown-film extrusion for oil packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 24, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100480>.

HYLDGAARD, M.; MYGIND, T.; MEYER, R. L. Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 3, n. 12, 2012. DOI <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00012>.

IACOVELLI, F.; ROMEO, A.; LATTANZIO, P.; AMMENDOLA, S.; BATTISTONI, A.; LA FRAZIA, S.; VINDIGNI, G.; UNIDA, V.; BIOCCA, S.; GAZIANO, R.; DIVIZIA, M.; FALCONI, M. Deciphering the Broad Antimicrobial Activity of *Melaleuca alternifolia* Tea Tree Oil by Combining Experimental and Computational Investigations. **MDPI**, [s. l.], v. 24, 2023. DOI <https://doi.org/10.3390/ijms241512432>.

International Organization for Standardization. Aromatic natural raw materials - Vocabulary. ISO 9235:2021. 2021.

International Organization for Standardization. Essential oil of Melaleuca, terpinen-4-ol type (Tea Tree oil). ISO 4730:2017. 2017.

International Organization for Standardization. Oil of Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). ISO 4718:2004. 2004.

ISOTTON, F. S. Desenvolvimento e caracterização de filmes de amido de milho eterificado com plastificante glicerol, sorbitol e poli (álcool vinílico). 2013. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos e Tecnologias, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

JUMAIDIN, R.; KHIRUDDIN, M. A. A.; SAIDI, Z. A. S.; SALIT, M. S.; ILYAS, R. A. Effect of cogon grass fibre on the thermal, mechanical and biodegradation properties of thermoplastic cassava starch biocomposite. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 146, p. 746-755, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.011>.

KANG, J. H.; SONG, K. B. Inhibitory effect of plant essential oil nanoemulsions against *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7, and *Salmonella Typhimurium* on red mustard leaves. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 45, p. 447-454, 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.019>.

KETKAEW, S.; KASEMSIRI, P.; HIZIROGLU, S.; MONGKOLTHANARUK, W.; WANNASUTTA, R.; PONGSA, U.; CHINDAPRASIRT, P. Effect of Oregano Essential Oil Content on Properties of Green Biocomposites Based on Cassava Starch and Sugarcane Bagasse for Bioactive Packaging. **Journal of Polymers and the Environment**, [s. l.], v. 26, p. 311-318, 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-017-0957-x>.

KIYMACI, M. E.; SAVLUK, M.; GUMUSTAS, M.; UVEY, M.; UNAL, N. Antibacterial and antibiofilm activity of *Melaleuca alternifolia* (tea tree) essential oil against colistin resistant *Salmonella enterica* serotypes isolated from poultry environmental specimens. **Journal of Research in Pharmacy**, [s. l.], v. 27, ed. 2, p. 508-518, 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.29228/jrp.333>.

KONFO, T. R. C.; DJOUHOU, F. M. C.; KOUDORO, Y. A.; DAHOUENON-AHOUSSE, E.; AVLESSI, F.; SOHOUNHLOUE, C. K. D.; SIMAL-GANDARA, J. Essential oils as natural antioxidants for the control of food preservation. **Food Chemistry Advances**, [s. l.], v. 2, p. 100312, 2023. Elsevier BV. DOI <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100312>.

KUMAR, A.; JNANESHA, A. C.; VERMA, R. K.; KUMAR, D.; LAL, R. K. Phytoremediation, eco-restoration, and adaptive response of lemongrass (*C. flexuosus*) grown on fly ash and vermicompost improved quality essential oil yield. **Biochemical Systematics and Ecology**, [s. l.], v. 104, 2022a. DOI <https://doi.org/10.1016/j.bse.2022.104457>.

KUMAR, A.; JNANESHA, A. C.; KUMAR, V. M.; LAL, R. K. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data on essential oil yield in lemongrass [*Cymbopogon flexuosus* (nees ex. Steud) wats.] grown in semi-arid tropical regions of southern India under different agro-climatic conditions. **Biochemical Systematics and Ecology**, [s. l.], v. 103, 2022b. DOI <https://doi.org/10.1016/j.bse.2022.104439>.

KUMAR, R.; SINGH, N.; KHATKAR, B. S. Effects of A- and B-type starch granules on composition, structural, thermal, morphological, and pasting properties of starches from diverse wheat varieties. **Food Bioengineering**, [s. l.], v. 2, ed. 4, p. 373-383, 2023. DOI <https://doi.org/10.1002/fbe2.12068>.

KWIECINSKI, J.; EICK, S.; WÓJCIK, K. Effects of tea tree (*Melaleuca alternifolia*) oil on *Staphylococcus aureus* in biofilms and stationary growth phase. **International Journal of Antimicrobial Agents**, [s. l.], v. 33, p. 343-347, 2009.

LARREA-WACHTENDORFF, D.; NOBILE, G. D.; FERRARI, G. Effects of processing conditions and glycerol concentration on rheological and texture properties of starch-based hydrogels produced by high pressure processing (HPP). **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 159, p. 590-597, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.120>.

LEE, J. E.; SEO, S. M.; HUH, M. J.; LEE, S. C.; PARK, I. K. Reactive oxygen species mediated-antifungal activity of cinnamon bark (*Cinnamomum verum*) and lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oils and their constituents against two phytopathogenic fungi. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, [s. l.], v. 168, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104644>.

LEMOS, P. V. F.; BARBOSA, L. S.; RAMOS, I. G.; COELHO, R. E.; DRUZIAN, J. I. The important role of crystallinity and amylose ratio in thermal stability of starches. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], v. 131, p. 2555-2567, 2018. DOI <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6834-y>.

LI, C.; DHITAL, S.; GILBERT, R. G.; GIDLEY, M. J. High-amylose wheat starch: Structural basis for water absorption and pasting properties. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 245, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116557>.

LI, J.; YE, F.; LEI, L.; ZHAO, G. Combined effects of octenylsuccination and oregano essential oil on sweet potato starch films with an emphasis on water resistance. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 115, p. 547-553, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.093>.

LIM, H. L. What Makes Them Stay and Go?: Best Practices for Engaging Gen Y Female Professionals in the Critical Arabian Gulf Petroleum Industry. **Handbook of Research on Recent Developments in Materials Science and Corrosion Engineering Education**, [s. l.], 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-4666-8183-5.ch021>.

LIMA, A. M. F.; ANDREANI, L.; SOLDI, V.; BORSALI, R. Influência da adição de plastificante do processo de reticulação na morfologia, absorção de água e propriedades mecânicas de filmes de alginato de sódio. **Química Nova**, [s. l.], v. 30, ed. 4, p. 832-837, 2007. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-2D40422007000400014>.

LIU, H.; XIE, F.; YU, L.; CHEN, L.; LI, L. Thermal processing of starch-based polymers. **Progress in Polymer Science**, [s. l.], v. 34, ed. 12, p. 1348-1368, 2009. DOI <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.07.001>.

LIU, T.; WANG, J.; GONG, X.; WU, X.; LIU, L.; CHI, F. Rosemary and Tea Tree Essential Oils Exert Antibiofilm Activities In Vitro against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. **Journal of Food Protection**, [s. l.], v. 83, n. 7, p. 1261-1267, 2020. DOI <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-19-337>.

LIU, Z.; ZHAO, Y.; ZHENG, J.; WANG, Z.; YAN, X.; ZHANG, T. Influence of enzymatic extraction on the properties of corn starch. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 58, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103775>.

LUCHESE, C. L. **Desenvolvimento de embalagens biodegradáveis a partir de amido contendo subprodutos provenientes do processamento de alimentos**. 2018. Tese (Pós-graduação em Engenharia Química) - UFRGS, [S. l.], 2018.

LUMDUBWONG, N. Applications of Starch-Based Films in Food Packaging. **Reference Module in Food Science**, [s. l.], 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22481-5>.

LUNA, B. F. G. da S. de; CAETANO, V. F.; ANDRADE, M. F. de; SILVA, I. D. de L.; ARAÚJO, T. L. de; SOUZA, K. C. de; ALMEIDA, Y. M. B. de; VINHAS, G. M. Effect of thyme essential oil on the properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [s. l.], v. 34, ed. 1, 2024. DOI <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20230009>.

MADHUMITHA, G.; FOWSIYA, J.; ROOPAN, S. M.; THAKUR, V. K. Recent advances in starch–clay nanocomposites. **International Journal of Polymer Analysis and Characterization**, [s. l.], v. 23, ed. 4, 2018. DOI <https://doi.org/10.1080/1023666X.2018.1447260>.

MALAFATTI, J. O. D; RUELLAS, T. M. de O; SCHILDT, L. F. L; DOMINGUES, M. Á; MARINHO, B. S; MEIRELLES, M. R; PARIS, E. C. Propriedades mecânicas de filmes de amido termoplástico na presença de ureia. **A Geração de Novos Conhecimentos na Química**, v. 2, p. 237–249, 2021.

MALI, S., GROSSMANN, M. V. E., GARCÍA, M. A., MARTINO, M. M.; ZARITZKY, N. E. Barrier, mechanical and optical properties of plasticized yam starch films. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v.56, p.129-135, 2004.

MALIK, S. (ed.). Essential Oils Composition and Why Plants Produce Them. *In: ESSENTIAL Oil Research: Trends in Biosynthesis, Analytics, Industrial Applications and Biotechnological Production*. [s. l.]: Springer, 2019. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-030-16546-8>.

MANGALAGIRI, N. P.; PANDITI, S. K.; JEEVIGUNTA, N. L. L. Antimicrobial activity of essential plant oils and their major components. **Heliyon**, [s. l.], v. 7, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06835>.

MANZANELLI, F. A.; RAVETTI, S.; BRIGNONE, S. G.; GARRO, A. G.; MARTÍNEZ, S. R.; VALLEJO, M. G.; PALMA, S. D. Enhancing the Functional Properties of Tea Tree Oil: In Vitro Antimicrobial Activity and Microencapsulation Strategy. **MDPI**, [s. l.], v. 15, 2023. DOI <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15102489>.

MARCHESE, A.; ARCIOLA, C. R.; BARBIERI, R.; SILVA, A. S.; NABAVI, S. F.; SOKENG, A. J. T.; IZADI, M.; JAFARI, N. J.; SUNTAR, I.; DAGLIA, M.; NABAVI, S. M. Update on Monoterpenes as Antimicrobial Agents: A Particular Focus on p-Cymene. **MDPI**, [s. l.], v. 10, ed. 947, 2017. DOI <https://doi.org/10.3390%2Fma10080947>.

MARTINS, G. A.; BICAS, J. L. Antifungal activity of essential oils of tea tree, oregano, thyme, and cinnamon, and their components. **Brazilian Journal of Food and Technology**, [s. l.], v. 27, 2024. DOI <https://doi.org/10.1590/1981-6723.07123>.

MARTINS, P. C; BAGATINI, D. C; MARTINS, V. G. Oregano essential oil addition in rice starch films and its effects on the chilled fish storage. **Journal of Food Science**

**and Technology**, [s. l.], v. 58, p. 1562-1573, 2021. DOI <https://doi.org/10.1007%2Fs13197-020-04668-z>.

MAZZARRINO, G.; PAPARELLA, A.; LÓPEZ, C. C.; FABERI, A.; SERGI, M.; SIGISMONDI, C.; COMPAGNONE, D.; SERIO, A. *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* inactivation dynamics after treatment with selected essential oils. **Food Control**, [s. l.], v. 50, p. 794-803, 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.10.029>.

MELO, P.E.F. *Elaboração de Filmes Ativos a Partir de Compostos de Amêndoa de Manga*. Master 's Thesis, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil, 2018. <http://repositório.ufc.br/handle/riufc/38837>.

MENDES, J. F.; NORCINO, L. B.; MARTINS, H. H. A.; MANRICH, A.; OTONI, C. G.; CARVALHO, E. E. N.; PICCOLI, R. H.; OLIVEIRA, J. E.; PINHEIRO, A. C. M.; MATTOSO, L. H. C. Correlating emulsion characteristics with the properties of active starch films loaded with lemongrass essential oil. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 100, p. 105428, 2020. Elsevier BV. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105428>.

MIAO, M.; JIANG, H.; JIANG, B.; CUI, S. W.; JIN, Z.; ZHANG, T. Structure and functional properties of starches from Chinese ginkgo (*Ginkgo biloba* L.) nuts. **Food Research International**, [s. l.], v. 49, ed. 1, p. 303-310, 2012. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.038>.

MIGUEL, T. B. V. **Desenvolvimento de filmes biodegradáveis a partir do amido da semente de jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) com a incorporação de resíduo de acerola (*Malpighia ermaginata*)**. 2023. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Química) - UFRN, [S. l.], 2023.

MONTERO, B.; RICO, M.; RODRÍGUEZ-LLAMAZARES, S.; BARRAL, L.; BOUZA, R. Effect of nanocellulose as a filler on biodegradable thermoplastic starch films from tuber, cereal and legume. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 157, p. 1094-1104, 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.073>.

MORAES, J. O. de; SCHEIBE, A. S.; SERENO, A.; LOURINDO, J. B. Scale-up of the production of cassava starch based films using tape-casting. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 119, ed. 4, p. 800-808, 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.009>.

MUKARRAM, M.; CHOUDHARY, S.; KHAN, M. A.; POLTRONIERI, P.; KHAN, M. M. A.; ALI, J.; KURJAK, D.; SHAHID, M. Lemongrass Essential Oil Components with Antimicrobial and Anticancer Activities. **MDPI**, [s. l.], v. 11, ed. 1, 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/antiox11010020>.

MWITHIGA, G.; MAINA, S.; MUTURI, P.; GITARI, J. Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) growth rate, essential oil yield and composition as influenced by different soil conditioners under two watering regimes. **Heliyon**, [s. l.], v. 10, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25540>.

MWITHIGA, G.; MAINA, S.; MUTURI, P.; GITARI, J. Lemongrass (*Cymbopogon*

*flexuosus*) agronomic traits, oil yield and oil quality under different agro-ecological zones. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s. l.], v. 10, 2022.

NETO, J. N. C.; SORBO, J. M.; FILHO, C. A. A.; SABINO, T. F. M.; RIBEIRO, D. A.; BRUNETTI, I. L.; ANDRADE, de C. R. Negative terpinen-4-ol modulate potentially malignant and malignant lingual lesions induced by 4-nitroquinoline-1-oxide in rat model. **Naunyn-Schmiedeberg's Arch Pharmacol**. [s. l.], v. 395, p.1387–1403, 2022. DOI <https://doi.org/10.1007/s00210-022-02275-7>.

NGUYEN, L.; DEVICO, B.; MANNAN, M.; CHANG, M.; SANTACRUZ, C. R.; SIRAGUSA, C.; EVERHART, S.; FAZEN, C. H. Tea Tree Essential Oil Kills *Escherichia coli* and *Staphylococcus epidermidis* Persists. **MDPI**, [s. l.], v. 13, ed. 9, 2023. DOI <https://doi.org/10.3390/biom13091404>.

OJOGBO, E.; OGUNSONA, E. O.; MEKONNEN, T. H. Chemical and physical modifications of starch for renewable polymeric materials. **Materials Today Sustainability**, [s. l.], v. 7, ed. 8, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100028>.

OLIVEIRA, L. A. de; HANSEN, B.; BORSOI, C.; CATTO, A. L. Avaliação das propriedades físicas, térmicas e mecânicas de filmes poliméricos de amido de milho reforçados com nanocristais de celulose. **Tecnologias Sustentáveis**, [s. l.], ed. 1, p. 11-24, 2023.

OLIVEIRA, L. M., ALVES, R. M. V., SARANTÓPOULOS, C. I. G. L., PADULA, M., GARCIA, E. E. C., COLTRO, L. Ensaio para avaliação de embalagens plásticas flexíveis. *Campinas*: ITAL, CETEA, 1996.

ORELMA, H.; TANAKA, A.; RAUTKOSKI, H.; NURMINEN, I.; KOUKO, J.; KOPONEN, A. Use of mechanically ground lignocellulosic native fines (LF) in the all-cellulosic composite filaments: fines properties and plasticizers. **Cellulose**, [s. l.], v. 26, 2019. DOI <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2091-x>.

PADILHA, A. C. **Produção de embalagem biodegradável a base de amido de mandioca e gelatina para aplicação em produtos alimentícios**. Francisco Beltrão: [s. l.], 2019.

PATTERSON, J. E.; MCELMEEL, L.; WIEDERHOLD, N. P. In Vitro Activity of Essential Oils Against Gram- Positive and Gram-Negative Clinical Isolates, Including Carbapenem-Resistant *Enterobacteriaceae*. **IDSA**, [s. l.], 2019. DOI <https://doi.org/10.1093/ofid/ofz502>.

PENG, Y.; YIN, L.; LI, Y. Combined effects of lemon essential oil and surfactants on physical and structural properties of chitosan films. **International Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 48, p. 44-50, 2013. DOI [10.1111/j.1365-2621.2012.03155.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03155.x).

PERDANA, M. I; RUAMCHAROEN, J; PANPHON, S; LEELAKRIANGSAK, M. Antimicrobial activity and physical properties of starch/chitosan film incorporated with

lemongrass essential oil and its application. **Lwt**, [s. l.], v. 141, p. 110934, 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110934>.

PERDONES, A.; CHIRALT, A.; VARGAS, M. Properties of film-forming dispersions and films based on chitosan containing basil or thyme essential oil. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 57, p. 271-279, 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.006>.

PEREZ, L. A. B.; AGAMA-ACEVEDO, E. Chapter 1 - Starch. **Starch-Based Materials in Food Packaging: Processing, Characterization and Applications**, [s. l.], p. 1-18, 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809439-6.00001-7>.

PINHELLI, E. M.; SILVA, G. A. Da; RAMOS, G. B.; SERAFIM, J. V.; OLIVEIRA, N. R. De. **Produção de filmes biodegradáveis a base de amido e farinha de banana verde adicionados de óleo essencial de capim-limão**. 2019. Trabalho Final do Projeto de Iniciação Científica Integrada (PIC-QUIMI) (Técnico em Química) - Instituto Federal Catarinense – Campus Araquari, [s. l.], 2019.

PIRES, C.; RAMOS, C.; TEIXEIRA, G.; BATISTA, I.; MENDES, R.; NUNES, L.; MARQUES, A. Characterization of biodegradable films prepared with hake proteins and thyme oil. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 105, ed. 3, p. 422-428, 2011. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.02.036>.

PIROUZIFARD, M; YORGHANLU, R. A; PIRSA, S. Production of active film based on potato starch containing Zedo gum and essential oil of *Salvia officinalis* and study of physical, mechanical, and antioxidant properties. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, [s. l.], v. 33, ed. 7, 2019. DOI <https://doi.org/10.1177/0892705718815541>.

PUVAČA, N.; MILENKOVIC, J.; COGHILL, T. G.; BURSIC, V.; PETROVIC, A.; TANASKOVIC, S.; PELIC, M.; PELIC, D. L.; MILJKOVIC, T. Antimicrobial Activity of Selected Essential Oils against Selected Pathogenic Bacteria: In Vitro Study. **MDPI**, [s. l.], v. 10, n. 546, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/antibiotics10050546>.

QUEIROZ, V. M. **Desenvolvimento de filmes biopoliméricos à base de amido de milho reforçados com *theobroma cacao***. 2022. Tese (Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia) - UFRJ, [S. l.], 2022.

RAHMAN, S. M. A.; NABI, Md. N.; VAN, T. C.; SUARA, K.; JAFARI, M.; DOWELL, A.; ISLAM, Md. A.; MARCHESE, A. J.; TRYNER, J.; HOSSAIN, Md. F.; RAINEY, T. J.; RISTOVSKI, Z. D.; BROWN, R. J. Performance and Combustion Characteristics Analysis of Multi-Cylinder CI Engine Using Essential Oil Blends. **Energies**, [s. l.], v. 11, ed. 4, 2018. DOI <https://doi.org/10.3390/en11040738>.

RANADE, S. S.; THIAGARAJAN, P. Lemon Grass. **International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research**, [s. l.], v. 35, ed. 2, p. 162-167, 2015.

RANUM, P.; PEÑA-ROSAS, J. P.; GARCIA-CASAL, M. N. Global maize production, utilization, and consumption. **Annals of the New York Academy of Sciences**, [s. l.], v. 1312, ed. 1, p. 105-112, 2014. DOI <https://doi.org/10.1111/nyas.12396>.

RASHED, A. A.; RATHI, D. G.; NASIR, N. A. H. A.; RAHMAN, A. Z. A. Antifungal Properties of Essential Oils and Their Compounds for Application in Skin Fungal Infections: Conventional and Nonconventional Approaches. **MDPI**, [s. l.], v. 26, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/molecules26041093>.

RDC – Resolução da Diretoria Colegiada. **RDC 711/2022. Regulação de alimentos: consolidação de atos normativos**. ANVISA, 2022.

REPORTLINKER, Global Starch Industry, ReportLinker, 2020. [https://www.reportlinker.com/p05485911/Global-Starch-Industry.html?utm\\_source=GNW%3E](https://www.reportlinker.com/p05485911/Global-Starch-Industry.html?utm_source=GNW%3E).

ROBYT, J. F. Starch: Structure, Properties, Chemistry, and Enzymology. **Glycoscience**, [s. l.], p. 1437-1472, 2008. DOI [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30429-6\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30429-6_35).

SADGROVE, N. J.; PADILLA-GONZÁLEZ, G. F.; PHUMTHUM, M. Fundamental Chemistry of Essential Oils and Volatile Organic Compounds, Methods of Analysis and Authentication. **MDPI**, [s. l.], v. 11, ed. 789, 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/plants11060789>.

SAFARI Garden. Muda de *Melaleuca Alternifolia*. [s. l.], 2024. Disponível em: [https://safarigarden.commercesuite.com.br/muda-de-melaleuca-leucadendron?variant\\_id=1067](https://safarigarden.commercesuite.com.br/muda-de-melaleuca-leucadendron?variant_id=1067). Acesso em: 11 abr. 2024.

SAKKAS, H.; ECONOMOU, V.; GOUSIA, P.; BOZIDIS, P.; SAKKAS, V. A.; PETSIOS, S.; MPEKOULIS, G.; ILIA, A.; PAPADOPOULOU, C. Antibacterial Efficacy of Commercially Available Essential Oils Tested Against Drug-Resistant Gram-Positive Pathogens. **MDPI**, [s. l.], v. 8, 2018. DOI <https://doi.org/10.3390/app8112201>.

SANHAWONG, W.; BANHALEE, P.; BOONSANG, S.; KAEWPIROM, S. Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton-fiber-reinforced cassava starch biofoam. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 108, p. 756-766, 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.046>.

SANTANA, L. L. de; JOSE, N. M.; RIGOLI, I. C. Preparação e caracterização de biofilmes de proteína de soja plastificados com sorbitol e glicerol. **Polímeros Naturais: aplicações em alimentos, produtos fármacos e na agricultura**, [s. l.], v. 1, 2022.

SANTOS, L. S.; BONOMO, R. C. F.; FONTAM, R. C. I.; BONOMO, P.; LEITE, C. X. dos. S; SANTOS, D. O. dos. Efeito dos métodos de extração na composição, rendimento e propriedades da pasta do amido obtido da semente de jaca. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, [s. l.], v. 15, ed. 3, p. 225-261, 2013. DOI <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v15n3p255-261>.

SANTOS, R. R.; ANDRADE, M.; SILVA, A. S.; MELO, N. R. de. Essential Oils for Food

Application: Natural Substances with Established Biological Activities. **Food Bioprocess Technol**, [s. l.], v. 11, p. 43-71, 2018. DOI <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1948-6>.

SHAH, G.; SHRI, R.; PANCHAL, V.; SHARMA, N.; SINGH, B.; MANN, A. S. Scientific basis for the therapeutic use of *Cymbopogon citratus*, Stapf (Lemon grass). **Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research**, [s. l.], v. 2, ed. 1, 2011.

SHARMA, S.; HABIB, S.; SAHU, D.; GUPTA, J. Chemical Properties and Therapeutic Potential of Citral, a Monoterpene Isolated from Lemongrass. **Medicinal Chemistry**, [s. l.], v. 17, ed. 1, p. 2-12, 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.2174/1573406416666191227111106>.

SHI, R.; ZHANG, Z.; LIU, Q.; HAN, Y.; ZHANG, L.; CHEN, D.; TIAN, W. Characterization of citric acid/glycerol co-plasticized thermoplastic starch prepared by melt blending. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 69, ed. 4, p. 748-755, 2007. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.02.010>.

SHIMAZU, A. A.; MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E. Efeitos plastificante e antiplastificante do glicerol e do sorbitol em filmes biodegradáveis de amido de mandioca. **Ciência de Alimentos**, [s. l.], v. 28, p. 79-88, 2007.

SILVA, B. C. J. De; JUNG, W. G.; HOSSAIN, S.; WIMALASENA, S. H. M. P.; PATHIRANA, H. N. K. S.; HEO, G. J. Antimicrobial property of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) oil against pathogenic bacteria isolated from pet turtles. **National Library of Medicine**, [s. l.], v. 33, ed. 2, p. 84-91, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.5625/lar.2017.33.2.84>.

SILVA, C. G.; YUDICE, E.D.C.; CAMPINI, P.A.L.; ROSA, D.s.. The performance evaluation of Eugenol and Linalool microencapsulated by PLA on their activities against pathogenic bacteria. **Materials Today Chemistry**, [s. l.], v. 21, 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100493>.

SILVA, C. S. **Aplicação dos óleos essenciais de melaleuca alternifolia (tea tree) e citrus aurantifolia (limão) no controle microbiano de carne in natura**. (Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Pará, [s. l.], 2019.

SILVA, E. M. Da. **Produção e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de pinhão**. 2011. Trabalho de Diplomação em Engenharia Química (Graduação em Engenharia Química) - UFRGS, [s. l.], 2011.

SILVA, J. K. R. da; FIGUEIREDO, P. L. B.; BYLER, K. G.; SETZER, W. N. Essential Oils as Antiviral Agents, Potential of Essential Oils to Treat SARS-CoV-2 Infection: An In-Silico Investigation. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 21, 2020a. DOI <http://dx.doi.org/10.3390/ijms21103426>.

SILVA, N. B. da; RANGEL, M. de L.; CASTRO, R. D. de; LIMA, J. M. de; CASTELLANO, L. R. C.; VALENÇA, A. M. G.; CAVALCANTI, A. L. Anti-Biofilm and Hemolytic Effects of *Cymbopogon citratus* (Dc) Stapf Essential Oil. **APESB**, [s. l.], v.

19, 2020b. DOI <http://doi.org/10.4034/PBOCI.2019.191.103>.

SILVA, T. L. M. da; ROSA, G. I. da; SANTOS, M. A. L dos; GRAF, S. L.; MAIA, B. H. L de N. S.; BELTRAME, F. L.; FERRARI, P. C. Lemongrass Essential Oil (*Cymbopogon citratus*) Seasonal Evaluation and Microencapsulation by Spray-Drying. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 66, 2023. DOI <https://doi.org/10.1590/1678-4324-ssbfar-2023230016>.

SILVAL, A. C. Da; IACUZIO, R.; CÂNDIDO, T. J. S.; RODRIGUES, M. X.; SILVAL, N. C. C. Resistência antimicrobiana de *Salmonella spp.*, *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli* isolados de carcaças de frangos: resistência a antibióticos e óleos essenciais. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, [s. l.], v. 8, ed. 1, p. 95-103, 2018.

SILVEIRA, M. P.; SILVA, H. C.; PIMENTEL, I. C.; POITEVIN, C. G.; STUART, A. K. da C.; CARPINÉ, D.; JORGE, L. M. de M.; JORGE, R. M. M. Development of active cassava starch cellulose nanofiber-based films incorporated with natural antimicrobial tea tree essential oil. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 137, 2019. DOI <https://doi.org/10.1002/app.48726>.

SILVEIRA, S. M. da; JÚNIOR, A. C.; SCHEUERMANN, G. N.; SECCHI, F. L.; VIEIRA, C. R. W. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oils from selected herbs cultivated in the South of Brazil against food spoilage and foodborne pathogens. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 42, ed. 7, p. 1300-1306, 2012.

SINGH, B. R.; SINGH, V.; SINGH, R. K.; EBIBENI, N. Antimicrobial activity of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) oil against microbes of environmental, clinical and food origin. **International Research of Pharmacy and Pharmacology**, [s. l.], v. 1, ed. 9, p. 228-236, 2011.

SONG, X.; ZUO, G.; CHEN, F. Effect of essential oil and surfactant on the physical and antimicrobial properties of corn and wheat starch films. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], n. 107, p. 1302-1309, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.114>.

SOUSA, D. P. de; DAMASCENO, R. O. S.; AMORATI, R.; ELSHABRAWY, H. A.; CASTRO, R. D. de; BEZERRA, D. P.; NUNES, V. R. V.; GOMES, R. C.; LIMA, T. C. Essential Oils: Chemistry and Pharmacological Activities. **MDPI**, [s. l.], v. 13, ed. 1144, 2023a. DOI <https://doi.org/10.3390/biom13071144>.

SOUSA, T. C. A.; ROSAS, A. L. G.; GONÇALVES, G. C. P.; MASSAUT, Y. V. B.; GANDRA, E. A.; MEINHART, A. D. XXV ENPÓS, 2023, Pelotas. Filme de amido de trigo incorporado com óleo essencial de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) e seu efeito sobre *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. **XXV Enpós**. [s. l.], 2023b.

SOUZA, D. S.; ROCHA, V. C. F.; PEREIRA, M. A.; COSTA, M. L. X.; AQUINO, A. A. de. Aplicação de revestimento comestível adicionado de óleo essencial de manjeriço na qualidade e conservação de requeijão. **Cadernos Macambira**, [s. l.], v. 8, ed. 4, 2023. DOI <https://doi.org/10.59033/cm.v8i4.1082>.

SRIVASTAVA, V; SINGH, S; DAS, D. Development and characterization of peppermint essential oil/rice husk fibre/ corn starch active biocomposite film and its performance on bread preservation. **Industrial Crops & Products**, [s. l.], ed. 208, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117765>.

SU, X; LI, B; CHEN, S; WANG, X; SONG, H; SHEN, B; ZHENG, Q; YANG, M; YUE, P. Pore engineering of micro/mesoporous nanomaterials for encapsulation, controlled release and variegated applications of essential oils. **Journal of Controlled Release**, [s. l.], v. 367, p. 107-134, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2024.01.005>.

SULLCA, C. V.; VARGAS, M.; ATARÉS, L.; CHIRALT, A. Thermoplastic cassava starch-chitosan bilayer films containing essential oils. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 75, p. 107-115, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.008>.

SUN, H.; LI, S.; CHEN, S.; WANG, C.; LIU, D.; LI, X. Antibacterial and antioxidant activities of sodium starch octenylsuccinate-based Pickering emulsion films incorporated with cinnamon essential oil. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 159, p. 696-703, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.118>.

ŠUPUT, D.; LAZIĆ, V.; PEZO, L.; MARKOV, S.; VAŠTAG, Z.; POPOVIĆ, L.; RADULOVIĆ, A.; OSTOJIĆ, S.; ZLATANOVIĆ, S.; POPOVIĆ, S. Characterization of Starch Edible Films with Different Essential Oils Addition. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, [s. l.], v. 66, n. 4, p. 277-285, 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.1515/pjfn-2016-0008>.

SYAFIQ, R.; SAPUAN, S. M.; ZUHRI, M.R.M. Antimicrobial activity, physical, mechanical and barrier properties of sugar palm based nanocellulose/starch biocomposite films incorporated with cinnamon essential oil. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 11, p. 144-157, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.091>.

TERÁN, J. L. L.; MALDONADO, E. V. C.; RANGEL, J. C. A.; OTAZO, J. P.; RICO, M. I. B. Development of Antibacterial Thermoplastic Starch with Natural Oils and Extracts: Structural, Mechanical and Thermal Properties. **MDPI**, [s. l.], v. 16, ed. 180, 2024. DOI <https://doi.org/10.3390/polym16020180>.

THIELMANN, J.; MURANYI, P.; KAZMAN, P. Screening essential oils for their antimicrobial activities against the foodborne pathogenic bacteria *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. **Heliyon**, [s. l.], v. 5, ed. 6, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01860>.

TIAN, Y. LEI, Q. YANG, F. XIE, J. CHEN, C. Development of cinnamon essential oil-loaded PBAT/thermoplastic starch active packaging films with different release behavior and antimicrobial activity. **International Journal of Biological Macromolecules**, Shanghai, v. 263, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130048>.

TORRES, B. G.; GARCÍA, M. A. R.; LOMELÍ, M. G.; FRAUSTO, J. J. P.; VILLARRUEL, C. L. N.; SÁNCHEZ, C. L. D. T.; FÉLIX, F. R.; RODRÍGUEZ, A. B.; VILLELA, M. Z. R.;

NOVOA, M. G. A.; MARÍN, F. J. R. Combination of Sorbitol and Glycerol, as Plasticizers, and Oxidized Starch Improves the Physicochemical Characteristics of Films for Food Preservation. **MDPI**, [s. l.], v. 13, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/polym13193356>.

VALERIANO, C.; PICCOLI, R. H.; CARDOSO, M. G.; ALVES, E. Atividade antimicrobiana de óleos essenciais em bactérias patogênicas de origem alimentar. **Rev. Bras. Pl. Med**, [s. l.], v. 14, ed. 1, p. 57-67, 2012.

VARGHESE, S. A.; SIENGCHIN, S.; PARAMESWARANPILLAI, J. Essential oils as antimicrobial agents in biopolymer-based food packaging - A comprehensive review. **Food Bioscience**, [s. l.], 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100785>.

VETCHAPITAK, T.; RANA, M. S.; SASAKI, S.; TANIGUCHI, T.; SUGIYAMA, S.; SOEJIMA, J.; LUANGTONGKUM, T.; YAMAGUCHI, Y.; MISAWA, N. A new disinfectant technique for *Campylobacter jejuni* and spoilage bacteria on chicken skin using a high-pressure pulsed jet spray apparatus. **Food Control**, [s. l.], v. 125, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.107989>.

VIANNA, T. C.; MARINHO, C. O.; JÚNIOR, L. M.; INRAHIM, S. A.; VIEIRA, R. P. Essential oils as additives in active starch-based food packaging films: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 182, p. 1803-1819, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.170>.

VILPOUX, O. F.; BRITO, V. H.; CEREDA, M. P. Chapter 4 - Starch Extracted From Corms, Roots, Rhizomes, and Tubers for Food Application. **Starches for Food Application**, [s. l.], p. 103-165, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809440-2.00004-6>.

WAN, J.; ZHONG, S.; SCHWARZ, P.; CHEN, B.; RAO, J. Physical properties, antifungal and mycotoxin inhibitory activities of five essential oil nanoemulsions: Impact of oil compositions and processing parameters. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 291, p. 199-206, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.032>.

WANG, B; SUI, J; YU, B; YUAN, C; GUO, L; EL-ATY, A. M. A; CUI, B. Physicochemical properties and antibacterial activity of corn starch-based films incorporated with *Zanthoxylum bungeanum* essential oil. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 254, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117314>.

WANG, N.; YU, J.; CHANG, P. R.; MA, X. Influence of formamide and water on the properties of thermoplastic starch/poly(lactic acid) blends. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 71, ed. 1, p. 109-118, 2008. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.025>.

WILHELM, H. M.; SIERAKOWSKI, M. R.; SOUZA, G. P.; WYPYCH, F. Starch films reinforced with mineral clay. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 52, ed. 2, p. 101-110, 2003. DOI [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00239-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00239-4).

WRIGLEY, C.; CORKE, H.; SEETHARAMAN, K.; FAUBION, J. **Encyclopedia of Food Grains: The World of Food Grains**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 2016. v. 1.

YANG, J.; WANG, Z.; REN, J.; LIN, X.; ZHAO, J.; JIANG, X.; CHEN, Y. Molecular dynamics simulation and properties of thermoplastic starch -- effect of water content on starch plasticization. **Polymer**, [s. l.], v. 290, 2024b. DOI <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126571>.

YANG, Y.; ISMAN, M. B.; TAK, J. Insecticidal Activity of 28 Essential Oils and a Commercial Product Containing Cinnamomum cassia Bark Essential Oil against *Sitophilus zeamais* Motschulsky. **MDPI**, [s. l.], v. 11, ed. 474, 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.3390/insects11080474>.

YANG, Z.; CHEN, B.; TAHIR, H. E.; LI, Z.; HUANG, X.; LI, M.; ZHANG, K.; LI, B.; ZHAI, X.; SHI, J.; ZOU, X.; XIAO, J. Gelatin/sodium alginate-based biodegradable films functionalized by persimmon pectin/ovalbumin-stabilized neem essential oil Pickering emulsion: Application for cherry tomato preservation. **Progress in Organic Coatings**, [s. l.], v. 192, 2024a. DOI <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108448>.

YONG, H.; WANG, X.; SUN, J.; FANG, Y.; LIU, J.; JIN, C. Comparison of the structural characterization and physicochemical properties of starches from seven purple sweet potato varieties cultivated in China. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 120, p. 1632-1638, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.182>.

YU, X.; CHEN, L.; JIN, Z.; JIAO, A. Research progress of starch-based biodegradable materials: a review. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 56, p. 11187-11208, 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-021-06063-1>.

YUE, Q.; SHAO, X.; WEI, Y.; JIANG, S.; XU, F.; WANG, H.; GAO, H. Postharvest biology and technology optimized preparation of tea tree oil complexation and their antifungal activity against *Botrytis cinerea*. **Postharvest Biology and Technology**, [s. l.], v. 162, 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111114>.

ZHANG, R.; MA, S.; LI, L.; ZHANG, M.; TIAN, S.; WANG, D.; LIU, K.; LIU, H.; ZHU, W.; WANG, X. Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review. **Grain & Oil Science and Technology**, [s. l.], v. 4, p. 89-107, 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.gaost.2021.08.003>.

ZHOU, Y.; WU, X.; CHEN, J.; HE, J. Effects of cinnamon essential oil on the physical, mechanical, structural and thermal properties of cassava starch-based edible films. **International Journal of Biological Macromolecules**, China, v. 184, p. 574-583, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.067>.

ZHONG, Y.; LIU, L.; QU, J.; BLENNOW, A.; HANSEN, A. R.; WU, Y.; GUO, D.; LIU, X. Amylose content and specific fine structures affect lamellar structure and digestibility of maize starches. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 108, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105994>.

ZINOVIADOU, K. G.; KOUTSOUMANIS, K. P.; BILIADERIS, C. G. Physico-chemical properties of whey protein isolate films containing oregano oil and their antimicrobial action against spoilage flora of fresh beef. **Meat Science**, [s. l.], v. 82, ed. 3, p. 338-345, 2009. DOI <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.02.004>.

ZORTÉA, N. L.; SCHUSTER, M. B.; ZANFONATO, B. P.; PAGANI, T.; DINON, A. Z. Análise da degradação em água salina de biofilmes de amido de mandioca com nanopartículas de argila e resíduos da indústria vitivinícola. **UDESC**, [s. l.], 2024.