

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**DÉBORA SILVA FERREIRA MOREIRA**

**PRODUÇÃO DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS UTILIZANDO POLIOL DE ÓLEO  
DE PALMA**

**Bagé**

**2025**

**DÉBORA SILVA FERREIRA MOREIRA**

**PRODUÇÃO DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS UTILIZANDO POLIOL DE ÓLEO  
DE PALMA**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Curso de Engenharia de alimentos da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Valéria Terra Crexi

Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Catarina Motta de Moura

**Bagé**

**2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M838p Moreira, Débora Silva Ferreira  
Produção de filmes biopoliméricos a partir do óleo de palma  
/ Débora Silva Ferreira Moreira.  
63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 2025.  
"Orientação: Valéria Terra Crexi".

1. Poliols. 2. Poliuretano. 3. Filme biopolimérico. 4. Óleo  
de palma. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**DÉBORA SILVA FERREIRA MOREIRA**

**PRODUÇÃO DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS UTILIZANDO POLIOL DE ÓLEO DE PALMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 15 de julho de 2025.

Banca examinadora:

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Valéria Terra Crexi  
Orientadora  
(UNIPAMPA)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Catarina Motta de Moura  
Co-orientadora  
(UNIPAMPA)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Camila Ramão Contessa  
(UNIPAMPA)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Miriane Lucas Azevedo  
(UNIPAMPA)

---



Assinado eletronicamente por **MIRIANE LUCAS AZEVEDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2025, às 12:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **VALERIA TERRA CREXI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2025, às 13:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **CAMILA RAMAO CONTESSA, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 18/07/2025, às 13:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **CATARINA MOTTA DE MOURA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/07/2025, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1789499** e o código CRC **46DA5294**.

---

Referência: Processo nº 23100.012112/2025-47 SEI nº 1789499

Dedico este trabalho a dona Maria Anita  
Mendonça e Oliveira, minha avó.

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer em primeiro lugar a Deus, que me criou e me trouxe até aqui, sem Ele nada disso seria possível. Em segundo lugar gostaria de agradecer a minha família, que mesmo de longe, nunca deixou de acreditar em mim, mesmo em momentos em que eu não acreditava. Quero agradecer em especial aos meus pais, Geovania e Alfrenito, e ao meu irmão Daniel, que são a minha base, que me fizeram ser a pessoa que hoje sou, sou grata pelo amor, pelo carinho, pelos ensinamentos, pelas orações, sem vocês eu não conseguiria chegar até aqui. Apesar disso, quero agradecer em especial a minha mãe, que sempre me guiou, orou e acreditou em mim e nos meus sonhos, saiba, mãe, que se hoje eu sou uma pessoa melhor, foi a senhora que me fez assim, obrigada por sempre ter me amado. Ao meu pai que apesar da sua maneira peculiar de demonstrar carinho, nunca me desamparou, sou muito grata por sua vida, pai. A outra parte da família, meus tios, em especial, meu tio Jucelino e a minha tia Suelene, expresso aqui a minha gratidão por todo o apoio e investimento dedicado a mim em todo esse tempo.

Quero agradecer aos meus amigos, Rayssa, Beatriz, Gabriele, Amanda, Melissa, Josué, Caio, Manrik, Ana Clara, Lauro e aos demais que em algum momento passaram pelo meu caminho nessa trajetória e que tornaram essa fase da minha vida mais leve. Aos meus colegas também deixo o meu agradecimento, em especial a Adrieli, que esteve comigo em muitos momentos difíceis nessa parte experimental, ouvindo sermões e as vezes elogios, sem você, Adri, eu também não conseguiria chegar ao fim desse trajeto.

Apesar da menção anterior, gostaria de destacar as minhas amigas Rayssa, Beatriz e Gabriele, que estiverem comigo desde o início do curso (presencialmente falando), me receberam, passaram por momentos bons e momentos bem ruins, mas nunca saíram do meu lado, nunca deixaram de me apoiar e torcer por mim, talvez futuramente nossos caminhos se desencontrem, mas carrego o amor e as lembranças de cada uma comigo, no meu coração.

Quero destacar também a minha amiga Mel, que chegou depois, mas foi muito importante para mim em muitos momentos, compartilhamos bons momentos, vitórias, lágrimas e desabafos, sou muito grata por sua vida, amiga. Sou muito grata também pela sua forma de demonstrar carinho, pelo seu cuidado e atenção para comigo.

Outro destaque nesses agradecimentos vai para o meu amigo Josué e Yuna (sua gatinha), foi uma honra dividir o 503 com você, meu amigo. Você é um ser humano inspirador, sou muito grata a Deus por ter te colocado no meu caminho, aprendi e continuo aprendendo muito com você, morar em um lugar sem você nunca será a mesma coisa.

Gostaria de agradecer também as minhas orientadoras, Valéria e Catarina, que não desistiram de mim, apesar de alguns puxões de orelha, e muitas vezes até palavras duras, sei que estavam tentando extrair o melhor de mim, para que no futuro eu possa ser uma excelente engenheira e pesquisadora.

Esse agradecimento também vai para a professora Ana Paula, que sempre me ouviu, me compreendeu, me ouviu falar das minhas dificuldades, me viu chorar, e sempre me ofereceu palavras doces e gentis, palavras de carinho e compreensão, essas palavras, professora, fizeram a diferença para que eu não desistisse nessa reta final, muito obrigada.

Chegando quase no fim, quero agradecer a família Hirdes Bica, que me acolheu como família, quando eu mais precisava de uma. Obrigada pela companhia, pelo amor, pela atenção e cuidado dedicados a mim, foi muito importante ter vocês comigo.

Aos meus amigos e irmãos da minha igreja da Bahia, fica a minha sincera gratidão, pela torcida, oração e apoio de vocês, mesmo de muito de longe, sempre os carreguei no peito.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer também a minha vó, Maria Anita (*In memoriam*), que foi uma das minhas maiores incentivadoras, que sempre esteve comigo, em oração e em cuidado e zelo, sua partida no fim dessa trajetória foi algo marcante, em alguns momentos até desesperador, mas sigo na certeza de que te farei orgulhosa e serei a boa cristã, cidadã e profissional que a senhora sempre me inspirou a ser.

## RESUMO

A crescente geração de resíduos plásticos, que ultrapassa 350 milhões de toneladas por ano, tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis, como embalagens biodegradáveis. Entre essas alternativas, destacam-se os filmes biopoliméricos, desenvolvidos a partir de polímeros naturais. Um dos mais promissores é a quitosana, um polissacarídeo de origem natural, biodegradável, com a capacidade de formar películas estáveis e propriedades antimicrobianas, sendo amplamente utilizada em aplicações de interesse na área de alimentos e embalagens. Nesse cenário, destaca-se a produção de poliuretanos obtidos a partir de óleos vegetais, como o óleo de palma, visando melhorar as propriedades funcionais desses filmes e ampliar seu potencial de aplicação. A obtenção do polioliol foi realizada por meio da reação de epoxidação *in situ*, o poliuretano foi obtido por meio da reação do polioliol com isocianatos, e os filmes foram elaborados utilizando o método de *casting*, nas seguintes proporções 25% Q/75%PU; 25%Q/75%PU; 50%Q/50%PU e o filme controle (só quitosana). Além disso, realizou-se análises de caracterização do óleo, do polioliol e dos filmes biopoliméricos, sendo elas: para o óleo e o polioliol, índice de acidez, densidade, viscosidade e índice de hidroxila (somente para o polioliol); para os filmes, análises quanto às propriedades mecânicas, como permeabilidade ao vapor de água, solubilidade, espessura e índice de intumescimento. Para o óleo e o polioliol obteve-se respectivamente os valores de 0,918 e 0,920 g/cm<sup>3</sup> para densidade, 214,8 e 145,8 cP para viscosidade e 14,17 ± 1 e 10,88 ± 1 KOH/g para o índice de acidez. Para o índice de hidroxilas no polioliol obteve-se 219,16 ± 0,31. Os filmes controle e de 25%PU/75%Q apresentaram respectivamente espessura de 0,08 ± 0,003 e 0,06 ± 0,04 mm, PVA (g Pa s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>) de 7,04 x 10<sup>-11</sup> ± 1,01 e 8,83 x 10<sup>-11</sup> ± 0,0005, solubilidade em água de 29 ± 1% e 18 ± 0,09% e índice de intumescimento de 423,35 ± 0,03% e 102,39 ± 0,062%. Os testes referentes a propriedades mecânicas foram realizados somente no filme controle, em virtude das baixas temperaturas que possivelmente afetaram a aderência do filme de 25%PU, obtendo-se como resultado 75,52 ± 35% para ruptura e 152,2 ± 9 MPa para tração. Em relação as outras formulações não se obteve sucesso devido a uma combinação de fatores que podem envolver a temperatura durante a preparação e secagem que afetam aspectos físico-químicos do sistema, a predominância da quitosana e do PU e o material da superfície utilizada, não sendo possível a avaliação dos mesmos. Portanto, conclui-se que o polioliol obtido possui características desejáveis. A subsequente incorporação do poliuretano dele derivado em filmes de quitosana promove melhorias significativas nas propriedades destes, evidenciando um potencial de aplicação em embalagens

Palavras-chave: poliol; óleo de palma; poliuretano; sustentáveis.

## ABSTRACT

The growing generation of plastic waste, exceeding 350 million tons per year, has driven the search for sustainable alternatives like biodegradable packaging. Among these, biopolymeric films developed from natural polymers stand out. One of the most promising is chitosan, a natural, biodegradable polysaccharide capable of forming stable films with antimicrobial properties, widely used in food and packaging applications. In this scenario, the production of polyurethanes (PU) from vegetable oils, such as palm oil, is promising for improving the functional properties of these films and expanding their application potential. Polyol was obtained through an *in situ* epoxidation reaction, and polyurethane was synthesized by reacting the polyol with isocyanates. Films were then prepared using the casting method in the following proportions: 25% Chitosan (Q)/75% PU; 50% Q/50% PU; and a control film. We performed characterization analyses on the oil, polyol, and biopolymeric films. For the oil and polyol, we determined the acid value, density, and viscosity; the hydroxyl value was assessed only for the polyol. The obtained results were: density: 0.918 g/cm<sup>3</sup> (oil) and 0.920 g/cm<sup>3</sup> (polyol); viscosity: 214.8 cP (oil) and 145.8 cP (polyol); acid value: 14.17±1 KOH/g (oil) and 10.88±1 KOH/g (polyol); and hydroxyl value (polyol): 219.16±0.31. For the films, we analyzed mechanical properties, water vapor permeability (WVP), solubility, thickness, and swelling index. The control film and the 25% PU/75% Q film presented, respectively: thickness: 0.08±0.003 mm and 0.06±0.04 mm; WVP: 7.04×10<sup>-11</sup>±1.01 g Pa s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> and 8.83×10<sup>-11</sup>±0.0005 g Pa s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>; water solubility: 29±1% and 18±0.09%; and swelling index: 423.35±0.03% and 102.39±0.062%. Mechanical property tests were performed only on the control film. Low temperatures likely affected the adhesion of the 25% PU film, making its evaluation impossible. The control film showed 75.52±35% for elongation at break and 152.2±9 MPa for tensile strength. Unfortunately, other formulations could not be evaluated due to a combination of factors, including temperature during preparation and drying (affecting the system's physicochemical aspects), the predominance of chitosan and PU, and the material of the plate used. It is concluded that the obtained polyol possesses desirable characteristics. The subsequent incorporation of polyurethane derived from this polyol into chitosan films significantly improves their properties, such as reduced solubility and swelling index. This suggests a promising potential for application in packaging with enhanced moisture resistance.

**Keywords:** polyol; palm oil; polyurethane; sustainable.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Representação do polímero sintético baquelite.....	25
Figura 2 - Reação de formação do perácido .....	27
Figura 3- Esquema representativo de epoxidação <i>in situ</i> .....	28
Figura 4 - Estrutura química do poliuretano.....	29
Figura 5- Reação de formação do poliuretano.....	30
Figura 6 - Imagem ilustrativa da palma .....	31
Figura 7 - Estrutura do triglicerídeo com seus produtos de hidrólise de glicerol e ácidos graxos livres .....	32
Figura 8 - Polissacarídeos mais utilizados para produção de filmes biopoliméricos .....	35
Figura 9 - Estrutura química da quitosana .....	36
Figura 10 - Diagrama de blocos da metodologia da pesquisa .....	37
Figura 11 - Representação sistemática de obtenção do polioli.....	39
Figura 12 - Viscosímetro de Brookfield .....	40
Figura 13 - Representação esquemática da elaboração do filme de quitosana.....	41
Figura 14 - Representação esquemática da elaboração de filmes de quitosana/poliuretano ...	42
Figura 15 - Micrômetro digital .....	43
Figura 16 - Texturômetro.....	43
Figura 17 - A: Molde utilizado/ B: Filme controle nas medidas corretas .....	44
Figura 18 - Aspecto visual dos filmes - A: Filme de quitosana/ B: 25% PU e 75%Q/ C: 25% Q e 75%PU/ D: 50% Q e 50%Q.....	50
Figura 19- Filme 25% PU/ 75 % Q aderido a placa de petri.....	55

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Características físico-químicas do óleo de palma e do polioliol .....	46
Tabela 2- Resultados das análises.....	51

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Características físico-químicas do óleo de palma .....	33
---	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

PU- Poliuretano

AG – Ácidos graxos

HLB- Hidrofílico-lipofílico

MEV- Microscopia eletrônica de varredura

TGA- Análise Termogravimétrica

DSC- Calorimetria Exploratória Diferencial

## **LISTA DE SIGLAS**

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

MAPA – Ministério de Agricultura e Pecuária

ANOVA – Análise de variância

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das nações unidas

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
2 OBJETIVOS.....	24
2.1. Objetivo Geral .....	24
2.2 Objetivos Específicos .....	24
3 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA .....	25
3.1 Histórico e sustentabilidade dos plásticos .....	25
3.2 Polióis .....	26
3.3 Poliuretanos sustentáveis .....	29
3.4 Óleo de palma .....	31
3.5 Filmes biopoliméricos .....	34
3.6 Quitosana .....	35
4 METODOLOGIA.....	37
4.1 Matéria-prima .....	38
4.1.1 Reagentes.....	38
4.2 Métodos .....	38
4.2.1 Produção dos polióis .....	38
4.2.2 Caracterização do óleo e polióis .....	39
4.2.2.1 Índice de acidez .....	39
4.2.2.2 Densidade .....	40
4.2.2.3 Viscosidade.....	40
4.2.2.4 Índice de hidroxila .....	40
4.2.3 Produção dos filmes biopoliméricos.....	41
4.2.4 Caracterização dos filmes .....	42
4.2.4.1 Espessura .....	43
4.2.4.2 Propriedades mecânicas (RT e ER) .....	43
4.2.4.3 Permeabilidade ao vapor de água (PVA).....	44
4.2.4.5 Índice de intumescimento (%) .....	45
4.2.5 Análise estatística .....	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46

5.1. Caracterização do óleo de palma e do poliol .....	46
5.2 Filmes biopoliméricos .....	49
5.2.1 Aspecto visual.....	49
5.2.2 Caracterização dos filmes .....	51
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	55
7. TRABALHOS FUTUROS .....	56
REFERÊNCIAS .....	58



## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o estudo *Plastic pollution; Pathways to net* do banco Credit Suisse são produzidas cerca de 450 milhões de toneladas de plástico ao redor do mundo por ano, isso corresponde a aproximadamente 57 quilogramas de plástico por habitante, sem levar em consideração os resíduos gerados a partir desse material. Esses dados revelam uma grande problemática para a sustentabilidade e preservação ambiental, pois a má gestão de tais resíduos contribui de maneira significativa para a degradação dos ecossistemas (OECD, 2022). Para que esse problema seja enfrentado faz-se necessária a reavaliação dos processos industriais visando a mínima geração de resíduos, isso envolve a adoção de práticas sustentáveis, como por exemplo, o refinamento de processos e a conscientização sobre os impactos ambientais, na esfera governamental e na sociedade em geral (Lenardão, 2003).

Nesse contexto, essa problemática se insere diretamente nas diretrizes propostas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), que estabelecem metas globais para promover o desenvolvimento equilibrado e responsável ambientalmente. A questão da poluição plástica especificamente relaciona-se com o ODS 12 (Consumo de produção responsáveis), que incentiva práticas de produção mais limpas, redução do desperdício e uso eficiente dos recursos naturais e com o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ao considerar o impacto climático do ciclo de vida aos plásticos. Além disso, a promoção de soluções inovadoras e sustentáveis está alinhada como ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), especialmente no que se diz respeito ao desenvolvimento de materiais biodegradáveis, alternativas renováveis e tecnologias de baixo impacto ambiental (ONU, 2015).

Como alternativa ao uso de embalagens plásticas convencionais descobriu-se a reação de ligações uretânicas em 1849, envolvendo a interação entre um isocianato e um composto contendo hidroxila na sua composição (Serves, 2007). Os polióis são compostos orgânicos constituídos de um grupo hidroxila funcional ligado a um carbono saturado, os quais reagem com isocianatos e formam compostos uretano, como o poliuretano (PU). Em sua maioria, os polióis usados na produção de poliuretanos são derivados do petróleo, entretanto podem ser obtidos de fontes renováveis, como óleo vegetal e animal (Silva, 2014; Cangemi; Santos; Neto, 2009).

O Poliuretano (PU) é um composto amplamente utilizado devido a sua possibilidade de polimerização controlada e pela variedade de grupos funcionais incorporados em sua estrutura, o que facilita a adaptação do processo para obtenção de materiais, como, espumas, revestimentos, adesivos e filmes biopoliméricos. Esses polímeros podem conter grupamentos,

alifáticos, aromáticos, amidas, estéres, éteres e entre outros (Souza, 2017) e desempenham um papel crucial na indústria de plásticos. A utilização de óleos vegetais para obtenção de polioli e produção de poliuretanos sustentáveis para aplicação em filmes representa uma alternativa relevante para a redução do impacto ambiental e aproveitamento de matérias-primas renováveis (Mordor intelligence, 2023).

O óleo de palma é o óleo extraído do mesocarpo do fruto da palmeira *Elaeis guineenses*, e está entre os mais produzidos e comercializados no mundo. A sua produção mundial cresceu mais de 300% em 20 anos, e estima-se que cerca de 80% dessa produção concentra-se em dois países do sudeste asiático, Malásia e Indonésia. Segundo o estudo realizado em 2013, no Brasil o uso alimentício é de cerca de 97% e 70% no mundo, resultado da aplicação dos óleos em vertentes novas do mercado (ABRAPALMA, 2015).

Nesse contexto de crescente demanda por insumos naturais e oriundos de fontes renováveis, surgem também discussões sobre alternativas consideradas mais sustentáveis para embalagens, em especial no que se diz respeito à substituição dos polímeros convencionalmente utilizados (FAO, 2016).

As embalagens tradicionais produzidas com polímeros obtidos do petróleo degradam-se de forma muito lenta no meio ambiente, devido a sua maior resistência às radiações, a elevação de temperatura, ao ar, ao ataque imediato dos microrganismos, gerando problemas ambientais, tendo em vista que a degradação dos mesmos ocorre em centenas de anos (Arvanitoyannis *et al.*, 1999). Em alternativa a essas questões surge a utilização de polímeros naturais, que dentre suas várias vantagens estão a sua biodegradabilidade e a sua obtenção a partir de recursos renováveis (Quintero *et al.*, 2012).

Os filmes biopoliméricos são estruturas utilizadas para o envolvimento, ou cobertura de produtos, quando há a sua degradação completa por microrganismos são considerados biodegradáveis. Os mesmos são materiais preparados a partir de macromoléculas que têm a capacidade de agir como barreira a elementos externos como, umidade, gases e óleos, trazendo proteção aos produtos e conseqüentemente aumentando a sua vida útil. Ainda podem ser acrescidos de compostos antioxidantes e antimicrobianos, no qual recebem a denominação de biofilmes ativos (Krochta e MulderJohnston, 1997).

O uso de polióis de origem vegetal para a produção de poliuretanos sustentáveis é uma alternativa para a redução da poluição causada pela produção dos plásticos convencionais, considerada um desafio a nível global que demanda novas práticas industriais sustentáveis. O óleo de palma, extraído do fruto da palmeira *Elaeis guineensis*, tem se destacado como uma matéria-prima promissora para a síntese de polióis, devido à sua disponibilidade, custo

relativamente baixo e ácidos graxos insaturados. Além disso, o uso de filmes biopoliméricos oferece uma alternativa aos polímeros sintéticos tradicionalmente utilizados que demoram centenas anos para sua completa decomposição (Ionescu, 2005).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Produção de filmes biopoliméricos utilizando polioliol obtido do óleo de palma.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

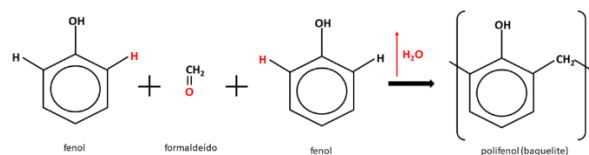
- Caracterização do óleo de palma quanto ao índice de acidez, densidade e viscosidade;
- Obtenção do polioliol de óleo de palma;
- Caracterização do polioliol obtido quanto ao índice de hidroxila, índice de acidez, densidade e viscosidade;
- Produção do poliuretano a partir do polioliol e sua aplicação em filmes biopoliméricos;
- Caracterização dos filmes biopoliméricos quanto às propriedades mecânicas, permeabilidade ao vapor de água, solubilidade, espessura e índice de intumescimento.

### 3 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Histórico e sustentabilidade dos plásticos

O desenvolvimento dos plásticos iniciou-se no século XIX, a partir da modificação de materiais naturais, como por exemplo, a baquelite, primeiro polímero sintético. A Figura 1 apresenta a reação de formação da mesma, através da policondensação do fenol com formaldeído. O formaldeído reage com o fenol em uma reação de substituição eletrofílica no próprio anel aromático, o grupo metileno ( $\text{CH}_2$ ) liga-se ao anel, formando um polímero tridimensional, que é a baquelite propriamente dito. Nos anos 1950 e 1960 houve uma expansão significativa do uso dos plásticos, em virtude da popularização das embalagens descartáveis, principalmente as embalagens de alimentos (Cooper Hewitt, 2019).

Figura 1- Representação do polímero sintético baquelite



Fonte: Materiais Júnior, 2019.

Atualmente produz-se aproximadamente 450 milhões de toneladas de plástico por ano, cerca de 57 kg/pessoa, isso significa dizer que a cada ano mais de 350 milhões de toneladas de plástico tornam-se lixo, e infelizmente grande parte desse material é descartado incorretamente e permanece no planeta (OECD, 2022).

Alguns dados do ano de 2023 mostram que somente no Brasil, produz-se cerca de 220 a 300 mil toneladas de resíduos sólidos diariamente, destacando que aproximadamente 30 - 40% desse total são atribuídos a materiais plásticos utilizados em embalagens, materiais esses que são em sua maioria descartados incorretamente, elevando assim o impacto ambiental (Sotero, 2000; Das; Tiwari, 2018; ABREMA, 2024).

Dessa forma, os problemas criados pelo acúmulo das embalagens sintéticas e a sua reciclagem, tem sido uma forma de incentivo para pesquisas e maiores investimentos na área de materiais biodegradáveis, e outras alternativas mais sustentáveis na área de embalagens.

Desde os anos 2000, após a crise do petróleo e a conscientização ambiental, as embalagens evoluíram para que se fosse possível incorporar materiais mais sustentáveis, devido à cobrança por alternativas ecológicas, que atendessem as demandas em relação a solução das

evidências de poluição por microplásticos e do acúmulo em ecossistemas (Open Access Government, 2021).

Do ponto de vista sustentável, o principal problema do uso de polímeros sintéticos é a sua origem de fontes petroquímicas e a sua degradabilidade. Os produtos feitos a partir do PU não são degradados naturalmente contribuindo para o acúmulo de resíduos, além da sua produção frequente envolver compostos tóxicos que podem ser nocivos à saúde durante a sua fabricação e descarte (Datta; Wloch, 2019).

Nesse contexto surge como alternativa a utilização de polióis obtidos a partir de óleo vegetais para a produção de poliuretanos sustentáveis, uma vez que esses materiais derivados de fontes renováveis, auxiliam na redução da dependência do petróleo e oferecem a possibilidade de contribuir para a redução do impacto ambiental através do desenvolvimento de materiais mais sustentáveis (Luchese, 2018).

### 3.2 Polióis

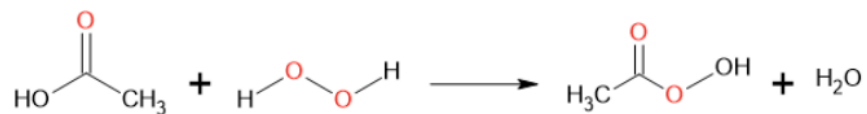
Os polióis são compostos orgânicos que contém em sua composição os grupos hidroxilas ( $-OH$  ligado a um carbono saturado), possuindo a característica de reação com os grupos isocianatos para a síntese de compostos com o grupo uretano, principalmente o poliuretano. Segundo Clemente *et al.* (2014), os mesmos são responsáveis por grande parte da aplicabilidade dos poliuretanos em polímeros na indústria de plásticos. Os polióis mais utilizados na síntese do poliuretano são os polióis poliéteres, polióis poliésteres e hidrocarbônicos, que geralmente são oriundos do petróleo, mas também podem ser provenientes de fontes renováveis, como por exemplo, os óleos vegetais (Silva, 2014; Cangemi; Santos; Neto, 2009).

Para a obtenção dos polióis a partir dos óleos vegetais, estes devem passar por um tratamento químico para que sejam transformados em polioliol e estejam aptos para posteriormente serem utilizados como reagentes na produção de poliuretano. Não considera-se a oxidação de maneira direta das duplas ligações um bom processo para obtenção de polióis devido ao seu difícil controle, pensando nisso, desenvolveu-se diferentes métodos de preparo de polióis a partir dos óleos vegetais, sendo os mais comuns, a hidroxilação das ligações duplas carbono-carbono, que estão presentes nos segmentos de ácidos graxos dos óleos, a alcoólise, rota de hidroformilação, rota de ozonólise, a rota de esterificação e a rota de epoxidação, seguida da abertura do anel epóxi e hidroxilação (Chen *et al.*, 2014; Petrovic, 2008). A reação de epoxidação é uma das mais importantes para a funcionalização das ligações duplas nas cadeias carbônicas. Essa reação desempenha um papel fundamental na produção industrial de

diversos produtos básicos, assim como na síntese de intermediários, produtos químicos especializados e farmacêuticos (Wai *et al.*, 2019)

Segundo Gregório *et al.* (2000), a epoxidação é a formação de um éter cíclico de três membros a partir da reação entre perácidos e olefinas. Esse anel é denominado epóxido, ou anel oxirânico. Nessa reação oxida-se parcialmente os ácidos graxos, e introduz-se um átomo de oxigênio em uma insaturação na cadeia da molécula. As substâncias responsáveis pela inserção do oxigênio na dupla ligação carbono-carbono para que haja a formação do epóxido, são os agentes epoxidantes, o mais utilizado é o peróxido de hidrogênio, que na presença do ácido carboxílico, torna-se um perácido orgânico (Grieco *et al.*, 1993). Essa reação ocorre em duas etapas, a primeira é a formação do perácido em fase aquosa (Figura 2), em seguida ocorre a epoxidação propriamente dita que ocorre em fase oleosa. Durante essa etapa, o ácido carboxílico reage com as duplas ligações presentes no óleo vegetal, resultando na formação do anel oxirânico (LA SCALA; WOOL, 2002).

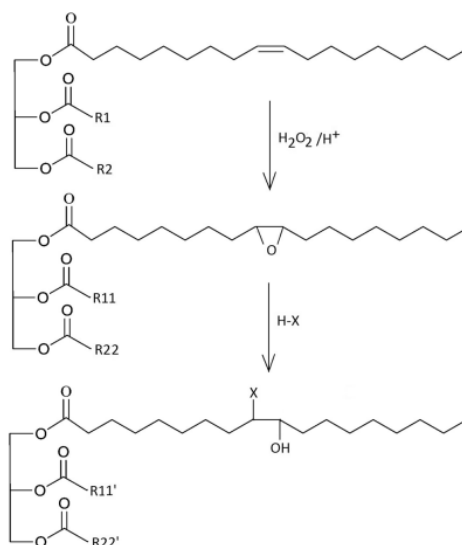
Figura 2 - Reação de formação do perácido



Fonte: Luis (2021).

O método mais utilizado para obtenção dos polióis de óleo vegetal é a epoxidação *in situ* seguida da abertura do anel oxirânico e hidroxilação (Figura 3), por ser mais economicamente viável (Saurabh *et al.*, 2011). A epoxidação a partir do perácido formado *in situ*, ocorre por reação de um ácido carboxílico, geralmente o ácido acético ou ácido fórmico, com peróxido de hidrogênio concentrado, utilizado como doador de átomo de oxigênio. (GOUD *et al.*, 2007). Na reação de epoxidação do óleo vegetal um excesso de ácido é necessário para abertura do anel oxirânico, seguido da hidroxilação e conseqüente formação de poliol. Este sistema tem como produto um poliol sem ligações duplas remanescentes, levando a uma maior estabilidade do produto. Além, disso apresenta vantagens como, menor tempo de processo em relação a outros métodos, dependendo das condições reacionais (tempo de temperatura) diferentes tipos de polióis que diferem em suas funcionalidades e massas moleculares médias podem ser obtidos. (Monteavaro,2005).

Figura 3- Esquema representativo de epoxidação *in situ*



Fonte: Sawpan (2018).

Nos últimos anos, a utilização de óleos vegetais na indústria tem recebido uma grande atenção, pois além de ser uma fonte renovável, suas duplas ligações são utilizadas como locais reativos na estrutura molecular, fazendo com que estes possam ser funcionalizados através da reação de epoxidação, tornando o uso dos óleos vegetais epoxidados mais comuns (La scala; Wool, 2002).

Os polióis obtidos a partir de óleos vegetais apresentam algumas características específicas, sendo elas, baixos índices de acidez, viscosidade controlada e uma alta funcionalidade, que permite aplicações em espumas rígidas e embalagens. No caso do poliuretano em específico para embalagens, póliois com índices de hidroxila entre 50 - 200 mg KOH/g são mais utilizados, e também aqueles que possuem uma alta estabilidade térmica e compatibilidade com aditivos e agentes de cura (Petrovic, 2008).

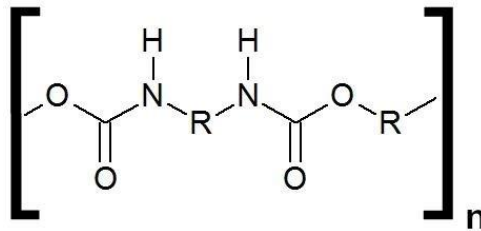
Algumas análises físico-químicas são realizadas nos polióis obtidos a partir de óleos vegetais, como por exemplo, índice de hidroxila, viscosidade e densidade. Realiza-se a análise de índice de hidroxila, por ser essencial para o conhecimento do número de grupos hidroxila disponíveis, uma maneira de ajuste da reatividade na produção de poliuretanos. Já a viscosidade é uma medida direta da resistência do material ao fluxo, o que pode impactar na mistura entre o poliol e o isocianato na formação do PU. A densidade e a viscosidade estão ligadas diretamente, em geral, os polióis mais densos apresentam maior viscosidade, característica essa que afeta a uniformidade da mistura e a sua rigidez e flexibilidade ao final do processo (Nicoludi *et al.*, 2019).

### 3.3 Poliuretanos sustentáveis

A descoberta das ligações poliuretânicas foi realizada em 1849, quando Hofmann e Wurts relataram a reação entre um isocianato e um composto que continha o grupo funcional hidroxila. Posteriormente, Otto Bayer et al., no ano de 1937, utilizaram essa mesma reação para o desenvolvimento de PU (Figura 4) (Vilar, 2002).

Já entre os anos de 1952 e 1954 foram produzidas as primeiras espumas poliuretânicas, onde foram utilizados poliésteres como polióis, sendo utilizada como base para a tecnologia comercial de espumas (Serves, 2007).

Figura 4 - Estrutura química do poliuretano



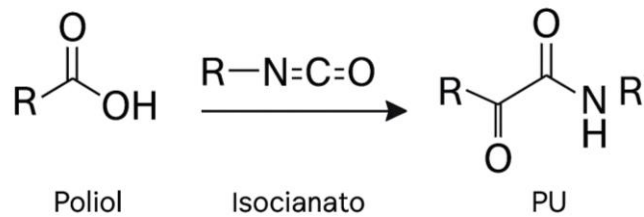
Fonte: eCycle, 2016.

Os poliuretanos são polímeros com alta versatilidade devido a variedade de grupos que constituem e a possibilidade de polimerização controlada, permitindo assim uma adaptação do processo e da própria composição para a obtenção de materiais (Soares, 2022).

Uma característica importante do PU para sua utilização em embalagens em geral, é a sua capacidade de absorver impacto, sem que essa energia seja retransmitida, além da sua ótima resistência à abrasão (PolyBrasil, 2024).

A síntese do PU ocorre da reação de um polioliol com um poli-isocianato na presença de um agente catalisador (Figura 5). É bastante comum a utilização de agentes reticulantes ou extensores de cadeia, pois possuem um baixo peso molecular e vão se ligar aos grupos formadores do PU, trazendo aprimoramento para as propriedades do material (Musa e Ahmed, 2023).

Figura 5- Reação de formação do poliuretano



Fonte: Autora (2025).

O PU é um polímero caracterizado por conter em sua formação dois tipos de segmentos: segmentos considerados flexíveis e segmentos rígidos. Os segmentos flexíveis são formados pela reação de isocianatos com polióis de cadeia longa, conferindo assim ao material elasticidade, maciez e capacidade de alongamento. No entanto, os segmentos rígidos, oriundos da reação com polióis de cadeias curtas ou extensores de cadeia (como por exemplo o etileno glicol), são responsáveis por características como, rigidez e resistência mecânica, devido à formação de pontos de reticulação física. Dessa maneira, os PU's podem ser mais ou menos rígidos dependendo das cadeias envolvidas na reação (Savioli, 2020).

A reticulação polimérica, ou também chamado *crosslinking*, refere-se à formação de ligações covalentes entre cadeias poliméricas diferentes, aumentando o peso molecular do material, tendo como consequência, maior estabilidade térmica e estrutural. No caso dos segmentos rígidos, essas regiões tendem a se auto-organizar em domínios separados dentro da própria matriz polimérica, em virtude do empacotamento mais denso e da limitação em relação a mobilidade das cadeias (Savioli, 2020).

As propriedades dos polióis utilizados na produção de PU's desempenham um papel muito importante na definição das características finais do material e da sua posterior aplicação. Um dos parâmetros mais importante é o índice de hidroxilas, que representa a quantidade de grupos funcionais -OH disponíveis para reagir com isocianatos. Esse índice está diretamente relacionado à reatividade do poliol e à densidade de reticulação do polímero formado (Hebbeln et al., 2007). Polióis com um índice mais alto, geralmente de baixo peso molecular, possuem uma quantidade maior de grupos reativos por unidade de massa, resultando em uma maior densidade de ligações cruzadas e, conseqüentemente, poliuretanos mais rígidos e resistentes. Esses materiais são amplamente empregados em espumas rígidas para isolamento térmico e revestimentos industriais, justamente porque essas aplicações exigem maior estabilidade dimensional e resistência térmica (Ionescu, 2005).

Por outro lado, polióis com baixo índice de hidroxilas, associados a cadeias mais longas e flexíveis, promovem a formação de poliuretanos com um grau menor de entrecruzamento (*crosslinking*), mais flexíveis e elásticos, indicados para a produção de curativos médicos, espumas flexíveis, embalagens etc. Dessa forma, a escolha adequada do polioliol, deve-se considerar não apenas sua massa molar, mas também seu índice de hidroxilas, para o desempenho esperado do PU (Guo *et al.*, 2017).

### 3.4 Óleo de palma

A *Elais guineensis* Jacq, comumente conhecida como palma de óleo (Figura 6), é uma das oleaginosas com maior importância mundial (Sheil *et al.*, 2009). Estima-se que a sua produção de óleo mundialmente é de cerca de 62,35 milhões por ano (FAO, 2023). No cenário global, os maiores produtores de palma são a Indonésia e a Malásia, que são responsáveis por cerca de 85% da produção (Turner *et al.*, 2011; Obidzinski *et al.*, 2012; United States, 2014). Já o Brasil encontra-se na última posição entre os dez maiores produtores mundiais, tendo como estado dominando o estado do Pará, responsável por 90% da produção nacional, que é aproximadamente 600 mil toneladas por ano (Santos, Lima e Souza, 2023).

Figura 6 - Imagem ilustrativa da palma



Fonte: Sulisz, 2024.

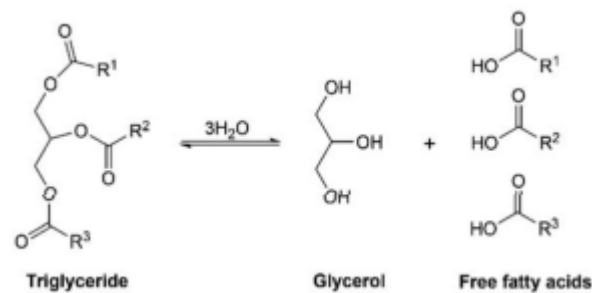
Da Palma pode-se extrair dois tipos de óleo, o óleo de palma ou também chamado de azeite de dendê e o óleo de palmiste, a diferença entre eles é a parte da planta de que são obtidos, do mesocarpo do fruto e da amêndoa do fruto, respectivamente. Esses dois produtos se diferem

nas suas propriedades e características devido a sua composição química, sendo o óleo de palma rico em vitamina E, ácidos graxos insaturados e poli-insaturados, e o de palmiste, composto por palmitina, oleína, lanolina, estearina e ácido palmítico, além da coloração avermelhada e consistência densa, devido à presença de ácidos graxos saturados (Rival, 2007; Kok *et al.*, 2011; Septevani *et al.*, 2015).

A extração do óleo de palma é realizada através da utilização de processos mecânicos e térmicos, que envolvem a separação do óleo das fibras e da polpa do fruto. Inicialmente os frutos são submetidos à esterilização a vapor, para inativação das enzimas que poderiam degradar o óleo e facilitar a remoção do mesocarpo. Em seguida, ocorre a prensagem, onde o óleo é extraído por pressão mecânica, podendo ser complementada por processos de centrifugação para separação do óleo das impurezas (FAO, 2023).

O óleo de palma possui em sua formação principalmente triglicerídeos com seu perfil único de ácidos graxos (Figura 7), e alguns componentes menores como tocotrienóis e tocoferóis, carotenóides, fitoesteróis, clorofila e pequenos níveis de compostos fenólicos. Quanto a composição de ácidos graxos, pode diferir-se em cada país. O baixo teor de ácido linoleico (apresentado no quadro 1), é vantajoso em relação a estabilidade do óleo e a sua deterioração oxidativa (Stavila *et al.*, 2023).

Figura 7 - Estrutura do triglicerídeo com seus produtos de hidrólise de glicerol e ácidos graxos livres



Fonte: Stavila *et al.*, (2023)

Quadro 1 - Características físico-químicas do óleo de palma

<b>Propriedade</b>	<b>Valor típico</b>
Densidade	0,89–0,92 g/cm <sup>3</sup>
Índice de acidez	≤ 10 mg KOH/g
Índice de iodo	50–55 g I <sub>2</sub> /100 g
Índice de saponificação	190–210 mg KOH/g
Índice de refração à 40°C	Entre 1,455 a 1,460
Composição de ácidos graxos	Ácido palmítico: cerca de 45%; Ácido oleico: cerca de 40%; Ácido linoleico: 10%

Fonte: Embrapa (2023).

No Brasil utiliza-se o óleo de palma de maneira regional no estado da Bahia, onde o mesmo é ingrediente para variados pratos culinários, principalmente para fritura do acarajé. Os acarajés são fritos através da imersão no óleo bruto, ocasionando reações hidrolíticas, térmicas e oxidativas no óleo. Alguns critérios são levados em consideração para monitoramento da qualidade do óleo de fritura, como por exemplo, o índice de refração (40°C), acidez (mg KOH/g) e peróxidos (mEq/kg). O óleo de palma possui aceitáveis características para frituras, porque contém em pequenas quantidades o ácido linoléico (10%) e traços de linolênico, além de um elevado teor de ácidos graxos monoinsaturados e antioxidantes naturais (Quadro 1) (Curvelo *et al.* 2011).

O óleo de palma tem sido amplamente reconhecido como uma matéria-prima promissora para a produção de polióis, devido ao seu baixo custo e à composição favorável de ácidos graxos. Por meio da modificação química, especialmente via epoxidação *in situ*, é possível introduzir grupos hidroxila essenciais à síntese de poliuretanos sustentáveis, conferindo aos polióis características desejáveis para diferentes aplicações industriais. No contexto da utilização desses polióis em filmes biopoliméricos, como proposto neste trabalho, destaca-se a contribuição de Prociak *et al.* (2018), que descreve a epoxidação do óleo de palma como uma rota eficiente para obtenção de polióis com boa reatividade, compatíveis com formulações de poliuretanos flexíveis. Em complemento, Nguyen *et al.* (2021) apresenta dados que mostram como a otimização das condições de epoxidação influencia positivamente na estabilidade térmica e na redução da viscosidade dos polióis, atributos fundamentais para sua

aplicação em matrizes poliméricas moldáveis, como filmes. Já Ismail *et al.* (2023) reforça o potencial técnico desses polióis ao demonstrarem, por meio de análises físico-químicas, que os materiais derivados do óleo de palma exibem desempenho comparável ao de polióis oriundos do petróleo. Esses avanços reforçam a viabilidade da aplicação do poliol de óleo de palma em sistemas híbridos com biopolímeros, como os filmes desenvolvidos neste trabalho, alinhando-se à proposta de produzir materiais com menor impacto ambiental e boa performance funcional (Prociak *et al.*, 2018; Ismail *et al.*, 2023).

### 3.5 Filmes biopoliméricos

Os polímeros são moléculas que constituem-se de pequenas unidades chamadas de monômeros, que juntas formam compostos de altas massas moleculares, lineares ou ramificados. Devido a composição de longas cadeias de carbono dos polímeros, os mesmos são resistentes à degradação, mas por serem em sua maioria provenientes de fontes não renováveis, acarretam diversos problemas, como por exemplo, elevado consumo de energia, problemas ambientais etc. Em consequência disso, muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de substituir esse material e atender as necessidades das indústrias, que buscam por materiais oriundo de fontes renováveis para a produção de embalagens biodegradáveis que sejam similares a embalagens sintéticas (Ballesteros *et al.*, 2017; Ye *et al.*, 2017).

As embalagens biodegradáveis são divididas em filmes biodegradáveis ou biopoliméricos e revestimentos comestíveis. Os filmes são estruturas pré-formadas que têm a função de envolver os alimentos, enquanto que os chamados revestimentos formam-se durante a aplicação de maneira direta nos alimentos a serem cobertos (Yousuf *et al.*, 2018). Ambos são utilizados para a preservação do produto, auxiliam no controle e inibição da migração de umidade, dióxido de carbono, oxigênio e aromas. (Martins *et al.*, 2012; Ballesteros *et al.*, 2017).

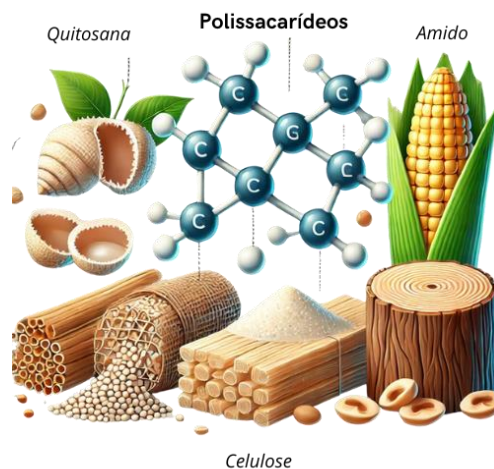
Os filmes são constituídos por materiais biopoliméricos, e podem ser divididos em três diferentes classificações: Polímeros produzidos por síntese química a partir de fontes renováveis, tendo como o exemplo, o ácido polilático, polimerizado a partir do ácido láctico, polímeros produzidos por microrganismos, como por exemplo a pululana, e polímeros provenientes da biomassa, onde destacam-se as proteínas, lipídios, polissacarídeos e resinas (Srinivasa; Tharanathan, 2007).

Os biopolímeros obtidos da biomassa resultam em filmes e revestimentos com propriedades características. Os lipídios, quando empregados auxiliam no controle de gases, umidade e migrações de compostos, e são aplicados à alimentos frescos, processados ou congelados, para conservação da qualidade destes. As proteínas são conhecidas por apresentar

biofilmes com excelentes barreiras ao dióxido de carbono e ao oxigênio, como por exemplo, caseína, whey protein, colágeno e gelatina. Por último, os polissacarídeos são comumente empregados na produção de filmes biodegradáveis por possuírem a habilidade de estabelecer interações poliméricas e assim criar uma rede contínua, agindo semelhantemente aos filmes sintéticos (Delgado, 2016; Yousuf *et al.*, 2018).

Os polissacarídeos (Figura 8) mais utilizados para a produção de filmes são: quitosana, amido, celulose e derivados, e gomas que são divididas em alginato, pectina, carragenina e galactomananas (Giraldo, 2016). Esses compostos são hidrofílicos, o que significa dizer que possuem afinidade com a água, e devido a isso proporcionam uma boa barreira a gases, entretanto oferecem uma barreira fraca ao vapor d'água (Cerqueira *et al.*, 2011). Além disso estes apresentam estruturas frágeis, com aparências quebradiças, problema esse que pode ser solucionado através da incorporação de aditivos como plastificantes, sendo os mais utilizados, os polióis, como, glicerol, sorbitol e o polietilenoglicol (Du *et al.*, 2016).

Figura 8 - Polissacarídeos mais utilizados para produção de filmes biopoliméricos



Fonte: Adaptado Inteligência artificial GEMINI, 2024.

### 3.6 Quitosana

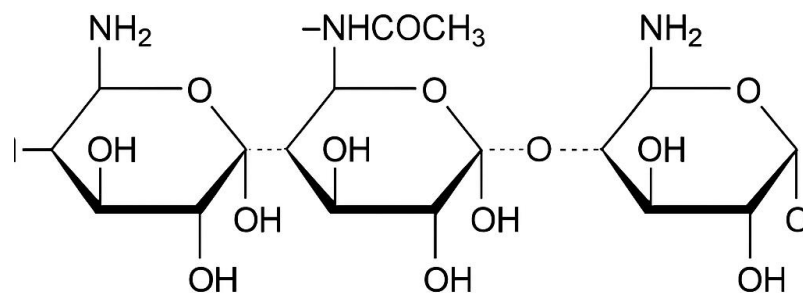
A quitosana é um polissacarídeo derivado da quitina, obtido por meio de sua desacetilação alcalina, sendo considerada um dos mais promissores biopolímeros para aplicações industriais e biomédicas, devido à sua biocompatibilidade, biodegradabilidade e não toxicidade. Essas características a tornam atrativa para o desenvolvimento de filmes biopoliméricos, com destaque para sua utilização em embalagens biodegradáveis, curativos e revestimentos funcionais (Xue *et al.*, 2023).

Além das suas propriedades intrínsecas, a quitosana tem se mostrado versátil na formulação de filmes biopoliméricos com funções específicas, como filmes antimicrobianos, antioxidantes, com liberação controlada de compostos bioativos. Esses filmes podem ser utilizados com embalagens ativas, ou seja, embalagens que interagem de alguma maneira com o alimento para que se prolongue a sua vida útil, reduzindo a utilização de aditivos sintéticos (Aider, 2010).

O uso da quitosana em filmes com propriedades antioxidantes é um outro exemplo relevante, principalmente quando combinada a compostos fenólicos naturais, como extratos. Esses aditivos não apenas melhoram a estabilidade oxidativa de alimentos embalados, mas também conferem maior resistência térmica e mecânica à matriz polimérica, além de modificar características sensoriais (Wang *et al.*, 2025).

A estrutura química da quitosana (Figura 9) é composta por unidades de D-glicosamina e N-acetil-D-glicosamina, ligadas por ligações  $\beta$ , com a presença de grupos amino livres que vão conferir carga positiva em meio ácido. Tal propriedade permite que a quitosana forme filmes a partir de soluções aquosas, normalmente em ácido acético diluído, por meio de técnicas como *casting* ou espalhamento em superfícies planas. Os filmes resultantes apresentam uma boa aparência, aderência e capacidade de formar barreira contra gases, além de atividade antimicrobiana (Wang *et al.*, 2025).

Figura 9 - Estrutura química da quitosana



Fonte: Inteligência artificial Gemini, 2025.

Apesar das vantagens, os filmes produzidos com quitosana apresentam uma certa fragilidade mecânica e sensibilidade à umidade, o que acaba limitando sua aplicação isolada em determinadas áreas. Para tentar contornar essas limitações estratégias têm sido empregadas, como por exemplo, a incorporação de plastificantes (glicerol, sorbitol), compostos

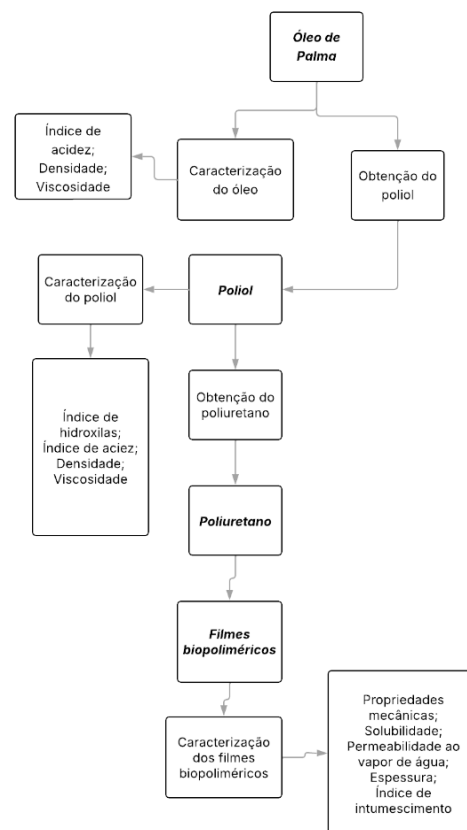
antioxidantes (extratos fenólicos) e a combinação com outros polímeros e compostos, como gelatina, pectina e poliuretano (Medeiros, 2023).

Dessa maneira, a quitosana representa uma alternativa viável e sustentável na produção de filmes biodegradáveis, especialmente quando associada a outros materiais com propriedades complementares. Sua aplicação em filmes biopoliméricos continua sendo objeto de estudo, principalmente diante da crescente demanda por embalagens mais ecológicas e biomateriais com desempenho multifuncional (Medeiros, 2023).

#### 4 METODOLOGIA

Nesta seção, estão descritas as metodologias utilizadas para a produção dos polióis a partir do óleo de palma e o poliuretano obtido a partir desse poliol. Além disso, é descrito a caracterização destes com relação ao índice de acidez (IA), índice de iodo (II), índice de hidroxila (IOH), densidade e viscosidade, bem como as metodologias de produção de filmes biopoliméricos, a e a sua caracterização quanto às propriedades mecânicas, permeabilidade ao vapor de água, espessura, solubilidade e índice de intumescimento (Figura 10).

Figura 10 - Diagrama de blocos da metodologia da pesquisa



Fonte: Autora (2025).

## 4.1 Matéria-prima

Para o desenvolvimento do presente estudo foi utilizado o óleo de palma, adquirido no comércio local no município de Bagé/RS. A quitosana utilizada foi da marca Oakwood Chemical, glicerol P.A da marca Cromoline Química fina. Os experimentos e as análises foram realizados no Laboratório de Operações e Processos da Indústria de Alimentos (2104) e no Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação aplicados aos Olivais de Região da Campanha (2106) do curso da Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Pampa, campus Bagé/RS.

### 4.1.1 Reagentes

Os reagentes utilizados foram, ácido acético ( $C_2H_4O_2$ ) 1% (v/v), ácido fórmico ( $HCOOH$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ) a 10%, cloreto de sódio aquoso ( $NaCl$ ) a 30%, sulfato de sódio anidro ( $Na_2SO_4$ ), 4,4'-difenilmetano (MDI), hidróxido de potássio ( $KOH$ ), álcool n-butílico, hidróxido de sódio ( $NaOH$ ), piridina, anidrido acético ( $Ac_2O$ ) e fenolftaleína.

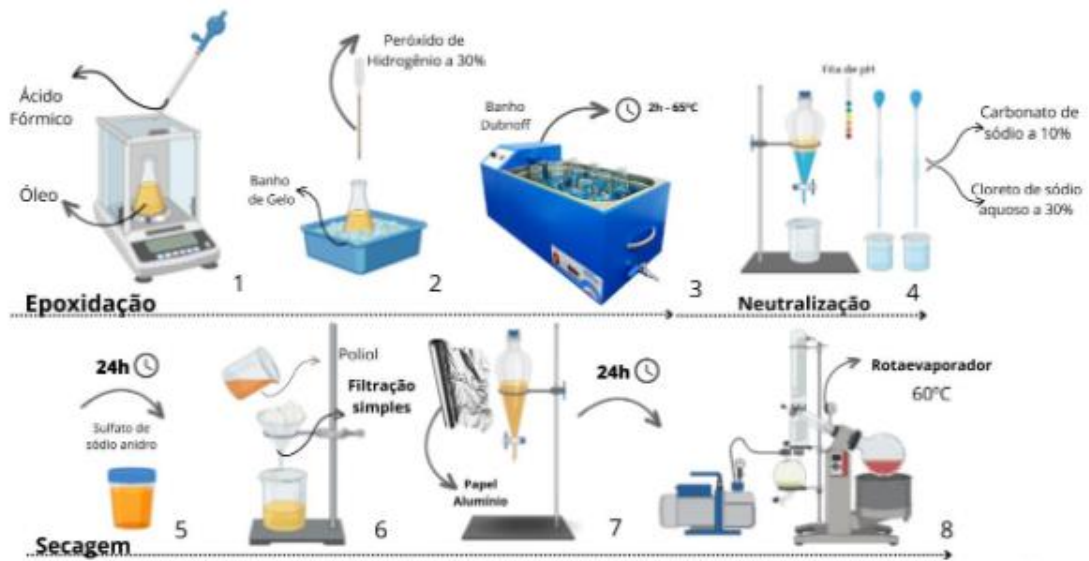
## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Produção dos polióis

Para a síntese dos polióis utilizou-se condições experimentais segundo Klein (2023) com algumas adaptações.

A amostra de óleo de palma foi inicialmente pesada, seguida da adição de ácido fórmico à temperatura ambiente e de peróxido de hidrogênio a 30%, este último sob resfriamento em banho de gelo. As proporções molares utilizadas para óleo, ácido e peróxido seguiram a razão 1:3:2, calculadas com base na massa do óleo. Em seguida, a mistura foi aquecida a 85 °C em banho Dubnoff com agitação constante por 6 horas. Após o término da reação, realizou-se a neutralização e a secagem do poliol. A neutralização foi conduzida com soluções aquosas de carbonato de sódio a 10% ( $Na_2CO_3$ ) e cloreto de sódio a 30% ( $NaCl$ ), utilizando funil de separação até que o sistema atingisse pH neutro. Para a secagem, foi adicionado sulfato de sódio anidro ( $Na_2SO_4$ ), permanecendo em contato com a amostra por 24 horas, protegido da luz. Após esse período, o agente secante foi removido por filtração simples, e a amostra foi mantida em repouso por mais 24 horas no funil de separação, envolta em papel-alumínio. Por fim, o poliol passou por uma etapa de evaporação do peróxido de hidrogênio e ácido fórmico residuais, utilizando rotaevaporador sob vácuo a 60 °C, totalizando três dias de processamento (Figura 11) (Klein, 2023).

Figura 11 - Representação sistemática de obtenção do polioli



Fonte: Adaptado de Klein (2024).

O PU utilizado na produção dos filmes biopoliméricos foi obtido por policondensação reação entre 11,9 mmol do isocianato 4,4'-difenilmetano (MDI) e 3,5 mmol de polioli do óleo. A reação foi realizada sob atmosfera modificada (vácuo) a 80°C por 2 h (Sarojini K., *et al.* adaptado 2018).

#### 4.2.2 Caracterização do óleo e polióis

As análises realizadas para caracterização do óleo foram índice de acidez (IA), índice de iodo (IO), densidade e viscosidade. Para caracterização dos polióis foram realizadas as mesmas análises, exceto o índice de hidroxila (IOH).

##### 4.2.2.1 Índice de acidez

A determinação do índice de acidez foi realizada conforme a metodologia do Instituto Adolfo Lutz (2008), para o óleo de palma e o seu respectivo polioli, determinada pela Equação 1.

$$IA = \frac{(Va - Vb) * N * 56,1}{ma} \quad (1)$$

Sendo: IA o índice de acidez (mg de NaOH/g); N a normalidade da solução de NaOH, Vb (mL) gasto na titulação do branco; Va (mL) gasto na titulação da amostra e ma massa da amostra (g).

#### 4.2.2.2 Densidade

A densidade foi determinada por picnometria real, conforme Tadini (2008).

#### 4.2.2.3 Viscosidade

A viscosidade foi determinada utilizando o viscosímetro de Brookfield (Figura 12), instrumento que mede a viscosidade de um líquido a partir da aplicação de uma força rotacional. O modelo utilizado foi o viscosímetro digital do modelo ALPHA R da marca Fungilab, equipado com cilindros de diâmetros diferentes, ou também chamado de spindles. Utilizou-se o spindle LV1 e rotação de 60 rpm.

Figura 12 - Viscosímetro de Brookfield



Fonte: BRASEQ (2024)

#### 4.2.2.4 Índice de hidroxila

Para a determinação do índice de hidroxila foi utilizada a norma ASTM D 1957- 86 (ASTM, 2017). Em três erlenmeyers de 250 mL, colocou-se a massa de amostra de acordo com a possível quantidade de hidroxila exemplificada na norma. Adicionou-se 5,0 mL de uma solução de piridina e anidrido acético na proporção 3:1, e colocou-se em refluxo por 1h, aproximadamente, mantendo-se a amostra em banho-maria na temperatura de aproximadamente 90 °C. Após o refluxo, adicionou-se 10 mL de água pela parte superior do condensador. Se houvesse uma leve turvação, adicionava-se um pouco mais de piridina, se não ocorrer agita-se a solução e continua-se o refluxo por mais 10 min nas mesmas condições. Após o segundo refluxo o sistema foi resfriado, e em seguida será adicionou-se pelo condensador 25,0 mL de álcool n-butílico e a solução com KOH alcoólico 0,5 mol. L<sup>-1</sup> foi titulada, utilizando

como indicador fenolftaleína. As análises foram feitas em triplicada. Para o cálculo do índice de hidroxila utilizou-se a Equação 2.

$$IOH = \frac{VB + \left( \frac{mma * VIAC}{mIAC} \right) - VKOH}{mam} * 56,1 \quad (2)$$

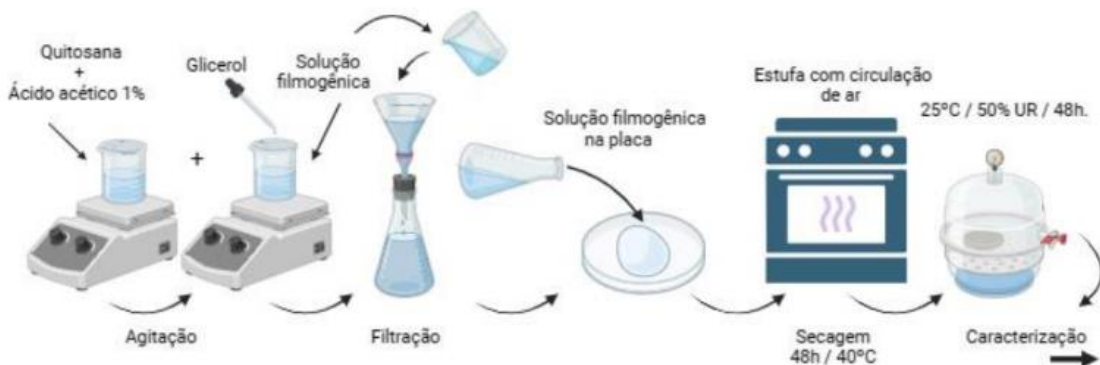
Sendo: VB o volume da solução padrão de KOH alcoólica gasto com a amostra em branco (mL); VKOH o volume da solução padrão de KOH alcoólica gasto com a amostra (mL); VIAC o volume da solução padrão de KOH alcoólica gasto na determinação do índice de acidez (mL); mam massa de amostra (g) e mIAC a massa de amostra em gramas utilizadas na determinação do índice de acidez da amostra (g).

#### 4.2.3 Produção dos filmes biopoliméricos

Os filmes biopoliméricos foram elaborados pela técnica *casting*. Todas as soluções filmogênicas foram preparadas com uma massa de sólidos fixa (1g) para que estes possam ser comparados entre si, já que foram elaborados com diferentes formulações.

A matriz biopolimérica utilizada foi a quitosana dissolvida em solução de ácido acético 0,1 mol L<sup>-1</sup>, sob agitação constante (300 rpm) à temperatura ambiente (25 ± 1°C) por 4 h e logo em seguida adicionado o plastificante. Em seguida, a solução formadora de filme foi seca a 40 °C por 48h (Moura, 2018). A representação esquemática do processo de elaboração dos filmes de quitosana e plastificante está representada na Figura 13.

Figura 13 - Representação esquemática da elaboração do filme de quitosana

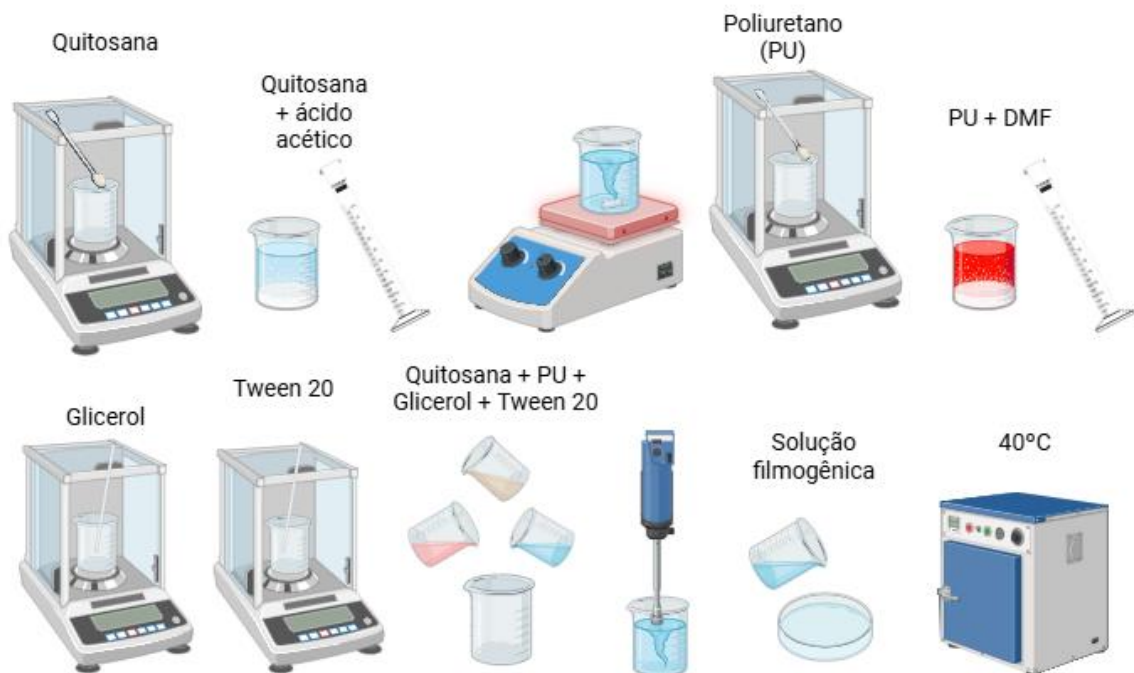


Fonte: Adaptado Quines (2023).

Nas formulações contendo quitosana e poliuretano (25% Q/75% PU; 75% Q/25% PU; e 50% Q/50% PU), a solução de quitosana foi inicialmente filtrada, e em seguida adicionou-se

o poliuretano dissolvido em 35 mL de dimetilformamida (DMF), juntamente com 0,1 g do emulsificante Tween 80. Após a adição de todos os componentes, o sistema foi submetido à agitação a 25.000 rpm, por 10 minutos, utilizando um agitador Dremel Stylus 1100–01 (EUA), com o objetivo de formar soluções filmogênicas homogêneas. A representação esquemática do processo de elaboração do filme de quitosana/poliuretano, está apresentada na Figura 14 (Moura, 2018).

Figura 14 - Representação esquemática da elaboração de filmes de quitosana/poliuretano



Fonte: Autora (2025)

Todas as formulações das soluções filmogênicas foram vertidas em placas de vidro e inseridas em uma estufa com circulação forçada de ar (40°C por 24 h) para a evaporação completa do solvente. Após a secagem, a amostra foi acondicionada em um dessecador contendo solução de ácido sulfúrico, para manter a umidade relativa em 50% e posterior caracterização.

#### 4.2.4 Caracterização dos filmes

#### 4.2.4.1 Espessura

Para análise da espessura dos filmes utilizou-se o método descrito por Moura e colaboradores (2015) utilizando um micrômetro digital (Figura 15), onde foram realizadas dez medidas de maneira aleatória na superfície da amostra.

Figura 15 - Micrômetro digital



Fonte: Mercado livre, 2025.

#### 4.2.4.2 Propriedades mecânicas (RT e ER)

Para avaliação das propriedades mecânicas, resistência à tração (*RT*) e Elongamento na ruptura (*ER*), foi utilizado o equipamento texturômetro (Figura 16), seguindo a norma ASTM D882 (ASTM, 2000).

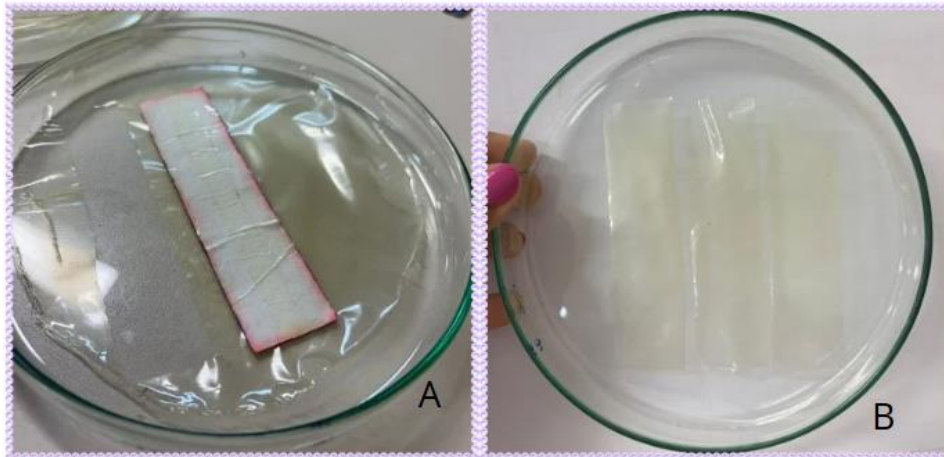
Figura 16 - Texturômetro



Fonte: Autora (2025).

Inicialmente as amostras foram cortadas em tamanhos de 25 mm de largura e 100 mm de comprimento (Figura 17). Em seguida, fixadas no equipamento com uma célula de carga de 50 N, com distância de separação inicial entre as garras de 50 mm e velocidade de tração de  $120 \text{ mm min}^{-1}$ .

Figura 17 - A: Molde utilizado/ B: Filme controle nas medidas corretas



Fonte: Autora (2025).

Para quantificação da  $RT$  e  $ER$  foram utilizadas as Equações 3 e 4, respectivamente.

$$(RT) = \frac{\text{Força (N)}}{\text{Área (m}^2\text{)}} \quad (3)$$

onde  $RT$  é a tensão máxima relacionada à tração ( $Pa$ ),  $F_m$  é a força máxima que antecede o momento de ruptura ( $N$ ) e  $A_{mín}$  é a área da seção transversal inicial do filme ( $m^2$ ).

$$(\%) ER = \frac{(d_i - d)(mm)}{d_i (mm)} \times 100 \quad (4)$$

Onde  $d_i$  representa a distância inicial de 50mm e  $d$  é a distância percorrida pelo filme até o seu rompimento.

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

Para determinação da permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes utilizou-se o método gravimétrico a  $25^\circ\text{C}$ , utilizando o método padrão E96-E96M (ASTM,2000). As amostras do filme foram fixadas em formato de discos com diâmetro de 50 mm em células de permeação contendo cloreto de cálcio anidro ( $\text{CaCl}_2$ ) granulo. Ao final, essas células foram

colocadas em dessecadores mantidos a temperatura 25°C e 50% de umidade relativa (UR) durante 10 dias. O cálculo foi realizado conforme a Equação 5.

$$PVA = \frac{mabs}{t} \times \frac{e}{A \times \Delta P} \quad (5)$$

O PVA é a permeabilidade a vapor de água ( $\text{g Pa s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ); mabs é a massa de umidade absorvida (g); t é o tempo de duração dos testes (s); e é a espessura média dos filmes (m); A refere-se a área da superfície exposta do filme ( $\text{m}^2$ ) e  $\Delta P$  é a diferença de pressão através dos filmes (kPa).

#### 4.2.4.4 Solubilidade em água (%)

Realizou-se a análise de solubilidade em água conforme a metodologia desenvolvida por Farhan e Hani (2017). As amostras dos filmes foram cortadas em formatos de discos com cerca de 2cm de diâmetro e pesadas ( $m_i$ ), e posteriormente imersas em água destilada (50 mL) e mantidas sob agitação por 24 h, em uma temperatura de 25°C. Por fim, as amostras foram secas em estufa (105°C por 24 h) e pesadas novamente ( $m_f$ ). Expressa-se a solubilidade em termos de massa seca dissolvida, de acordo com a Equação 6.

$$\text{Solubilidade em água (\%)} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (6)$$

Onde  $m_i$  representa a massa inicial e  $m_f$  a massa final.

#### 4.2.4.5 Índice de intumescimento (%)

O índice de intumescimento foi analisado de acordo com a metodologia adaptada de Bunhak et al. (2007). Os filmes biopoliméricos foram cortados em amostras de  $2 \text{ cm}^2$  e inseridos em estufa a 60 °C para secagem por 2 h. Após, foi determinada a massa seca e os filmes biopoliméricos foram imersos em água destilada por 10 min. A água foi drenada, removendo o excesso e os filmes foram pesados novamente. O índice de intumescimento de cada filme foi quantificado seguindo a Equação 7.

$$I (\%) = (m_f - m_i) / m_i * 100 \quad (7)$$

Onde  $m_i$ , a massa do filme seco antes do teste (g) e  $m_f$  é a massa do filme após a imersão em água (g).

#### 4.2.5 Análise estatística

Os resultados obtidos foram expressos em médias e desvio padrão referentes às determinações realizadas em triplicatas. A partir do programa estatístico, foram realizadas a análise de variância (ANOVA) e o teste T de student para comparação das médias onde ( $p < 0,05$ ).

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados das análises realizadas e a comparação com estudos existentes na literatura relacionada.

#### 5.1. Caracterização do óleo de palma e do polioli

Realizaram-se análises para avaliar parâmetros físico-químicos essenciais, os valores obtidos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1- Características físico-químicas do óleo de palma e do polioli

Análise	Óleo de Palma bruto	Polioli de óleo de Palma
Densidade a 19°C / 18°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,918	0,920
Viscosidade a 17°C (cP)	214,801	145,800
Índice de acidez (KOH/g)	14,17 ± 1,001 <sup>a</sup>	10,88 ± 1,001 <sup>b</sup>
Índice de hidroxilas (mg KOH/g)	----	219,16 ± 0,311

Valores seguidos por letras diferentes na mesma linha são significativamente diferentes através de Teste T ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autora (2025).

A análises realizadas evidenciaram alterações importantes nas propriedades do óleo de palma após modificação química para obtenção do polioli. A densidade do óleo de palma bruto foi de 0,918g/cm<sup>3</sup> a 19°C, valor em conformidade com a faixa reportada por Sawpan (2018) e Porciak et al. (2018), que indicam densidades de 0,915 a 0,920 g/cm<sup>3</sup> para óleos de palma comerciais. Após o processo de hidroxilação, ou seja, adição ou introdução de hidroxilas, a densidade do polioli aumentou ligeiramente, o que está de acordo com o comportamento observado em outros estudos, onde a introdução de grupos hidroxila promove um aumento na

densidade do material devido à maior polaridade e compactação da estrutura molecular (Miranda, 2023).

Em relação a viscosidade, o valor do óleo bruto 214,8 cP a 17°C, é condizente com as tendências relatadas para óleos de palma brutos, que geralmente apresentam viscosidade elevada devido à alta fração de ácidos graxos saturados. Na literatura, valores de viscosidade para óleo de palma bruto variam entre 180 a 230 cP a temperaturas próximas de 20°C (Chin *et al.*, 2008; Ramli *et al.*, 2017), confirmando que o valor obtido está dentro da faixa esperada para esse tipo de óleo vegetal. Após a reação de hidroxilação, a viscosidade do polioliol foi reduzida para 145,8 cP, corroborando com os dados encontrados por Petrovic (2008) e Prociak *et al.* (2018), que fazem uma associação dessa redução à hidrólise parcial das ligações dos triacilgliceróis, que promove a quebra de cadeias longas e conseqüentemente diminui o peso molecular médio da molécula. Essa redução no tamanho das cadeias facilita o fluxo do material, resultando em menor viscosidade. Essa característica é desejável para aplicações em poliuretanos, pois polióis que possuem uma menor viscosidade melhoram a processabilidade e a homogeneidade das misturas (Iqbal *et al.*, 2023)

Observou-se que o processo de epoxidação e posterior hidroxilação promoveu uma redução estatisticamente significativa de  $14,17 \pm 1$  mg KOH/g no óleo bruto para  $10,88 \pm 1$  mg KOH/g no polioliol (teste de Tukey,  $p < 0,05$ ). Indicando eficiência na remoção ou neutralização de ácidos graxos livres durante o processo de hidroxilação (Petrovic, 2008). Essa diminuição é atribuída principalmente à etapa de neutralização do polioliol, na qual agentes alcalinos são utilizados para reagir com os ácidos graxos livres, formando sais que podem ser removidos do sistema. Isso é tecnicamente desejável, pois valores elevados de índice de acidez vão indicar maior presença de ácidos graxos livres no sistema, os quais reagem de maneira competitiva com os grupos isocianato durante a polimerização. Essa reação alternativa forma ligações amídicas indesejáveis e consomem parte do isocianato disponível, reduzindo a quantidade de grupos NCO (isocianato) livres para reagir adequadamente com os grupos hidroxila do polioliol. Como consequência, há um desvio na razão estequiométrica NCO/OH, afetando de maneira direta a formação correta das ligações uretânicas, e por fim, as propriedades do poliuretano. Portanto a redução do índice de acidez contribui para um processo mais limpo, ao minimizar reações secundárias e subprodutos, e mais eficiente, ao direcionar a maior parte dos isocianatos para a formação de ligações uretânicas, garantindo um material com propriedades estruturais, mecânicas e térmicas mais consistentes (Iqbal *et al.*, 2023; Petrovic, 2008).

Como pode ser visualizado na Tabela 1, o polioliol obtido a partir do óleo de palma apresentou um índice de hidroxilas de 219,19 mgKOH/g, situando-se na faixa considerada

adequada para aplicação em materiais poliméricos que exijam moderada a alta densidade de reticulação, faixa que, conforme a literatura, varia entre 200 e 400 mg KOH/g para espumas semirrígidas e entre 300 e 800 mg KOH/g para espumas rígidas e filmes biopoliméricos híbridos com biopolímeros naturais (Siracusa, 2020). O índice de hidroxilas (I.O.H) é um parâmetro importante, pois quantifica a disponibilidade de grupos -OH para reagir com grupos isocianato, formando assim a estrutura tridimensional característica do poliuretano (Liu et al., 2020). Em óleos vegetais convencionais, como por exemplo, o óleo de palma, a ausência de hidroxilas livres implica em um I.O.H bem baixo, sendo necessária à sua modificação química para geração de grupos funcionais (Nguyen *et al.*, 2021).

O processo de epoxidação e abertura de anel oxirano com álcoois é amplamente empregado para funcionalizar óleos vegetais, como foi demonstrado por Prociak *et al.* (2018). Nesse estudo, os autores exploraram diferentes compostos para abertura do anel, como álcool benzílico e glicerol, e obtiveram polióis de óleo de palma com variação de I.O.H de 100 a 300mg KOH/g, evidenciando que a escolha do reagente e as condições da reação são fatores determinantes para o controle da reatividade e viscosidade do poliol. Um índice de acidez mais elevado geralmente indica uma maior disponibilidade de grupos hidroxila reativos, o que favorece a formação de uma rede polimérica mais densamente reticulada, resultando em melhores propriedades mecânicas e maior estabilidade. Entretanto, essa maior funcionalidade também pode elevar a viscosidade do poliol, exigindo um maior controle das condições de processamento (Prociak *et al.*, 2018; Azmi *et al.*, 2019).

Comparando com outros polióis vegetais encontrados na literatura acadêmica, observa-se que o poliol de óleo de mamona constitui um caso muito específico, por possuir a ricinoléina em sua estrutura, ele apresenta hidroxilas livres de forma natural, sem nenhuma necessidade de modificação complexa. Já o poliol de óleo de soja modificado alcança valores entre 150 e 220 mgKOH/g, sendo amplamente utilizado em filmes biopoliméricos e espumas de baixa densidade (Khan *et al.*, 2021)

Assim, os resultados referentes ao poliol de óleo de palma do presente trabalho, confirmam o futuro potencial competitivo frente a outros polióis vegetais e pode ser explorado em formulações de filmes biopoliméricos e revestimento devido a três fatores principais, disponibilidade renovável da matéria-prima, versatilidade de modificação química para ajustar a funcionalidade (índice de hidroxilas) e a possibilidade de compatibilização com biopolímeros, como quitosana ou amido (Khan *et al.*, 2021).

Esse potencial está relacionado, primeiramente, à elevada reatividade do poliol obtido após modificação química por epoxidação e abertura de anel, que possibilita alcançar índices

de hidroxilas suficientemente altos superiores aos de polióis amplamente utilizados, como o de soja conforme demonstrado por Prociak *et al.* (2018). Essa característica garante uma quantidade adequada de grupos –OH disponíveis para a formação de ligações uretânicas com isocianatos, promovendo a formação de uma rede polimérica mais coesa, essencial para propriedades mecânicas satisfatórias, como resistência à tração e integridade estrutural dos filmes. Além disso, a viscosidade do polioliol também se mostra um fator crítico, especialmente em sistemas aplicados como filmes finos, que exigem boa fluidez e reatividade controlada para uma dispersão homogênea dos componentes.

Polióis com índice de acidez elevado podem apresentar viscosidade excessiva e causar reticulação exagerada, resultando em materiais rígidos demais ou difíceis de processar (Azmi *et al.*, 2019; Ismail *et al.*, 2023). Outro fator relevante é o controle da razão molar entre isocianato e hidroxilas, que deve ser cuidadosamente ajustado, pois proporções desequilibradas podem levar à presença de grupos reativos residuais, prejudicando a coesão estrutural do filme, além de potencialmente causar migração de compostos ou liberação de voláteis (Prociak *et al.*, 2018).

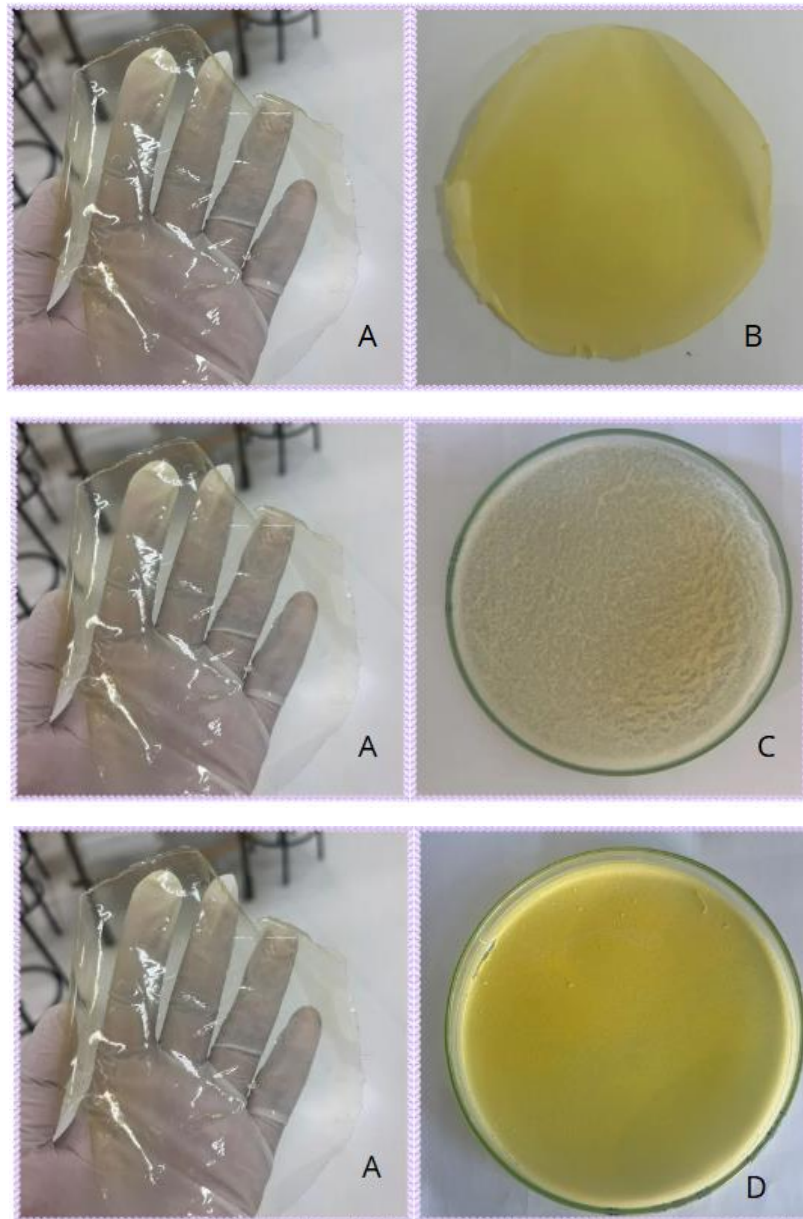
Portanto, quando essas variáveis são adequadamente controladas, o polioliol óleo de palma se torna uma boa e competitiva alternativa a polióis oriundos de derivados de petróleo, alinhando desempenho técnico e vantagens ambientais, especialmente em sistemas híbridos onde utiliza-se biopolímeros naturais para filmes biopoliméricos e revestimentos de baixo impacto ambiental (Nguyen *et al.*, 2021).

## **5.2 Filmes biopoliméricos**

### **5.2.1 Aspecto visual**

O aspecto visual dos filmes, quanto a cor, transparência e aderência, com as diferentes composições pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 - Aspecto visual dos filmes - A: Filme de quitosana/ B: 25% PU e 75%Q/ C: 25% Q e 75%PU/ D: 50% Q e 50%Q



Fonte: Autora (2025).

Assim como foi proposto no presente trabalho, testou-se diferentes proporções do polímero e do PU, porém somente uma proporção (25%PU/ 75%Q) obteve sucesso na retirada da placa de petri, exceto os filmes feitos para serem analisados no texturômetro. Essa dificuldade na retirada do material pode ocorrer por uma combinação de diversos fatores, como por exemplo a temperatura e a quantidade da quitosana e do PU utilizado na formulação.

Temperaturas mais baixas durante a preparação e a secagem dos filmes podem afetar diversos aspectos físico-químicos do sistema. A redução da temperatura do ambiente reduz a solubilidade e a mobilidade das cadeias poliméricas, dificultando a dispersão homogênea do

PU na matriz de quitosana, podendo até gerar fases mal integradas (Petrovic, 2008). Além disso, a temperatura mais baixa pode ter impactado negativamente a eficiência do processo de homogeneização no Turrax, tornando a emulsão mais viscosa e menos estável. Outro fator crítico que pode ter influenciado é o processo de secagem, a temperatura mais baixa retarda a evaporação da água, mas ao mesmo tempo pode causar secagem superficial precoce, formando uma crosta sobre o filme antes que a estrutura interna esteja completamente formada (Rezaei *et al.*, 2019). Em baixas temperaturas, a fase mais hidrofóbica (PU) tende a migrar para a superfície em contato com a placa de vidro, favorecendo a adesão ao substrato e dificultando a remoção do filme sem danos (Heidari *et al.*, 2022).

Outro fator que possivelmente favoreceu a maior facilidade da remoção do filme contendo 25% de PU na formulação foi à predominância da quitosana, pois ela é um polímero hidrofílico que, ao secar, forma uma estrutura superficial menos aderente em superfícies lisas como vidro, em virtude da menor interação com substratos apolares. Quando presente em maior proporção, a matriz tende a formar um filme mais contínuo e flexível, com menor retração durante a secagem, o que facilita a sua descolagem da superfície da placa (Sánchez-González *et al.*, 2011).

Nas formulações contendo uma maior proporção de PU, ocorre o favorecimento de formação de uma rede polimérica mais densa e rígida, que passa por maior contração ao secar. Esse encolhimento pode gerar maior tensão entre o filme e a placa, intensificando a aderência. Além disso, os segmentos formados a partir da reação entre o poli-ol e o isocianato podem redistribuir-se durante a secagem, promovendo interações intermoleculares mais intensas com o vidro (Azevedo *et al.*, 2020).

### 5.2.2 Caracterização dos filmes

Os resultados obtidos nas análises realizadas para caracterização dos filmes biopoliméricos (C e T1) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Resultados das análises

Filme	Filme de quitosana (C)	Filme de 25% PU / 75% Q (T1)
Espessura (mm)	$0,08 \pm 0,003^a$	$0,06 \pm 0,0401^a$
Solubilidade (%)	$29,01 \pm 1,001^a$	$18,01 \pm 0,0900^b$
Intumescimento (%)	$423,35 \pm 0,003^a$	$102,39 \pm 0,062^b$
PVA ( $\text{g Pa s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )	$7,04 \pm 0,001^a$	$8,83 \pm 0,0005^b$

(10 <sup>-11</sup> )		
Enlogamento à ruptura (%)	75,52 ± 35,001	---
Resistência à tração (RT)	152, 20 ± 9,002	---
(Mpa)		

Valores seguidos por letras diferentes na mesma linha são significativamente diferentes através de Teste T ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autora (2025).

Em relação a espessura notou-se uma pequena redução nos valores, ou seja, não houve diferença significativa entre as amostras, porém, embora sutil, essa redução está de acordo com a tendência observada em filmes poliméricos, onde a introdução de um segundo componente, nesse caso o PU de base vegetal, pode influenciar a viscosidade da solução formadora de filme e conseqüentemente a sua capacidade de espalhamento durante o processo de moldagem (Miran *et al.*, 2022).

Os valores obtidos para análise de solubilidade em água indicam que estatisticamente houve uma diferença entre amostras, resultando em uma redução expressiva na capacidade de dissolução do filme T1 (18%) em comparação com o filme controle C (29%). Essa diminuição pode ser atribuída à incorporação do poliuretano na matriz de quitosana.

A quitosana é um polímero hidrofílico naturalmente, rico em grupos amino e hidroxila, o que favorece a sua afinidade por moléculas de água e conseqüentemente, maior solubilidade, especialmente em meio ácido (Shahidi; Abuzayyad, 2020). No entanto, a adição do poliuretano de óleo de palma modifica de maneira significativa essa característica, criando uma estrutura parcialmente hidrofóbica devido à presença de segmentos alifático flexíveis provenientes do próprio óleo de palma. Essa característica contribui para a redução da absorção e difusão de água através da matriz polimérica (Wang *et al.*, 2020)

Além disso, o elevado índice de hidroxilas do poliálcool utilizado favorece a formação de uma rede polimérica com maior grau de reticulação, dificultando a penetração de moléculas de água e restringindo a mobilidade das cadeias poliméricas da quitosana. Essa estrutura mais compacta e menos permeável explica a menor solubilidade observada em T1 (Miran *et al.*, 2022).

Os valores de intumescimento em água obtidos para os filmes evidenciam uma redução expressiva no comportamento de absorção de água quando o PU é incorporado à matriz de quitosana, indicando que estatisticamente houve uma diferença significativa entre as amostras. O filme controle apresentou um índice de 423,35% indicando uma alta capacidade de absorção

e retenção de água em sua estrutura. Essa característica é comum de biopolímeros hidrofílicos como a quitosana, que devido à abundância de grupos amino tem forte afinidade por moléculas de água, resultando em uma elevada taxa de intumescimento (Shahidi, 2020).

Com a adição de 25% de PU à formulação (Filme T1), o índice de intumescimento caiu para 102,39%, uma redução de aproximadamente 75% em relação ao filme controle. Essa diminuição pode ser explicada pela presença dos segmentos hidrofóbicos do poliuretano, que reduzem os espaços livres na matriz polimérica e limitam a penetração de água (Wang *et al.*, 2020).

Um menor índice de intumescimento é desejável em filmes biopoliméricos para aplicações em embalagens em alimentos ou revestimentos protetores, pois evita deformações estruturais e perda de integridade mecânica em ambientes úmidos (Abureesh *et al.*, 2023). Portanto a redução tanto na solubilidade quanto no intumescimento confirma a eficiência da incorporação do poliuretano como reforço hidrofóbico na matriz polimérica de quitosana.

Na análise de PVA o valor para o filme de quitosana pura foi de  $7,04 \times 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , enquanto o filme com 25% de poliuretano apresentou um valor superior, de  $8,83 \times 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , após 10 dias de exposição. Esse aumento sugere uma reorganização da matriz polimérica, provavelmente relacionada à modificação estrutural promovida pela incorporação do poliuretano, que, ao ser parcialmente hidrofóbico, pode gerar regiões estruturais distintas, com menor densidade e um maior espaçamento entre as cadeias da quitosana. Esse fenômeno permite a formação de vias de difusão mais acessíveis ao vapor de água, reduzindo assim a eficácia da barreira, como já relatado em estudos envolvendo filmes de quitosana com polímeros não polares (Xue *et al.*, 2023).

Para favorecimento da compatibilidade entre os componentes da formulação utilizada, adicionou-se 0,1 g de Tween 20, um surfactante não iônico com elevado valor de HLB (Equilíbrio Hidrofílico–Lipofílico), consideravelmente hidrofílico. A função do Tween 20 nesse contexto é a melhor dispersão do poliuretano de óleo de palma na matriz de quitosana, evitando a separação de fases e facilitando a formação de um filme homogêneo. Entretanto, o aumento do PVA observado mesmo com a presença do surfactante sugere, que apesar da sua eficácia na emulsificação, o Tween 20 pode ter contribuído para a formação de regiões mais permeáveis ao vapor de água, devido a sua natureza hidrofílica. Surfactantes como esse podem atuar como plastificantes secundários, reduzindo a compactação molecular, consequentemente aumentando a mobilidade da água na matriz (Muñoz *et al.*, 2015).

Além disso, a própria estrutura da quitosana pode ter sido desorganizada parcialmente pela presença do surfactante e do PU, favorecendo a migração de moléculas de água e aumento

da permeabilidade. Embora a concentração utilizada (0,1g) seja baixa, mesmo em pequenas quantidades, surfactantes não iônicos podem exercer efeitos consideráveis na microestrutura dos filmes. Essa situação em particular é importante em sistemas poliméricos finos, como filmes para embalagens ou revestimentos, nos quais, pequenas alterações morfológicas vão impactar diretamente a função de barreira. Estudos semelhantes indicam que a escolha do tipo e da concentração do surfactante a ser utilizado deve ser balanceada cuidadosamente, especialmente quando fala-se em melhoria de resistência à passagem de umidade (Santos *et al.*, 2020).

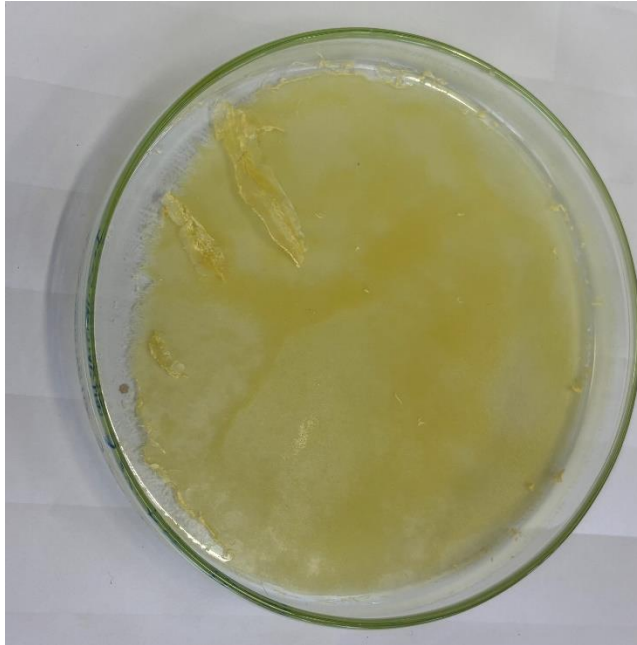
Portanto, embora o Tween 20 tenha promovido a miscibilidade do sistema e favorecida a formação de filmes homogêneos e uniformes, sua utilização pode ter resultado em um aumento da permeabilidade por induzir maior afinidade com a água, seja pela sua própria presença quanto pela reorganização estrutural provocada pelo material. Para formulações futuras, pode-se testar a redução da concentração ou a substituição parcial por um surfactante com HLB mais baixo, como o Span 60, ou qualquer outro que ofereça maior compatibilização sem comprometer as propriedades de barreira (Muñoz *et al.*, 2025; Xue *et al.*, 2023).

Os filmes de quitosana apresentaram comportamento mecânico elevado, com resistência  $152,2 \pm 9$  MPa e alongamento à ruptura de  $75,52 \pm 35\%$ . Esses valores indicam, uma combinação bastante rara entre alta rigidez e flexibilidade, o que não é comumente observado em filmes formados exclusivamente por quitosana. De modo geral, a literatura relata tensões de tração variando entre 20 e 60 Mpa, sendo valores maiores que esse intervalo geralmente alcançados por meio de reforços estruturais ou modificações químicas específicas (Gómez-Estaca *et al.*, 2009; Khan *et al.*, 2021). Assim, os resultados observados sugerem que as condições de formulação e secagem favoreceram uma estrutura polimérica densa, com elevada coesão entre as cadeias de quitosana.

Em contrapartida, o valor elevado de alongamento à ruptura indica que os filmes apresentaram alta ductilidade, o que sugere a influência de uma leve plasticidade residual ou pela presença de umidade no material, que atua como plastificante natural e aumenta a mobilidade das cadeias (Khan *et al.*, 2021).

Já nos filmes contendo 25% de PU de óleo de palma observou-se uma aderência intensa à placa de petri, conforme citado no item anterior, impedindo a retirada adequada dos filmes após secagem, possivelmente devido à baixa temperatura, de fatores relacionados a proporção de quitosana e PU utilizada e do material da placa e a sua interação com o filme produzido. Além disso, as amostras apresentaram aspecto ressecado e quebradiço (Figura 19).

Figura 19- Filme 25% PU/ 75 % Q aderido a placa de petri



Fonte Autora (2025)

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos do polioli, foi possível constatar que a modificação química do óleo de palma resultou em um polioli com propriedades adequadas para aplicações em sistemas poliméricos sustentáveis. A densidade apresentou um leve aumento, o que condiz com a maior polaridade estrutural promovida pela introdução dos grupos hidroxilas. A redução da viscosidade após a reação favorece a processabilidade e na homogeneidade das formulações.

O índice de acidez foi reduzido, indicando menor presença de ácidos graxos livres, resultando em uma minimização de reações indesejadas com isocianatos e melhoria na eficiência da reticulação. Já o índice de hidroxilas alcançado foi compatível com as exigências para filmes biopoliméricos, demonstrando boa reatividade para formação de ligações uretânicas.

Dessa forma, o polioli obtido apresentou características compatíveis com o uso em formulações de filmes à base de biopolímeros, reforçando seu potencial renovável e funcional aos polióis convencionais.

Em relação aos filmes, observou-se que a modificação da matriz de quitosana através da introdução de 25% de PU de óleo de palma promoveu alterações relevantes nas propriedades funcionais dos mesmos, evidenciando seu potencial de aplicação em materiais sustentáveis.

Pôde-se observar uma leve redução na espessura dos filmes modificados (T1) em relação ao controle, atribuída à menor viscosidade da solução contendo PU, que favoreceu maior espalhamento durante a moldagem. A solubilidade em água foi reduzida de 29% para 18%, indicando menor afinidade com a água devido à introdução dos segmentos hidrofóbicos e à formação de uma estrutura polimérica mais compacta. De forma semelhante o índice de intumescimento diminuiu expressivamente de 423,35% para 103,39%, sugerindo redução na porosidade e na capacidade de absorção de água.

Em contrapartida, a permeabilidade ao vapor de água aumentou, passando de  $7,04 \times 10^{-11}$  para  $8,83 \times 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , possivelmente devido à reorganização estrutural da matriz e à ação plastificante do Tween 20 utilizado como surfactante.

Os resultados demonstraram que a adição de PU contribuiu para melhoria em propriedades importantes, como solubilidade e intumesciment. Entretanto, o aumento da permeabilidade indica a necessidade de ajustes na formulação. Assim, a proposta do presente trabalho se mostra promissora para o desenvolvimento de filmes biopoliméricos alinhados às demandas da indústria por soluções mais sustentáveis.

## 7. TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento térmico do polioliol por meio de análises como TGA e DSC, a fim de entender melhor a sua estabilidade e aplicabilidade em diferentes temperaturas;
- Estudar a compatibilidade do polioliol com diferentes biopolímeros naturais, como pectina, gelatina ou amido;
- Realizar um estudo de biodegradação e toxicidade do polioliol para avaliar a segurança ambiental do material final;
- Avaliar o efeito do tipo de isocianato utilizado na reação com o polioliol, sobre as propriedades físico-químicas e mecânicas do poliuretano formado;
- Estudar a razão molar entre grupos isocianato e hidroxilas, determinando sua influência sobre o grau de reticulação, eficiência da polimerização e as propriedades finais dos filmes produzidos;
- Avaliar a substituição do surfactante Tween 20 por surfactantes com menor valor de HLB, como o Span 60, visando melhorar a compatibilidade sem aumentar a permeabilidade ao vapor de água;
- Testar diferentes concentrações do Tween 20 para identificar o ponto ideal de equilíbrio entre a estabilidade da emulsão e desempenho de barreira;

- Investigar a morfologia superficial e interna dos filmes por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de compreender a influência das modificações estruturais na permeabilidade e solubilidade;
- Avaliar biodegradabilidade dos filmes em diferentes meios (solo, água, compostagem), comparando os filmes modificados com o controle;
- Verificar o comportamento dos filmes em contato direto com alimentos ou simulações alimentares, observando possíveis migrações, estabilidade e desempenho em ambiente real de aplicação.

## REFERÊNCIAS

ABIOVE. **Números fechados pela Abiove confirmam recordes na soja em 2023.**

Disponível em: <https://abiove.org.br/numeros-fechados-pela-abiove-confirmam-recordes-na-soja-em-2023/>. Acesso em: 25 set. 2024

ABRAPALMA. **Sobre o fruto de palma.** Disponível em:

<https://www.abrapalma.org/pt/sobre-o-fruto-de-palma/>. Acesso em: 25 set. 2024.

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024.** São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em:

<https://abrema.org.br/2024/12/11/mais-de-41-dos-residuos-urbanos-tiveram-destinacao-inadequada-em-2023/>. Acesso em: 7 jul. 2025.

ABUREESH, M. A. et al. **Recent developments in chitosan-based films for sustainable food packaging applications.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 237, 124333, 2023.

AIDER, M. **Chitosan application for active bio-based films production and potential in the food industry:** Review. *LWT - Food Science and Technology*, v. 43, n. 6, p. 837–842, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.01.021>.

ARVANITOYANNIS, I; BILLIADERIS, C.G. **Physical properties of polyol-plasticized edible blends made of methylcellulose and soluble starch.** *Carbohydrate Polymers*, vol. 36, p. 105-119, 1999.

AZEVEDO, V. M. et al. **Biodegradable films based on chitosan and polyols: physicochemical and mechanical properties.** *Polímeros*, v. 30, e2020023, 2020.

AZMI, N. A. et al. **Preparation and characterization of bio-based polyol from epoxidized palm olein.** *Polymer-Plastics Technology and Materials*, v. 58, n. 4, p. 371-380, 2019.

BALLESTEROS, L. F. et al. **Recent advances in biopolymer-based packaging materials.** *Carbohydrate Polymers*, v. 168, p. 260–274, 2017.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. S.; NETO, J. A. B. **Epoxidação de óleos vegetais: uma revisão.** *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 11, n. 1, p. 55–64, 2009.

Disponível em: <http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/>. Acesso em: 17 jun. 2025.

CHIN, Y. S. et al. **Physicochemical properties and oxidative stability of refined, bleached and deodorized palm oil and palm olein.** *Food Chemistry*, v. 109, n. 3, p. 716–722, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.01.043>

COOPER HEWITT, Smithsonian Design Museum. **Hero to Zero: A History of Plastics.**

Disponível em: <https://www.cooperhewitt.org/2019/09/26/hero-to-zero-a-history-of-plastics/>. Acesso em: 26 out. 2024.

CURVELO, E. V. et al. **Características físico-químicas e estabilidade oxidativa do óleo de palma para uso em fritura.** *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, v. 47, n. 2, p. 299-305, 2011.

DAS, B.; TIWARI, R. K. **Chemical modification of vegetable oils for the production of bio-based polyols and polyurethanes.** *Journal of Polymers and the Environment*, v. 26, n. p. 345–359, 2018. DOI: 10.1007/s10924-017-0950-2

DATTA, J.; WŁOCH, M. **Biodegradation of polyurethane and the life cycle of materials.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, p. 5648–5662, 2019.

ECYCLE BRASIL. **Estrutura geral do poliuretano (PU).** Disponível em: <http://www.ecycle.com.br/component/content/article/35-atitude/884-poliuretano-desconhecido-muito-presente-no-cotidiano.html>. Acesso em: 10 jul. 2025.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The State of Food and Agriculture: **Climate change, agriculture and food security.** Rome: FAO, 2016. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i6030e/i6030e.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Palm oil processing. In: Small-scale palm oil processing in Africa: a technical guide. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/4/y4355e/y4355e04.htm>. Acesso em: 7 jul. 2025.

GIRALDO, L. F. G. **Desenvolvimento de filmes comestíveis à base de polissacarídeos: caracterização mecânica e térmica.** 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/172382>. Acesso em: 20 jun. 2025.

GREGÓRIO, R. A.; SILVA, M. A.; PEREIRA, J. M. **Reações químicas em óleos vegetais: epoxidação e aplicações.** *Química Nova*, v. 23, n. 4, p. 529–534, 2000.

GRIECO, P. A.; GRUNWALD, G. K.; MARCOTTE, P. **Organic peracids and epoxidation reactions.** *Journal of Organic Chemistry*, v. 58, n. 10, p. 2890–2896, 1993.

GUNSTONE, Frank D. **Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses.** 2. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2011. Disponível em : <https://www.wiley.com/en-us/Vegetable+Oils+in+Food+Technology%3A+Composition%2C+Properties+and+Uses%2C+2nd+Edition-p-9781405199561>. Acesso em 17 nov. 2024.

GUO, A. et al. **Synthesis of polyether polyols with tailored hydroxyl numbers and their effect on polyurethane properties.** *Polymer Testing*, v. 62, p. 102–109, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.06.024>.

HEBBELN, F. L. et al. **Desenvolvimento e caracterização de espumas de poliuretano flexível com diferentes teores de carga mineral.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 17, n. 2, p. 139–144, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282007000200013>.

HERNÁNDEZ, N. L. P. **Síntese de biopolímeros a partir de óleo de mamona para aplicações médicas.** 2015. 129f. TCC (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/951243>. Acesso em: 23 de jun. 2025.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Qualidade do óleo de palma bruto (*Elaeis guineensis*): matéria-prima para fritura de acarajés**. Revista do Instituto Adolfo Lutz, v. 70, n. 4. 2011. Disponível em: [http://www.ial.sp.gov.br/resources/insituto-adolfo-lutz/publicacoes/rial/10/rial70\\_4\\_completa/artigos-separados/1424.pdf](http://www.ial.sp.gov.br/resources/insituto-adolfo-lutz/publicacoes/rial/10/rial70_4_completa/artigos-separados/1424.pdf). Acesso em: 25 set. 2024.

IONESCU, Mihai. **Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes**. Shawbury: Rapra Technology Limited, 2005.

ISMAIL, F. A. et al. **Synthesis and characterization of palm oil-based polyols and polyurethane coatings: recent advances and future perspectives**. *Coatings*, v. 13, n. 2, p. 253, 2023. <https://doi.org/10.3390/coatings13020253>.

ISMAIL, N. et al. **Chemical modification of palm oil-based polyols for rigid polyurethane foam applications: A review**. *Journal of Oil Palm Research*, v. 35, n. 1, p. 1-14, 2023.

KHAN, M. I. et al. Non-edible vegetable oil-based polyols in anticorrosive and antimicrobial polyurethane coatings: A review. *Coatings*, v. 11, n. 9, p. 1075, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11091075>.

KLEIN, Ana Carolina Rubio. **Obtenção de polióis oriundos da epoxidação do óleo de soja residual de fritura e do óleo de pescado**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2023.

KOK, S. H. L.; TAN, K. T.; LEE, K. T.; BERSU, B. M. **A review on the prospects of palm kernel oil as a feedstock for biodiesel production: Malaysia as the world's second largest producer**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 1, p. 467–476, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2010.09.011.

KROCHTA, J.M.; MULDER-JOHNSTON, C. **Edible and biodegradable polymer films: challenges and opportunities**. *Food Technology*, vol. 51, n. 2, p. 60-74, 1997.

LAZUARDI, Iqbal N.; HARAHA, Mara B.; GINTING, Muhammad Hendra S.; et al. **Production and properties of polyol-based polyurethane foam composite derived from waste cooking oil and reinforced with sugar palm fiber**. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 18, 2022. Disponível em: [https://www.arnjournals.com/jeas/volume\\_18\\_2022.htm?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.arnjournals.com/jeas/volume_18_2022.htm?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 20. jun. 2025.

LENARDÃO, E. J.; Freitag, R. A.; Dabdoub, M. J.; Batista, A. C. F.; Silveira, C. C.; **Os 12 1219 Princípios da Química Verde e sua Inserção nas Atividades de Ensino e Pesquisa**. *Química 1220 Nova*, v. 26, p.123, 2003. Disponível em: [https://quimicanova.sbq.org.br/detalhe\\_artigo.asp?id=4673](https://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=4673). Acesso em: 17 de set. 2024.

LIU, Y. et al. **Synthesis of high hydroxyl value palm oil-based polyols via ring-opening of epoxidized palm oil**. *Industrial Crops and Products*, v. 154, 112691, 2020.

LUCHESE, Cláudia Leites. **Desenvolvimento de embalagens biodegradáveis a partir de amido contendo subprodutos provenientes do processamento de alimentos**. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LUIS, D. D. F.. **Modelagem e simulação do processo de epoxidação de óleo vegetal**. São Bernardo do Campo, 2021. 95 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Química) - Centro Universitário FEI, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31414/EQ.2021.D.131349>. Acesso em: 08 jul. de 2023.

MARTINS, J. T. et al. **Food packaging based on biodegradable polymers: A review**. *Polímeros*, v. 22, n. 4, p. 284–290, 2012.

MIRANDA, Deborah Vieira. **Produção e caracterização de espumas de poliuretano derivadas de óleos vegetais**. 2023. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, 2023.

MONTEAVARO, L. L. **Poliuretanas a partir de polióis de óleo de soja**. 2005, 39 f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Porto Alegre, RS, 2005. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/6692>. Acesso em: 08 de jul. 2023.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado de óleo de soja e análise de participação** - Relatório de pesquisa da indústria - Tendências de crescimento. 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/global-soybean-oil-market>. Acesso em: 25 set. 2024.

MUÑOZ, E. et al. **Effect of surfactants on the water vapor permeability of starch-based films**. *Food Hydrocolloids*, v. 47, p. 100–108, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.007>

MUSA, S. H.; AHMED, U. A. **A produção de poliuretano utilizando poliálcool renovável avançado: uma revisão**. *Trends in Science & Technology*, v. 11, n. 3, p. 1–7, 2023. Disponível em: <https://www.tsijournals.com/articles/a-production-of-polyurethane-using-advanced-renewable-based-polyol-a-review.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2025.

NGUYEN, T. L. T. et al. **Valorization of palm oil and its derivatives for polyurethane production: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 136, 110417, 2021.

NICOLUDI, E. et al. **Obtenção de poliuretanas a partir de óleo de soja epoxidado**. 2019. Disponível em: <https://repositorioeceme.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/79306/000278674.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 nov. 2024.

OECD. Plastic pollution: Pathways to net. Credit Suisse, 2022.

OPEN ACCESS GOVERNMENT. **The plastic timeline: How did we get here?**. Disponível em: <https://www.openaccessgovernment.org/the-plastic-timeline-how-did-we-get-here/102481/>. Acesso em: 26 out. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 2 jul. 2025.

PETROVIC, Z. S. **Polyurethanes from vegetable oils**. *Polymer Reviews*, v. 48, n. 1, p. 109–155, jan. 2008. DOI: 10.1080/15583720701834224

POLYBRASIL. Poliuretano (PU): **o que é, tipos, características e aplicações**. 2019. Disponível em: <https://polybrasil.com.br/poliuretano-pu-o-que-e-tipos-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

PROCIAK, A. et al. *Vegetable oil-based polyols and polyurethane materials*. Cham: Springer, 2018.

QUINES, Caroliny Ribeiro. **Aplicação do starter da Kombucha em filmes biopoliméricos, como uma alternativa de embalagem ativa**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2023

QUINTERO, R. I.; GALOTTO, M. J.; GUARDA, A.; RODRÍGUEZ, F. J.; BRUNA, J.E. **Preparation and characterization of cellulose acetate butyrate/organoclay nanocomposite with antimicrobial activity**. Anais, Foz do Iguaçu: IUFOST, 2012.

RAMLI, N. et al. **Characterization of palm oil from Malaysia: Rheological and thermal properties**. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 41, n. 6, e13211, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13211>

REZAEI, M. et al. **Characterization of chitosan-based films incorporated with thyme essential oil and poly ( $\epsilon$ -caprolactone)**. *Food Hydrocolloids*, v. 90, p. 145–153, 2019.

RIVAL, A. **Oil palm cultivation and the environment: a review**. *Agriculture and Human Values*, v. 24, n. 3, p. 235–244, 2007. DOI: 10.1007/s10460-006-9049-4.

SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, L. et al. **Characterization of edible films based on hydroxypropylmethylcellulose and chitosan: Effect of essential oils**. *Food Hydrocolloids*, v. 25, n. 5, p. 1365–1372, 2011.

SANTOS, J. R.; LIMA, M. F.; SOUZA, A. C. **O cultivo da palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) na Amazônia brasileira: influência do solo no nordeste paraense**. In: Livro: Cultivo e manejo de plantas oleaginosas na Amazônia, 1. ed., Manaus: Editora Científica, 2023.

Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/o-cultivo-da-palma-de-oleo-elaeis-guineensis-jacq-na-amazonia-brasileira>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SAURABH, K.; SINGH, D.; KUMAR, P.; SHARMA, N. **Chemical modification of vegetable oils for bio-based polyols and polyurethanes: a review**. *Journal of Polymer Research*, v. 18, p. 1509–1523, 2011. DOI: 10.1007/s10965-011-9594-7

SAVIOLI, M. Q. **Síntese e caracterização de poliuretanos à base de óleo de mamona com diferentes massas molares**. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Química, Bauru, 2020.

SAWPAN, M. A. Polyurethanes from vegetable oils and applications: a review. *Journal of Polymer Research*. v.25, 2018.

SEPTEVANI, R.; PRAWITA, D.; PURWANTI, N. **Characterization of palm oil and palm kernel oil from Indonesia**. *International Journal of Applied Chemistry*, v. 11, n. 3, p. 473–482, 2015.

- SERVES, Vinicius F. **Estudo de espumas flexíveis de poliuretana a partir de óleo de mamona etoxilado**. 2007. 72 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2007. DOI: 10.47749/T/UNICAMP.2007.413701
- SHAHIDI, F.; ABUZAYYAD, M. **Chitosan and its derivatives: A review of the structure, properties and applications**. *Marine Drugs*, v. 18, n. 12, p. 644, 2020.
- SHEIL, D.; GUNAWAN, O.; LISWANTI, N.; KOH, L. P.; RYAN, C. M.; SETIADI, N. **Oil palm agriculture and orangutan conservation in Indonesia: a review of the issues and challenges**. *Biodiversity and Conservation*, v. 18, n. 4, p. 939–953, 2009. DOI: 10.1007/s10531-008-9511-0.
- SILVA, M. A. **Modificação química de óleos vegetais para obtenção de polioli e aplicação em filmes biodegradáveis**. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- SIRACUSA, V.; ROQUE, M. *Biopolymer films and coatings for food packaging: materials, technologies and applications*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2020
- SOARES, Márcio Steinmetz. **Síntese e caracterização de espumas de poliuretano para imobilização de células íntegras e aplicação na síntese de biodiesel**. 2012. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Industrial) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2012. Disponível em: [https://sites.usp.br/ppgeq/wp-content/uploads/sites/537/2021/04/Dissertacao\\_Final\\_Marcio-Steinmetz.pdf](https://sites.usp.br/ppgeq/wp-content/uploads/sites/537/2021/04/Dissertacao_Final_Marcio-Steinmetz.pdf) link. Acesso em: 26 out. 2024.
- SOTERO, L. A. **Química dos óleos e gorduras: caracterização e modificações químicas**. *Revista Brasileira de Óleos e Gorduras*, v. 5, n. 2, p. 23–31, 2000.
- SOUZA, Diego Cardoso de. **Síntese e caracterização de filmes de poliuretano a partir de óleo de soja epoxidado**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/25253>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- SRINIVASA, P. C.; THARANATHAN, R. N. **Biopolymers in food packaging and preservation**. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 47, n. 4, p. 299–326, 2007.
- STAVILA, Erythrina et al. **Recent advances in synthesis of polymers based on palm oil and its fatty acids**. *RSC Advances*, v. 13, p. 14747–14775, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d3ra01913f>
- SULISZ, Justyna. *Olejowiec gwinejski – jak rośnie palma olejowa? Chlorofilowy Dziennik*, 23 mar. 2024. Disponível em: <https://www.chlorofilowydziennik.pl/2024/03/olejowiec-gwinejski-jak-rosnie-palma.html> . Acesso em: 20 jun. 2025.
- TADINI, R. S. **Introdução às operações unitárias**. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
- VILAR, M. T. *Introdução aos poliuretanos: história e aplicações*. São Paulo: Editora XYZ, 2002.

WAI, P. T.; JIANG, P.; SHEN, Y.; ZHANG, P.; GU, Q.; LENG, Y. **Catalytic developments in the epoxidation of vegetable oils and the analysis methods of epoxidized products.** *RSC Advances*, v. 9, p. 38119–38136, 2019. <https://doi.org/10.1039/C9RA05943A>

WANG, Y. et al. **Sustainable bio-based polyurethane coatings with excellent hydrophobicity and flexibility for wood protection.** *Progress in Organic Coatings*, v. 142, 105557, 2020.

WANG, Y. et al. **Vanillin-crosslinked chitosan-based active films for food packaging applications.** *Polymer Bulletin*, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-025-05661-2>. Acesso em 26. jun. 2025.

XUE, Y. et al. **Chitosan-based antibacterial films for biomedical and food applications.** *International Journal of Molecular Sciences*, v. 24, n. 13, p. 10738, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/13/10738>.

YE, S. et al. **Development of biodegradable packaging materials from renewable resources.** *Journal of Cleaner Production*, v. 141, p. 537–545, 2017.

YOUSUF, B. et al. **Edible coatings and films: A novel approach to food preservation.** *Food Science and Technology International*, v. 24, n. 1, p. 41–51, 2018.