

CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

JÚLIO MANCINI LEANDRO

**CARACTERIZAÇÃO DE FILMES
BIOPOLIMÉRICOS DE QUITOSANA E AMIDO**

Rio Claro - SP
2025

JÚLIO MANCINI LEANDRO

CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS DE QUITOSANA E AMIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: Michel Brienzo

Coorientador: Jaiber Humberto Rodriguez Llanos

Rio Claro - SP
2025

L437c	Leandro, Júlio Mancini Caracterização de filmes biopoliméricos de quitosana e amido / Júlio Mancini Leandro. -- Rio Claro, 2025 49 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Rio Claro Orientador: Michel Brienzo Coorientador: Jaiber Humberto Rodriguez Llanos 1. Biopolímeros. 2. biotecnologia. 3. Físico-química. 4. Plásticos biodegradáveis. I. Título.
-------	---

JÚLIO MANCINI LEANDRO

CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS DE QUITOSANA E AMIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Biológicas.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Michel Brienzo (orientador)

Dr. Jaiber Humberto Rodriguez Llanos (coorientador)

Dra. Danieli Fernanda Canaver Marin

Dr. Vítor Rodrigues Marin

Aprovado em: 06 de Junho de 2025

Documento assinado digitalmente
 **JULIO MANCINI LEANDRO**
Data: 18/07/2025 20:52:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do discente

Documento assinado digitalmente
 **MICHEL BRIENZO**
Data: 18/07/2025 08:16:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente
 **JAIBER HUMBERTO RODRIGUEZ LLANOS**
Data: 18/07/2025 09:36:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) coorientador(a)

*Aos meus pais, por serem meu porto seguro e minha
motivação.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio e incentivo de pessoas muito especiais, às quais dedico minha sincera gratidão.

Aos meus pais, Belmiro e Marlene, por todo o amor, suporte incondicional e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha irmã Juliana, que, mesmo à distância, me manteve atento ao quanto a família é importante, ao quanto ela me dá orgulho e faz diferença na minha vida.

À minha parceira Maria Beatriz, pelo companheirismo, pelo constante incentivo ao longo desta jornada e, principalmente, pela paciência.

Ao orientador, Prof. Michel, pela orientação precisa, disponibilidade e paciência no desenvolvimento deste trabalho. Ao coorientador Jaiber, pelas contribuições valiosas e pelo apoio técnico durante todo o processo.

Aos companheiros do IPBEN, que fizeram parte do meu dia a dia acadêmico, com destaque para Renato, Eddyn, Danieli, Rogério e Lucas, pela troca de conhecimentos, apoio e convivência durante os desafios da pesquisa.

Ao Programa de Permanência Estudantil da Unesp e a todos os envolvidos, pelo suporte essencial que tornou possível minha permanência e formação acadêmica.

À Prof. Marli e aos colegas de extensão que participaram dessa trajetória, especialmente à Julia, pela oportunidade de crescimento proporcionada durante o projeto e pela ampliação de horizontes quanto ao trabalho em sala de aula.

Aos amigos Letícia (Dory), Luana, Julio, Thabata (Bhatata), Cynthia, Mateus (Du), Aline, Flora, Gabriela (Coração), Luiza e Daniel (Mini Vaca), pela amizade, apoio e pelos momentos compartilhados que tornaram essa caminhada mais leve.

Aos queridos Juliano (Sheldon) e André (Vesper), mais que companheiros de república, verdadeiros amigos, pelo acolhimento, ajuda constante e amizade profunda.

A todos os que citei aqui — e a muitos outros —, muito do que sou hoje carrega um pouco de vocês e da forma como me transformaram. Dentro desse contexto, o mínimo a ser feito é expressar minha gratidão.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

RESUMO

O crescente interesse por materiais sustentáveis impulsionou o desenvolvimento de biopolímeros como alternativas aos polímeros sintéticos. Neste trabalho, foram produzidos e caracterizados filmes à base de quitosana, amido e suas blendas em diferentes proporções, com o objetivo de avaliar suas propriedades termomecânicas. A metodologia empregou ensaios de análise dinâmico-mecânica (DMA 850 - TA Instruments), em condições controladas de temperatura (35°C), frequência (1 Hz) e força (0,1 N), utilizando corpos de prova padronizados. Os parâmetros analisados (módulo de armazenamento E' , módulo de perda E'' e fator de perda $\tan \delta$) foram determinados via software TRIOS 5.2.1, com aplicação de filtro de suavização. Os resultados mostraram que a incorporação de quitosana às matrizes de amido promoveu melhorias significativas nas propriedades mecânicas e na estabilidade térmica dos filmes, indicando uma forte interação entre os polímeros. A blenda 50:50 (quitosana:amido) apresentou um melhor desempenho global, em função da rigidez e flexibilidade. Assim, é possível evidenciar que o uso de blendas biopoliméricas apresentam um alto potencial no desenvolvimento de embalagens e revestimentos sustentáveis, inferindo amplamente na economia circular.

Palavras-chave: Quitosana; amido; blendas poliméricas; análise dinâmico-mecânica, economia circular.

ABSTRACT

The growing interest in sustainable materials has driven the development of biopolymers as alternatives to synthetic polymers. In this study, films based on chitosan, starch, and their blends in different proportions were produced and characterized to evaluate their thermomechanical properties. The methodology involved dynamic mechanical analysis (DMA 850 - TA Instruments) under controlled conditions of temperature (35°C), frequency (1 Hz), and force (0.1 N), using standardized specimens. The analyzed parameters—storage modulus (E'), loss modulus (E''), and loss factor ($\tan \delta$)—were determined using TRIOS 5.2.1 software with a smoothing filter applied. The results showed that the incorporation of chitosan into starch matrices significantly improved the mechanical properties and thermal stability of the films, indicating a strong interaction between the polymers. The 50:50 (chitosan:starch) blend exhibited the best overall performance, balancing rigidity and flexibility. These findings highlight the high potential of biopolymer blends for the development of sustainable packaging and coating materials, contributing significantly to the circular economy.

Keywords: Chitosan; Starch; Polymer blends; Dynamic mechanical analysis; Circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das ligações químicas da quitina e quitosana.....	12
Figura 2 – Representação das ligações químicas da amilose e amilopectina.....	13
Figura 3 – Representação dos monômeros do amido e da quitosana.....	14
Figura 4 – A esquerda, gel de Quitosana pronto para formar filme e a direita, gel de amido em banho termostático com agitação.....	18
Figura 5 – a esquerda, filme de quitosana 1% e a esquerda, filme de amido 5%.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das blendas e proporção de Quitosana e Amido nos filmes biopoliméricos.....	19
Tabela 2 – Solubilidade em água dos filmes de quitosana, amido e blendas.....	23
Tabela 3 – Espessura média dos filmes de biopolímeros.....	24
Tabela 4 – Valores de opacidade dos filmes de amido e quitosana.....	25
Tabela 5 – Ângulos de contato médios das diferentes formulações de filmes de amido e quitosana.....	25
Tabela 6 – Atribuição das principais bandas observadas nos espectros de FTIR dos filmes de quitosana, amido e blendas.....	27
Tabela 7 – Propriedades mecânicas dos filmes de biopolímeros: resistência à tração e alongação na ruptura.....	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Quitosana.....	11
1.2 Amido.....	12
1.3 Blendas Poliméricas.....	13
1.4 Aplicação de biopolímeros.....	14
1.5 Análise Dinâmica Mecânica (DMA) e sua Importância na caracterização de Biopolímeros.....	15
2 METODOLOGIA.....	18
2.1 Produção de biogel e dos filmes.....	18
2.2 Determinação da solubilidade dos filmes.....	20
2.3 Espessura dos filmes (micrômetro).....	21
2.4 Propriedade óptica dos filmes.....	21
2.5 Ângulo de contato.....	21
2.6 FTIR.....	22
2.7 Análise dinâmica mecânica (DMA) dos filmes.....	22
3 RESULTADOS.....	23
3.1 Solubilidade dos filmes.....	23
3.2 Espessura dos filmes.....	24
3.3 Propriedade óptica dos filmes de quitosana e amido.....	26
3.4 Ângulo de contato.....	27
3.5 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.....	28
3.6 Análise dinâmica mecânica dos filmes de amido e quitosana.....	30
4 DISCUSSÃO.....	32
4.1 Testagem de solubilidade.....	32
4.2 Espessura dos filmes de amido e quitosana.....	33
4.3 Propriedade óptica.....	34
4.4 Ângulo de contato.....	34
4.5 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.....	36
4.6 Análise dinâmica mecânica dos filmes de amido e quitosana.....	36
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Ao encararmos o avanço da humanidade através do tempo, é notável que os materiais plásticos apresentaram um grande destaque em diversos setores, em função da combinação de custo-benefício, versatilidade, resistência e durabilidade, o grande destaque dos plásticos infere no crescimento exponencial de sua produção. Segundo o *World Economic Forum* (2016), a produção de plástico aumentou entorno de vinte vezes entre 1964 a 2014, atingindo 311 milhões de toneladas em 2014 e a previsão é que esse número duplique em até 20 anos e quase quadruplique até 2050. Frente a isso não é exagero dizer que os plásticos apresentam uma participação significativa na realidade das pessoas, o que impacta diretamente na demanda do plástico e consequentemente nos itens de uso comum e diário como é o caso de alimentos, vestimentas, medicamentos entre outros. Esses materiais, em grande parte, são oriundos do petróleo e seus derivados, o que implica no acúmulo de resíduos de difícil degradação natural, caracterizando um aumento substancial de problemas ambientais relacionados à poluição e degradação do meio ambiente (RHODES, 2018).

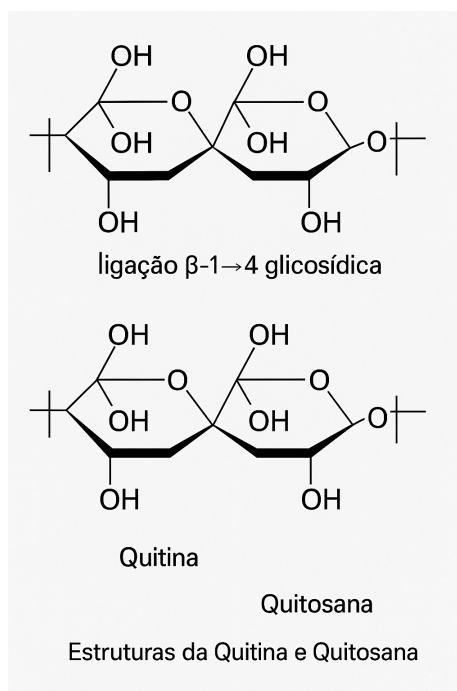
Em função dos problemas ambientais se torna interessante a procura de alternativas de elementos que apresentem uma substituição dos plásticos de origem sintética. Assim, produtos que apresentem processos menos agressivos, métodos de reciclagem e reaproveitamento de materiais, materiais biodegradáveis, métodos de tratamento de rejeitos e poluentes, como elementos de interesse pelos pesquisadores visando a diminuição do impacto ambiental (CASTRO, 2019). Consequentemente, a proposta do uso de materiais que se degradem mais facilmente ou que tem uma manufatura menos agressiva ao meio ambiente é um escopo de amplo interesse. Por tanto, um polímero que tem ganhado amplo reconhecimento é a quitosana, se destacando pela sua natureza funcional (LLANOS, 2018). A quitosana é um polímero obtido na desacetilação da quitina, composto naturalmente encontrado e extraída do exoesqueleto de crustáceos, entretanto também pode estar presente na parede celular de algumas espécies de fungos (RESENDE, 2016).

1.1 Quitosana

A quitosana (Qs) (2-amino-2-deoxi-D-glicopirranose) e a quitina (2-acetamido-2-deoxi-Dglicopirranose), são polissacarídeos biodegradáveis e atóxicos. A quitina que se encontra no exoesqueleto de crustáceos passa por processos de desmineralização, desproteínização, descoloração e desacetilação, até que seja obtida a quitosana (AZEVEDO et al., 2007).

A estrutura molecular do polímero de Qs é bastante semelhante à celulose, realizando uma ligação glicosídica $\beta(1-4)$. A depender da quantidade relativa e o grau de desacetilação da Qs existe a variação quanto a sua solubilidade, resistência a calor, torção, deformação, capacidade de retenção de água e demais fatores físico-químicos (AZEVEDO et al., 2007). A Qs é insolúvel em grande parte dos solventes de uso comum, porém, é solúvel em meio ácido, originando um polímero catiônico, oriundo da protonação do grupo amino (NH_3^+). Devido à alta densidade de cargas de natureza positiva que a Qs possui, confere-lhe a capacidade de formar ligações com moléculas de natureza negativa com facilidade.

Figura 1 – Representação das ligações químicas da quitina e quitosana.

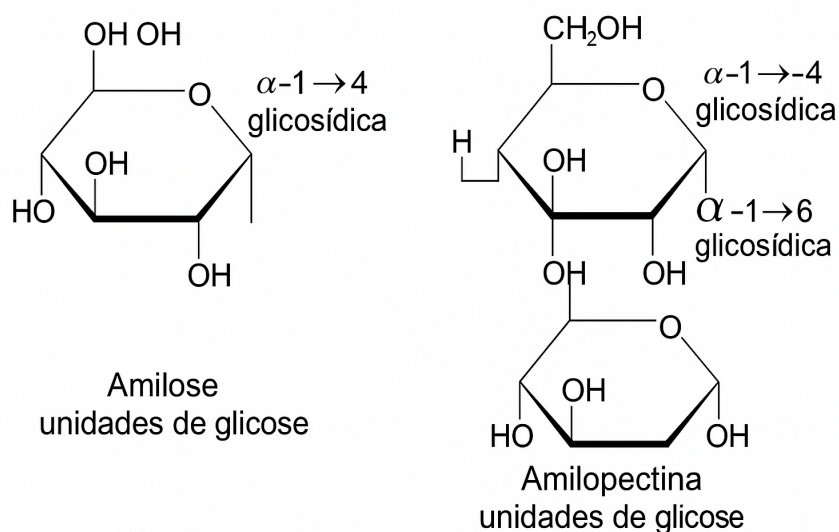


Fonte: Própria autoria.

1.2 Amido

O amido (St) se destaca como um dos biopolímeros mais versáteis e economicamente viáveis para aplicações em materiais sustentáveis (BULEON et al., 2020). Quimicamente, trata-se de um polissacarídeo de reserva energética vegetal, o qual é constituído por dois componentes principais: a amilose, formada por cadeias lineares de unidades de D-glicose conectadas por ligações α (1 $\rightarrow$ 4), e a amilopectina, caracterizada por sua estrutura altamente ramificada devido à presença adicional de ligações α (1 $\rightarrow$ 6). Essa arquitetura molecular única confere ao amido propriedades distintas, como a capacidade de gelatinização quando aquecido em meio aquoso, o qual é um comportamento desejável na formação de filmes e géis (BULEON et al., 2020).

Figura 2 – Representação das ligações químicas da amilose e amilopectina.



Fonte: Própria autoria.

Industrialmente, o amido é obtido principalmente de fontes como milho (~25% de amilose), batata (~20%) e mandioca (~17%), através de processos de moagem úmida seguidos por etapas de separação e purificação (GONÇALVES et al., 2019). Sua atratividade reside não apenas na abundância e renovabilidade, mas também na facilidade de modificação física e química. No entanto, o amido nativo apresenta desafios significativos quando usado no desenvolvimento de materiais com aplicações de embalagens devido a sua elevada hidrofilicidade resultando em filmes com excessiva permeabilidade ao vapor d'água, baixa resistência mecânica e

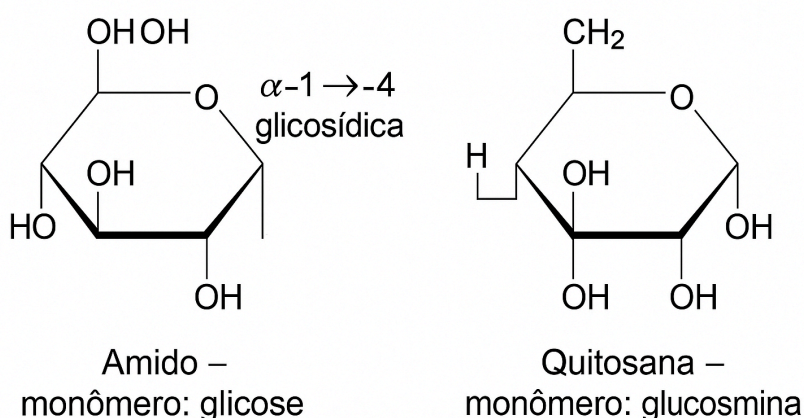
tendência à retrogradação (reordenamento molecular que leva à fragilização) limitando seu uso em diversas aplicações industriais (ZHU et al., 2018).

Para contornar essas limitações, estratégias como o desenvolvimento de blendas biopoliméricas para melhorar as interações das matrizes e a incorporação de plastificantes para melhorar as propriedades mecânicas têm sido amplamente investigadas (TAO et al., 2021). No contexto específico de filmes, a proporção entre amilose e amilopectina desempenha um papel crítico já que maiores teores de amilose inferem em maior resistência mecânica, enquanto a amilopectina favorece a flexibilidade (GONÇALVES et al., 2019). Além disso, processos como a termoplastificação e o *crosslinking* químico permitem ajustar propriedades como a solubilidade e a estabilidade térmica, possibilitando uma maior aplicação do amido em sistemas de embalagem e outras áreas industriais (LI et al., 2020).

1.3 Blendas Poliméricas

O desenvolvimento de sistemas poliméricos híbridos, emerge como uma estratégia de biopolímeros complementares se tornando uma abordagem promissora (ZHANG et al., 2021). As blendas constituídas por quitosana e amido destacam-se pela singular complementaridade das suas propriedades físico-químicas e pela versatilidade de aplicações.

Figura 3 – Representação dos monômeros do amido e da quitosana.



Fonte:Elaborado pelo autor (2025).

A combinação sinérgica tanto da quitosana como do amido permite superar muitas das limitações intrínsecas de cada componente de forma individual. Do ponto de vista molecular, a formação de complexos entre os grupos hidroxila do amido e os grupos amino da quitosana resulta em uma rede polimérica com propriedades mecânicas aprimoradas e maior estabilidade dimensional (ZHANG et al., 2021). Adicionalmente, a natureza catiônica da quitosana compensa a excessiva hidrofobicidade do amido, reduzindo significativamente a permeabilidade ao vapor d'água da blenda sem comprometer sua biodegradabilidade (MALINOVSKY et al., 2020).

A interação entre quitosana e amido nas blendas ocorre predominantemente por ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas, favorecidas pela proximidade entre os grupos funcionais das duas macromoléculas. As ligações de hidrogênio entre os grupos -OH do amido e os grupos -NH₂ da quitosana promovem a coesão da matriz, enquanto as interações iônicas são potencializadas em meio ácido, devido à protonação dos grupos amino da quitosana (ZHANG et al., 2021; LIU et al., 2019). Do ponto de vista morfológico, essas interações moleculares favorecem a formação de uma estrutura contínua e homogênea, com redução de falhas interfaciais e boa dispersão das fases poliméricas, o que contribui para propriedades mecânicas superiores e maior integridade do filme (TANG et al., 2020). A microestrutura mais densa e compacta das blendas, observada por técnicas como MEV, também está associada à menor permeabilidade e maior resistência à degradação em ambientes úmidos.

1.4 Aplicação de biopolímeros

Os biopolímeros têm se destacado como alternativas sustentáveis com diversas aplicações industriais que vão desde embalagens alimentícias até dispositivos biomédicos, inferindo-se desempenho técnico e biodegradabilidade (RIGGLEMAN et al., 2021). No setor de embalagens, filmes à base de quitosana e amido têm sido amplamente investigados devido à sua capacidade de formar barreiras seletivas a gases e umidade além das propriedades antimicrobianas, tornando-as embalagens ativas (SINGH et al., 2020). Estudos demonstram que blendas contendo entre 20 e 30% de quitosana podem reduzir em até 50% o crescimento de microrganismos como *E. coli* e *S. aureus* em embalagens para

carnes e queijos (PAIVA et al., 2019). Já o amido, por sua capacidade termoplástica, permite a produção de filmes flexíveis e transparentes, adequados para recobrimento de frutas e hortaliças (MALZONI et al., 2021).

Na área biomédica, a biocompatibilidade da quitosana a torna ideal para curativos avançados, sistemas de liberação controlada de fármacos e engenharia de tecidos. Sua capacidade de estimular a regeneração celular e controlar hemorragias já é explorada em géis hemostáticos e membranas para cicatrização (KHAN et al., 2020). O amido, por sua vez, tem sido utilizado como matriz porosa em *scaffolds* para cultura de células, graças à sua estrutura tridimensional e degradação controlada (HABITZREUTER et al., 2022).

O setor agrícola também se beneficia desses materiais, com aplicações em filmes de *mulching* biodegradáveis e sistemas de liberação lenta de fertilizantes. Comparados aos plásticos tradicionais, os filmes de biopolímeros se decompõem no solo entre 3 e 6 meses, evitando o acúmulo de resíduos (LU et al., 2018). Além disso, a quitosana age como estimulante natural no crescimento vegetal, aumentando a absorção de nutrientes pelas plantas (ZHANG et al., 2019).

Novas abordagens, como a incorporação de nanopartículas (ex.: celulose bacteriana) e o desenvolvimento de processos de extrusão contínua, estão sendo investigadas para superar essas barreiras. Com os avanços em tecnologias de processamento e a crescente demanda por soluções ecológicas, os biopolímeros se consolidam como materiais-chave para uma economia circular (SANTOS et al., 2021).

1.5 Análise Dinâmica Mecânica (DMA) e sua Importância na caracterização de Biopolímeros

A Análise Dinâmica Mecânica (DMA) é uma técnica fundamental para a caracterização de materiais poliméricos, sendo especialmente valiosa na avaliação das propriedades viscoelásticas dos biopolímeros. Através da aplicação de oscilações de força em uma amostra, o DMA permite obter informações detalhadas sobre a resposta do material a diferentes condições de temperatura, frequência e deformação (ALMEIDA; PEREIRA, 2018). Para biopolímeros como a quitosana e o amido, o DMA é uma ferramenta essencial para entender as interações intermoleculares, o comportamento mecânico e a estabilidade térmica desses

materiais, aspectos cruciais para seu uso em diferentes aplicações industriais, como no setor alimentício, farmacêutico e ambiental (SILVA et al., 2020).

A análise por DMA é particularmente útil para determinar a transição vítrea (T_g) da quitosana, que é uma característica chave na definição do seu comportamento mecânico. A transição vítrea está relacionada à temperatura à qual o material passa de um estado rígido e frágil para um estado mais flexível e viscoelástico (ALMEIDA; PEREIRA, 2018). Este comportamento é fundamental para a fabricação de filmes e membranas que devem ser processados a temperaturas específicas para otimizar suas propriedades de resistência e biodegradabilidade.

Em comparação, o amido, apresenta características viscoelásticas diferentes devido à sua estrutura molecular, assim o DMA permite avaliar as variações nas propriedades mecânicas do amido em função da temperatura, especialmente durante a gelatinização, onde as moléculas de amido se dispersam e absorvem água, alterando a rigidez do material. A DMA fornece informações sobre a temperatura de gelatinização, que pode ser correlacionada com a capacidade do amido de formar gel ou modificar sua textura em produtos alimentícios (SILVA et al., 2020).

A comparação entre a quitosana e o amido, através da técnica DMA, revela diferenças importantes em seu comportamento mecânico. A quitosana, por ser um polímero com alta cristalinidade e interações de hidrogênio fortes, tende a apresentar uma transição vítrea bem definida e temperaturas de transição mais altas do que o amido, que é mais flexível devido à sua estrutura amorfa e à presença de grupos hidrofílicos. No entanto, quando esses dois biopolímeros são misturados em blendas, como em filmes ou outros materiais híbridos, a DMA pode fornecer informações cruciais sobre a interação entre eles, como a formação de redes de interação e a modificação das propriedades mecânicas, como elasticidade, resistência e deformabilidade.

Segundo Almeida e Pereira (2018), as blendas de quitosana e amido, analisadas por DMA, apresentam um comportamento viscoelástico complexo, com transições de fase que podem indicar a formação de uma rede de interação entre as duas fases. O módulo de armazenamento (E') e o módulo de perda (E'') variam conforme a proporção entre os dois biopolímeros, e a análise dessas mudanças pode revelar informações importantes sobre a estabilidade das blendas, a

compatibilidade entre os biopolímeros e a possível melhoria das propriedades mecânicas do material final.

Além disso, a DMA é sensível à influência de modificações químicas ou à adição de aditivos, permitindo estudar a forma como esses fatores afetam a estrutura e o comportamento dos biopolímeros. A adição de plastificantes, por exemplo, pode reduzir a T_g da quitosana e do amido, aumentando a flexibilidade do material e modificando sua resposta à temperatura. Para blendas, a técnica pode revelar sinergias entre os biopolímeros, otimizando as propriedades mecânicas e ampliando as possíveis aplicações desses materiais.

Portanto, o objetivo deste trabalho é usar o DMA na caracterização da quitosana e do amido e suas blendas, permitindo a compreensão aprofundada das suas propriedades viscoelásticas, térmicas e mecânicas. Essa análise detalhada é crucial para o desenvolvimento de novos materiais e a otimização das propriedades dos biopolímeros para aplicações específicas.

2 METODOLOGIA

2.1 Produção de biogel e dos filmes

A produção de filmes biodegradáveis a partir de blendas de quitosana e amido foi realizada visando avaliar diversas concentrações e estabelecendo as melhores concentrações para propriedades finais dos filmes. Para a preparação da solução de quitosana, utilizou-se Qs com grau de desacetilação superior a 75%, dissolvido em solução de ácido acético 1% sob agitação constante à 800 rpm por 3 horas, seguido da adição de glicerol (20 g/100 g de Qs) como agente plastificante e homogeneização adicional por 2 horas. Após a solubilização, a dissolução foi filtrada em peneira com *mesh* de 80, duas vezes, para retirar possíveis grânulos que não foram solubilizados. Este protocolo assegurou a completa dissolução das cadeias poliméricas e a formação de um sistema homogêneo, com pH final aproximado de 3,5.

Figura 4 – a esquerda, gel de Quitosana pronto para formar filme e a esquerda, gel de amido em banho termostático com agitação.



Fonte: Própria autoria .

Paralelamente, a solução de amido (St) foi preparada através de gelatinização em água ultra-pura (concentração final de 5% m/v), com incorporação de glicerol na mesma proporção (20 g/100 g de amido). O processo de gelatinização foi conduzido em banho termostático a 90°C com agitação a 1000 rpm por 20 minutos, condições otimizadas para garantir a completa ruptura dos grânulos de amido e formação de uma matriz contínua. A temperatura controlada foi fundamental para evitar a

degradação térmica dos componentes, enquanto a agitação vigorosa promoveu a homogeneização do sistema.

As blendas foram formuladas em proporções específicas, como se ilustra na tabela 1, além dos controles individuais (100% amido e 100% quitosana). Após a preparação dos geis, as quantidades de cada gel foram pesadas, respeitando as proporções específicas de cada blenda, de modo a totalizar 68 g para cada amostra. As quantidades de gel de amido e quitosana foram ajustadas de acordo com as proporções desejadas para cada blenda. Cada combinação foi submetida a um processo padronizado de mistura (agitação magnética a 500 rpm por 1 hora), degaseificação em ultrassom (15 minutos), deposição em placas de Petri e secagem controlada (35°C por 48 horas). Este protocolo garantiu a reprodutibilidade entre amostras e permitiu a obtenção de filmes com espessura uniforme, conforme verificado por medição com micrômetro digital.

Tabela 1 – Composição das blendas e proporção de Quitosana (Qs) e Amido (St) nos filmes biopoliméricos

Identificação	Composição da Blenda	Proporção de gel incorporado nas blendas de Amido:Quitosana
Filme 1	Qs (1%)	0:1
Filme 2	St (5%)	1:0
Filme 3	St (1%) + Qs (2%)	2:1
Filme 4	St (1%) + Qs (1%)	1:1
Filme 5	St (1%) + Qs (1%)	1:2
Filme 6	St (5%) + Qs (1%)	2:1
Filme 7	St (5%) + Qs (1%)	1:1
Filme 8	St (5%) + Qs (1%)	1:2

Fonte: Própria autoria .

A escolha das proporções específicas baseou-se em estudos preliminares que indicam que a relação 1:1 tende a maximizar as interações moleculares entre os biopolímeros, enquanto as proporções assimétricas (1:2 e 2:1) permitem avaliar o efeito dominante de cada componente. A manutenção da concentração de glicerol constante em 20 g/100 g em todas as formulações eliminou esta variável como fator determinante na análise dos resultados.

Para a preparação dos filmes, foram depositados 68 g de cada solução (quitosana, amido e blenda) em placas de acrílico com dimensões de 12 × 12 cm. Posteriormente, as amostras foram submetidas à secagem em estufa de circulação de ar forçada a 30 °C durante 24 horas, garantindo a remoção gradual da água e a formação dos filmes.

Figura 5 – A esquerda, filme de quitosana 1% e a direita, filme de amido 5%.



Fonte: própria autoria (2025).

Após o processo de secagem, os filmes foram acondicionados em dessecador sob atmosfera controlada, com umidade relativa de 50%, por um período de 7 dias. Este procedimento teve como objetivo promover o equilíbrio higroscópico dos materiais, assegurando a estabilização de suas propriedades físico-químicas antes da realização dos ensaios.

2.2 Determinação da solubilidade dos filmes

De acordo com protocolo adaptado por BOURTOOM e CHINNAN (2008) Fragmentos de filme medindo 20 mm x 20 mm foram secos a 105°C na estufa de

circulação de ar forçada durante 24 h, para posterior pesagem e obtenção do peso inicial. Após os filmes foram imersos em 20 mL de água ultrapura em tubos falcon e colocados em agitação por 24 horas a 25 °C. Posteriormente a solução contendo o filme foi filtrada em papel filtro qualitativo, prosseguindo para secagem em estufa de circulação ar forçada a 105°C por 48 horas e seguida pesagem para obtenção do peso seco final. A matéria solúvel total foi calculada usando o peso bruto inicial e o peso seco final, seguindo a equação abaixo:

$$WS\% = \frac{\text{massa do peso seco inicial} - \text{massa do peso seco final}}{\text{massa do peso seco inicial}} \times 100 \quad (1)$$

2.3 Espessura dos filmes (micrômetro)

A espessura foi medida utilizando um micrômetro digital *Quantumike* da Mitutoyo com precisão de 0,001 mm feita em 5 lugares aleatórios do filme. A espessura foi reportada como média das 5 medições.

2.4 Propriedade óptica dos filmes

Adaptado de ZHANG; WANG; CHENG, 2018, a transparência e a transmissão de luz dos filmes foram obtidas utilizando um espectrofotômetro digital UV-VIS GTA-101 da *global analyzer* e analisando as amostras em um comprimento de onda de 200 - 800 nm, em atmosfera de ar.

A opacidade relativa dos filmes foi calculada a partir da razão entre a absorbância a 600 nm e a espessura (mm) de cada amostra, conforme equação abaixo:

$$\text{Opacidade relativa} = \left(\frac{\text{Abs}_{600\text{nm}}}{\text{Espessura}} \right)$$

$$\% \text{ Opacidade} = \left(\frac{\text{Abs}_{600\text{nm}}/\text{Espessura}}{\text{Valor Máximo}} \right) \times 100$$

Posteriormente, os valores foram normalizados em relação ao maior valor observado, atribuindo-se a este uma opacidade relativa de 100%.

2.5 Ângulo de contato

O ângulo de contato foi determinado utilizando um tensiômetro óptico *Theta Flow* (Biolin Scientific, Gotemburgo, Suécia) cada amostra foi medida em três pontos

aleatórios utilizando o *Sessil Drop Method* imediatamente após umedecimento da superfície. Utilizando como líquido referência água destilada. Todas as medições foram feitas a temperatura ambiente.

2.6 FTIR

A identificação e análise das estruturas químicas dos filmes foram realizadas por espectroscopia de infravermelho por transformada de *Fourier* (FTIR), utilizando o espectrofotômetro *IRAffinity-1S* (*Shimadzu*). As amostras, cortadas em dimensões aproximadas de 2,5 × 1,0 cm, foram posicionadas diretamente na célula de análise.

As medições foram realizadas na faixa espectral de 4000 a 600 cm⁻¹, com intervalos de varredura de 4 cm⁻¹, resolução de 4 cm⁻¹ e um total de 42 varreduras (scans) acumuladas para cada espectro. Esses parâmetros foram selecionados de forma a otimizar a relação sinal/ruído e garantir a adequada identificação dos grupos funcionais presentes nos filmes.

2.7 Análise dinâmica mecânica (DMA) dos filmes

A caracterização mecânica dos filmes foi realizada no DMA 850 (TA Instruments) em modo de tensão controlada. Para os ensaios, foram preparados 10 corpos de prova por filme, com dimensões padronizadas de 26×4×0,1 mm. Todos os corpos de prova foram condicionados a 25°C e 50% de umidade relativa (UR) por 48 horas antes da análise.

A análise foi conduzida a temperatura constante de 35 °C, a frequência foi estabelecida em 1 Hz, com força estática de 0,1 N e uma taxa de alongamento de 2 mm/min.

Os parâmetros termomecânicos (E', E'', tan δ) foram determinados pelo software TRIOS 5.2.1.

3 RESULTADOS

3.1 Solubilidade dos filmes

A solubilidade em água dos filmes poliméricos está fortemente associada à composição química, grau de interação entre os polímeros e à densidade da rede formada após a secagem. Filmes à base de quitosana geralmente apresentam solubilidade moderada devido à presença de grupos amino e hidroxila que promovem interações hidrofílicas, mas também formam redes por ligações de hidrogênio, o que limita sua dissolução completa. Em estudos prévios, valores típicos de solubilidade para filmes de quitosana a 1% foram relatados entre 15% e 25%, dependendo das condições de preparo e da plasticização (Santos et al., 2015; Kurek et al., 2014). O valor observado neste estudo ($22,35 \pm 2,18\%$) encontra-se dentro dessa faixa, o que confirma a consistência do método empregado.

Da mesma forma, os filmes de amido a 5% apresentaram solubilidade similar ($22,68 \pm 0,22\%$), comportamento compatível com o relatado na literatura, onde a solubilidade de filmes de amido pode variar de 20% a 30%, com tendência à redução em função do aumento da retrogradação ou cristalização parcial da matriz durante a secagem (Santiesteban et al., 2018).

A introdução de blendas resultou em variações mais significativas na solubilidade. A blenda 2:1 (St1%:Qs1%) apresentou valor próximo ao dos filmes puros ($22,77 \pm 5,06\%$), sugerindo compatibilidade entre os componentes sem alteração expressiva na rede polimérica. No entanto, a razão 1:1 ($27,43 \pm 2,48\%$) indicou um aumento da solubilidade, provavelmente associado à redução na densidade de empacotamento da rede polimérica e maior miscibilidade entre os polímeros, o que favorece a entrada de água. Já a blenda 1:2 ($19,57 \pm 1,66\%$) demonstrou diminuição da solubilidade, o que pode estar relacionado à maior presença de quitosana, cuja estrutura semicristalina e capacidade de formar interações intermoleculares reduz a solubilização em meio aquoso (Jin et al., 2017).

As blendas com amido a 5% e quitosana a 1% apresentaram comportamento mais pronunciado. A formulação 2:1 (St5%:Qs1%) mostrou a maior solubilidade entre todas as amostras ($42,63 \pm 3,23\%$), o que pode ser atribuído ao excesso relativo de amido solúvel e à menor proporção de quitosana, reduzindo a coesão da matriz. As formulações 1:1 ($20,70 \pm 5,85\%$) e 1:2 ($24,95 \pm 2,56\%$) apresentaram

valores mais moderados, próximos aos observados para os filmes puros, o que reforça a influência da proporção polimérica na estrutura final do material (Souza et al., 2020).

Tabela 2 – Solubilidade em água dos filmes de quitosana, amido e blendas.

Filme	Solubilidade (%) $\pm$ Desvio padrão
Cs (1%)	22,35 $\pm$ 2,18
St (5%)	22,68 $\pm$ 0,22
St(1%) + Cs (1%) (2:1)	22,77 $\pm$ 5,06
St (1%) + Cs (1%) (1:1)	27,43 $\pm$ 2,48
St (1%) + Cs (1%) (1:2)	19,57 $\pm$ 1,66
St (5%) + Cs (1%) (2:1)	42,63 $\pm$ 3,23
St (5%) + Cs (1%) (1:1)	20,70 $\pm$ 5,85
St (5%) + Cs (1%) (1:2)	24,95 $\pm$ 2,56

Fonte: Própria autoria .

3.2 Espessura dos filmes

Os resultados de espessura média dos filmes de biopolímeros são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Espessura média dos filmes de biopolímeros

Filme	Composição	Espessura (mm)
1	Cs (1%)	0,067 $\pm$ 0,016
2	St (5%)	0,080 $\pm$ 0,017
3	St(1%)+Cs(1%) - 2:1	0,050 $\pm$ 0,003
4	St(1%)+Cs(1%) - 1:1	0,036 $\pm$ 0,009

5	St(1%)+Cs(1%) - 1:2	0,067 ± 0,012
6	St(5%)+Cs(1%) - 2:1	0,171 ± 0,006
7	St(5%)+Cs(1%) - 1:1	0,119 ± 0,005
8	St(5%)+Cs(1%) - 1:2	0,121 ± 0,006

Fonte: Própria autoria .

A espessura média dos filmes obtidos apresentou variações significativas em função da formulação, especialmente quanto à concentração de amido e à proporção entre os polímeros. Os filmes com maior teor de amido (5%) resultaram em maiores espessuras, com destaque para o Filme 6 (amido 5% + quitosana 1%, na proporção 2:1), que apresentou valor médio de $0,171 \pm 0,006$ mm. Em contraposição, o Filme 4 (amido 1% + quitosana 1%, proporção 1:1) apresentou a menor espessura média, de $0,036 \pm 0,009$ mm. As demais formulações, especialmente aquelas com ambos os biopolímeros em concentração de 1%, resultaram em espessuras intermediárias, variando entre 0,050 e 0,067 mm.

Esse comportamento pode ser explicado com base nas propriedades físico-químicas dos biopolímeros utilizados. O amido, composto principalmente por amilopectina e amilose, possui estrutura ramificada e elevado peso molecular, o que aumenta a viscosidade da solução formadora de filme e, conseqüentemente, contribui para a formação de camadas mais espessas após a secagem (MALI et al., 2005; SOUZA; DITCHFIELD; TADINI, 2020). Já a quitosana, embora também seja um polímero de alto peso molecular, possui estrutura linear e maior afinidade para formar redes compactas com menor espessura quando utilizada em proporções mais altas (VIEIRA et al., 2011).

Além disso, a maior retenção de água pelas formulações com elevado teor de amido pode favorecer a formação de filmes mais espessos, uma vez que o volume depositado permanece maior mesmo após a evaporação parcial do solvente. Isso demonstra que a composição e a proporção entre os componentes influenciam diretamente a espessura final do material.

3.3 Propriedade óptica dos filmes de quitosana e amido

A opacidade dos filmes foi determinada com base na razão entre a absorbância a 600 nm e a espessura do material, conforme descrito na Tabela 4. Os resultados revelaram variações expressivas entre as formulações, influenciadas tanto pela natureza química dos biopolímeros quanto pela proporção de amido e quitosana utilizada.

O filme de amido a 5% apresentou elevada opacidade (90,76%), refletindo sua maior densidade ótica. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de regiões amorfas e cristalinas no amido, que promovem maior dispersão da luz incidente, especialmente quando o teor de sólidos na matriz é elevado (SOUZA; DITCHFIELD; TADINI, 2020). Por outro lado, o filme de quitosana a 1% apresentou opacidade de 40,14%, inferior à do amido, possivelmente devido à sua estrutura mais homogênea e menos refratária à luz visível, além de apresentar tonalidade amarelada característica, que interfere menos na absorbância a 600 nm (VIEIRA et al., 2011).

As blendas contendo amido a 1% e quitosana a 1% mostraram comportamento distinto conforme a proporção. A blenda 1:1 (St:Qs) apresentou o maior valor de opacidade relativa (147,31%), o que pode estar relacionado ao efeito sinérgico entre os polímeros na dispersão da luz, aliado à baixa espessura do filme, o que eleva o valor calculado da opacidade, já que filmes mais finos resultam em maiores razões de absorbância por unidade de espessura. Já a blenda 1:2 exibiu redução da opacidade para 57,04%, indicando que o aumento da quitosana — menos opaca — contribui para um filme mais translúcido. A formulação 2:1 (St:Qs) apresentou valor intermediário (116,99%), reforçando que o teor de amido é determinante na turbidez óptica da matriz.

Nas formulações com amido a 5%, o comportamento foi inverso: a blenda 2:1 (St5%:Qs1%) apresentou opacidade moderada (58,51%), enquanto a proporção 1:2 (St5%:Qs1%) teve a menor opacidade dentre as blendas (40,57%). Esse resultado pode ser atribuído à maior espessura dos filmes com maior teor de amido, o que dilui o efeito da absorbância relativa (MALI et al., 2005), além da maior homogeneidade proporcionada pela quitosana na matriz polimérica.

Tabela 4 - Valores de opacidade dos filmes de amido e quitosana

Formulação	Abs-600nm	Espessura (mm)	Abs/Esp.	% Opacidade
Cs (1%)	0,0548	0,067	0,818	40,14%
St (5%)	0,1479	0,080	1,849	90,76%
St (1%) + Cs (1%) – 2:1	0,1192	0,050	2,384	116,99%
St (1%) + Cs (1%) – 1:1	0,1080	0,036	3,000	147,31%
St (1%) + Cs (1%) – 1:2	0,0778	0,067	1,161	57,04%
St (5%) + Cs (1%) – 2:1	0,2038	0,171	1,192	58,51%
St (5%) + Cs (1%) – 1:1	0,1212	0,119	1,018	49,96%
St (5%) + Cs (1%) – 1:2	0,1001	0,121	0,827	40,57%

Fonte: Própria autoria .

3.4 Ângulo de contato

A determinação do ângulo de contato das diferentes formulações revelou variações consideráveis na molhabilidade superficial dos filmes (Tabela 5). O filme de quitosana a 1% apresentou o menor valor médio de ângulo de contato ($59,93 \pm 4,12^\circ$), o que indica elevada afinidade com a fase aquosa sob as condições experimentais adotadas. Em contraste, o filme de amido a 5% apresentou um valor significativamente maior ($94,12 \pm 3,94^\circ$), sugerindo menor molhabilidade superficial.

Embora a quitosana não seja, em termos absolutos, mais hidrofílica que o amido — visto que o amido contém uma maior densidade de grupos hidroxila — esse comportamento pode ser explicado pela estrutura mais aberta e porosa dos filmes de quitosana a 1%, que favorece maior absorção e espalhamento da gota na superfície, reduzindo o ângulo de contato (LIU et al., 2016). Além disso, filmes de amido a 5% tendem a formar estruturas mais densas e menos permeáveis, o que contribui para o aumento do ângulo observado (WANG et al., 2011).

As blendas entre amido e quitosana exibiram ângulos de contato ainda maiores que os filmes puros. Isso indica que a interação entre os polímeros promove modificações na organização superficial, possivelmente resultando em uma matriz mais compacta e com menor disponibilidade de grupos hidrofílicos livres na interface. O maior ângulo de contato foi observado para a blenda St(5%):Qs(1%) na proporção 2:1 ($111,56 \pm 9,15^\circ$), enquanto a menor entre as blendas foi registrada na formulação St(5%):Qs(1%) 1:2 ($92,93 \pm 2,96^\circ$), refletindo a maior presença relativa de quitosana nesta composição.

Esses dados sugerem que o comportamento de molhabilidade dos filmes depende fortemente da composição polimérica, da concentração de sólidos e da organização estrutural resultante do processo de secagem, mais do que da hidrofobicidade teórica dos biopolímeros isolados.

Tabela 5 - Ângulos de contato médios das diferentes formulações de filmes de amido e quitosana

Composição	Ângulo de Contato ($^\circ$)	Desvio Padrão
Cs (1%)	59,93	$\pm 4,12$
St (5%)	94,12	$\pm 3,94$
St(1%)+Cs(1%) - 2:1	98,79	$\pm 6,25$
St(1%)+Cs(1%) - 1:1	102,08	$\pm 2,33$
St(1%)+Cs(1%) - 1:2	100,54	$\pm 5,77$
St(5%)+Cs(1%) - 2:1	111,56	$\pm 9,15$
St(5%)+Cs(1%) - 1:1	96,86	$\pm 7,66$
St(5%)+Cs(1%) - 1:2	92,93	$\pm 2,96$

Fonte: Própria autoria .

3.5 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

A análise dos espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) revelou as principais características estruturais dos filmes de biopolímeros de quitosana, amido e suas blendas.

Os filmes de quitosana pura apresentaram bandas características em aproximadamente 3420 cm^{-1} , atribuídas às vibrações de estiramento das ligações O–H (hidroxilas) e N–H (grupos amina). A presença de uma banda em 1650 cm^{-1} corresponde à vibração de estiramento C=O da amida I, enquanto o pico em 1590 cm^{-1} está relacionado à deformação angular da ligação N–H (amida II). Foram ainda observadas bandas em torno de 1420 cm^{-1} e 1370 cm^{-1} , associadas às vibrações de deformação C–H, e uma banda proeminente em 1070 cm^{-1} , atribuída às vibrações C–O–C dos grupos glicosídicos.

O espectro de infravermelho do amido puro apresentou uma banda larga e intensa centrada em aproximadamente 3400 cm^{-1} , característica das vibrações de estiramento dos grupos hidroxila (O–H) presentes em abundância nas unidades de glicose do amido. Essa banda é também amplamente atribuída à presença de água absorvida ou água ligada, resultante da higroscopicidade natural do polímero (KIZIL et al., 2002; ZHANG et al., 2005).

Na região de 2920 cm^{-1} , foi observada uma banda atribuída às vibrações de estiramento assimétrico do grupo metileno ($-\text{CH}_2$), presente na estrutura dos anéis de glicopirranose (XIE et al., 2006). Essa absorção é típica em polímeros naturais e representa a movimentação axial das ligações C–H em cadeias alifáticas.

Entre 1150 e 1000 cm^{-1} , o espectro apresentou múltiplas bandas atribuídas às vibrações de estiramento das ligações C–O, C–C e C–O–C das unidades de glicose α -(1 $\rightarrow$ 4) e α -(1 $\rightarrow$ 6) do amido. Essa região é considerada o “fingerprint” característico dos polissacarídeos, e reflete diretamente a conformação helicoidal da estrutura (CIACCO et al., 1989; SINGH et al., 2006).

Nas blendas de quitosana e amido, as principais bandas atribuídas a ambos os biopolímeros foram mantidas, indicando a ausência de formação de novas ligações covalentes entre as cadeias poliméricas. No entanto, foram observadas alterações na intensidade relativa e leves deslocamentos em algumas bandas, o que sugere a ocorrência de interações intermoleculares, especialmente ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila do amido e os grupos amina da quitosana.

Tabela 6 – Atribuição das principais bandas observadas nos espectros de FTIR dos filmes de quitosana, amido e blendas.

Comprimento de Onda (cm ⁻¹)	Atribuição Vibracional	Referência de Material
~3420	Estiramento O–H e N–H (ligações de hidrogênio)	Quitosana e Amido
~2920	Estiramento C–H (grupos metileno)	Amido
~1650	Estiramento C=O (Amida I)	Quitosana
~1590	Deformação angular N–H (Amida II)	Quitosana
~1420	Deformação C–H (grupos metileno e metina)	Quitosana e Amido
~1370	Deformação simétrica de C–H	Quitosana
1150–1000	Estiramento C–O, C–C, C–O–C	Amido e Quitosana
~1070	Vibração C–O–C do anel glicosídico	Quitosana e Amido
~890	Estiramento de ligação C–H em carboidratos	Amido

Fonte: Própria autoria .

3.6 Análise dinâmica mecânica dos filmes de amido e quitosana

A Tabela 7 apresenta os valores médios de resistência à tração e alongação na ruptura obtidos para as diferentes formulações dos filmes de amido (St), quitosana (Cs) e suas blendas.

Tabelas 7. Propriedades mecânicas dos filmes de biopolímeros: resistência à tração e alongação na ruptura

Filme	Composição	Resistência à Tração (MPa)	Elongação na Ruptura (%)
1	Cs (1%)	11,12 ± 3,48	42,02 ± 13,90

2	St (5%)	14,30 ± 5,63	7,83 ± 2,67
3	St(1%)+Cs(1%) - 2:1	6,98 ± 2,04	49,23 ± 14,35
4	St(1%)+Cs(1%) - 1:1	17,31 ± 6,25	40,03 ± 11,70
5	St(1%)+Cs(1%) - 1:2	14,68 ± 4,77	54,67 ± 13,84
6	St(5%)+Cs(1%) - 2:1	14,03 ± 5,65	49,19 ± 14,34
7	St(5%)+Cs(1%) - 1:1	5,93 ± 1,19	56,82 ± 16,54
8	St(5%)+Cs(1%) - 1:2	10,57 ± 1,99	56,67 ± 16,36

Valores apresentados como média ± desvio padrão (n=3) Proporções indicam relação mássica entre os componentes

Fonte: Própria autoria .

Os resultados evidenciam uma variação considerável nas propriedades mecânicas dos filmes em função da composição e proporção entre os biopolímeros. O filme de amido a 5% (Filme 2) apresentou a maior resistência à tração média (14,30 MPa), seguido pelas blendas com proporção 1:1 de St e Cs (Filme 4), que atingiu 17,31 MPa. Em contrapartida, a maior elongação na ruptura foi observada nas formulações com amido a 5% em combinação com quitosana (Filmes 7 e 8), superando 56%.

4 DISCUSSÃO

4.1 Testagem de solubilidade

De maneira geral, observou-se que a solubilidade dos filmes foi influenciada tanto pela concentração dos biopolímeros quanto pela proporção entre amido e quitosana. Resultados semelhantes foram relatados por Sánchez-González et al. (2011), que demonstraram que a interação entre polissacarídeos e a estrutura do filme impacta significativamente a absorção de água e a solubilidade.

O comportamento similar entre os filmes puros de quitosana (1%) e amido (5%) sugere que, nas concentrações empregadas, ambos possuem estruturas que oferecem resistência equivalente à dissolução em água. De acordo com Souza et al. (2019), filmes de amido tendem a ser altamente hidrofílicos, mas a densidade da rede polimérica pode reduzir a absorção de água, comportamento também observado em filmes de quitosana.

Nas blendas contendo amido a 1%, a maior solubilidade observada na blenda 1:1 pode estar relacionada a um equilíbrio entre grupos hidrofílicos (hidroxilas do amido e amino da quitosana) e a rede polimérica, favorecendo a difusão de água, como também observado por Gómez-Estaca et al. (2009). Já a diminuição da solubilidade na blenda 1:2 (excesso de quitosana) pode ser atribuída à maior formação de ligações de hidrogênio intercadeias, reduzindo a disponibilidade dos grupos hidroxilas para interação com a água (Vieira et al., 2011).

O comportamento distinto nas blendas com amido a 5% destaca a influência da maior concentração de amido, um polímero hidrofílico (Pérez-Gago e Krochta, 2001). A blenda 2:1 (predominância de amido) exibiu um aumento expressivo da solubilidade, provavelmente devido à maior disponibilidade de grupos hidroxila livres para interação com moléculas de água. No entanto, quando a proporção de quitosana aumenta (1:1 e 1:2), a solubilidade reduziu, evidenciando novamente o efeito estruturante da quitosana, conforme descrito em estudos recentes (Santos et al., 2020).

Os resultados obtidos indicam que o ajuste da proporção entre quitosana e amido permite modular a solubilidade dos filmes. Este aspecto pode ser relevante para aplicações em embalagens biodegradáveis e sistemas de liberação controlada, onde diferentes graus de solubilidade podem ser desejáveis (Rhim et al., 2013).

4.2 Espessura dos filmes de amido e quitosana

Os dados revelaram variações significativas na espessura entre as diferentes formulações. Os filmes contendo maior concentração de amido (5%) apresentaram os maiores valores de espessura, destacando-se o Filme 6 (St(5%) + Cs(1%) na proporção 2:1), com espessura de $0,171 \pm 0,006$ mm. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da quantidade de sólidos dispersos na matriz, resultando em maior acúmulo de material durante o processo de formação do filme, conforme descrito por Sothornvit e Krochta (2000). Em contraste, o Filme 4 (St(1%) + Cs(1%) - 1:1) apresentou a menor espessura média ($0,036 \pm 0,009$ mm), o que pode ser explicado pela menor concentração de sólidos e pela maior eficiência na compactação da rede polimérica (PEREDA et al., 2011). As formulações intermediárias, particularmente aquelas preparadas com concentrações de 1% de ambos os biopolímeros, apresentaram valores de espessura entre 0,050 e 0,067 mm.

De acordo com Zhang et al. (2016), filmes com menor espessura tendem a apresentar melhor transparência e maior rigidez, enquanto filmes mais espessos podem ter maior resistência mecânica, mas menor flexibilidade. Esse equilíbrio entre espessura e propriedades físicas é crucial para a otimização dos filmes em aplicações específicas, como embalagens biodegradáveis ou sistemas de revestimento. A diferença nas espessuras também pode refletir a interação entre os componentes da blenda, visto que a quitosana, por formar redes poliméricas mais densas devido às interações via ligações de hidrogênio, tende a reduzir a espessura dos filmes quando presente em maior proporção, como indicado por Gómez-Estaca et al. (2009).

Esses resultados reforçam a importância do controle das proporções e concentrações dos biopolímeros na modulação das propriedades estruturais dos filmes. A espessura influencia diretamente não apenas aspectos visuais, como transparência e aparência superficial, mas também propriedades mecânicas e funcionais, o que torna o seu controle essencial para atender às exigências específicas de aplicações finais. Portanto, o ajuste preciso da formulação permite o desenvolvimento de materiais com desempenho otimizado para fins específicos,

como barreiras para umidade ou resistência ao manuseio, destacando a versatilidade tecnológica das blendas de amido e quitosana.

4.3 Propriedade óptica

A elevada transparência observada na formulação com quitosana pura (Cs 1%) pode ser atribuída à estrutura homogênea e contínua do polímero, associada à baixa densidade óptica do material. A quitosana, por apresentar coloração amarelada natural e boa distribuição de sua cadeia polimérica, favorece a transmissão da luz com mínima dispersão (SÁNCHEZ-GONZÁLEZ et al., 2010). Em contrapartida, a formulação St (1%) + Cs (1%) – 1:1, que apresentou a maior opacidade, sugere a presença de microdomínios poliméricos gerados pela imiscibilidade parcial entre o amido e a quitosana, que causam variações locais no índice de refração e aumentam a dispersão da luz (JAVID et al., 2021).

O aumento da opacidade em formulações com maior teor de amido, como na St (5%) + Cs (1%) – 2:1, pode ser explicado pela presença de regiões amorfas características do amido, que são menos organizadas e promovem maior dispersão da luz (MALI et al., 2004). Além disso, filmes mais espessos aumentam o caminho óptico percorrido pela luz, resultando em maior absorção e menor transmissão (PÉREZ-GAGO; KROCHTA, 2001).

Portanto, os resultados indicam que filmes mais transparentes podem ser obtidos com maiores proporções de quitosana e espessura reduzida, sendo apropriados para aplicações em embalagens onde a visibilidade do conteúdo é desejada. Por outro lado, filmes com maior espessura e proporção de amido se mostram mais opacos, sendo potencialmente úteis como barreiras ópticas em aplicações que exigem proteção contra radiação, como em embalagens de produtos fotossensíveis.

4.4 Ângulo de contato

A determinação do ângulo de contato revelou variações significativas na molhabilidade superficial dos filmes, conforme apresentado na Tabela 5. O filme de quitosana a 1% apresentou o menor valor médio de ângulo de contato ($59,93 \pm 4,12^\circ$), indicando elevada afinidade com a fase aquosa nas condições

experimentais. Em contraste, o filme de amido a 5% registrou um valor consideravelmente maior ($94,12 \pm 3,94^\circ$), sugerindo menor molhabilidade.

Embora o amido possua uma maior densidade de grupos hidroxila (-OH), a maior afinidade da quitosana pela água pode ser atribuída à estrutura mais aberta e porosa dos filmes, que favorece a absorção e o espalhamento da gota sobre a superfície (LIU et al., 2016). Já os filmes de amido a 5% tendem a formar estruturas mais densas e menos permeáveis, contribuindo para o aumento do ângulo de contato (WANG et al., 2011).

As blendas preparadas com amido a 1% e quitosana a 1% apresentaram ângulos de contato intermediários e superiores aos dos filmes puros, variando de $98,79 \pm 6,25^\circ$ (blenda 2:1) a $102,08 \pm 2,33^\circ$ (blenda 1:1). A blenda na proporção 1:2 apresentou ângulo ligeiramente inferior ($100,54 \pm 5,77^\circ$), ainda assim superior ao do filme de amido puro.

Para as formulações contendo amido a 5% e quitosana a 1%, os ângulos de contato foram ainda mais elevados. O maior valor foi observado na proporção 2:1 ($111,56 \pm 9,15^\circ$), enquanto as proporções 1:1 e 1:2 apresentaram ângulos de $96,86 \pm 7,66^\circ$ e $92,93 \pm 2,96^\circ$, respectivamente.

Esses resultados evidenciam que a hidrofobicidade dos filmes aumentou com o incremento do teor de amido nas formulações. Isso ocorre devido à menor afinidade do amido com a água, especialmente quando presente em maiores concentrações, o que promove uma organização estrutural mais compacta e reduz a disponibilidade de grupos hidrofílicos na superfície (Bourtoom, 2008; Azeredo, 2009; Jiménez et al., 2012).

As interações entre amido e quitosana nas blendas também influenciaram a molhabilidade dos filmes. A maior proporção de quitosana favorece o caráter hidrofílico, reduzindo o ângulo de contato, enquanto o aumento do teor de amido promove elevação da hidrofobicidade. Isso sugere que a organização superficial dos filmes não depende apenas da hidrofobicidade teórica dos biopolímeros, mas também da composição, concentração de sólidos e características morfológicas adquiridas durante a secagem.

Esses achados são relevantes para o direcionamento das aplicações dos filmes: formulações mais hidrofóbicas são desejáveis em embalagens com barreira à umidade, enquanto superfícies mais hidrofílicas podem ser mais apropriadas em

sistemas de liberação controlada ou em filmes biodegradáveis com maior interação com o meio aquoso (Sothornvit & Krochta, 2005).

4.5 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

De forma geral, o aumento da concentração de amido nas blendas resultou em uma maior intensidade relativa das bandas características do amido, especialmente na região entre $1150\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$, associada às vibrações de estiramento C–O, C–C e C–O–C das unidades de glicose (Santos et al., 2019; Liu et al., 2020). Em contrapartida, as bandas correspondentes aos grupos amida da quitosana (1650 cm^{-1} e 1590 cm^{-1}) apresentaram redução de intensidade, sugerindo uma possível interação preferencial do amido com os grupos funcionais da quitosana, particularmente os grupos amina e hidroxila (Khan et al., 2018; Yao et al., 2021).

Essa interação, presumivelmente mediada por ligações de hidrogênio, é um fenômeno bem documentado em sistemas de blendas poliméricas, e pode induzir uma reorganização da rede intermolecular sem modificar as estruturas fundamentais dos polímeros (Zhao et al., 2020). Essa reorganização pode afetar as propriedades físico-químicas, como as mecânicas e as de barreira, contribuindo para uma modificação no comportamento dos filmes, como evidenciado por estudos similares com blendas de biopolímeros (Cai et al., 2017; Zeng et al., 2021).

As atribuições das principais bandas observadas nos espectros de FTIR corroboram a presença dos grupos funcionais característicos, tanto da quitosana quanto do amido nas amostras. Indicando a formação de sistemas poliméricos mistos com interações físicas predominantes, sem a ocorrência de reações químicas covalentes entre os componentes (Maneerung et al., 2018; Wu et al., 2022).

4.6 Análise dinâmica mecânica dos filmes de amido e quitosana

A caracterização mecânica dos filmes de amido e quitosana, realizada por meio da análise dinâmica mecânica (DMA), evidenciou uma clara influência da composição e proporção dos biopolímeros sobre as propriedades mecânicas. Os resultados mostraram que filmes compostos exclusivamente por quitosana a 1% apresentaram resistência à tração de $11,12 \pm 3,48\text{ MPa}$ e alongação na ruptura de $42,02 \pm 13,90\%$, refletindo um comportamento mais flexível. Este comportamento é

característico da quitosana devido à sua estrutura semicristalina e às interações intermoleculares entre os grupos amino e hidroxila. Esse comportamento da quitosana foi descrito por Bourtoom (2008), que relatou que as interações de hidrogênio entre os grupos funcionais da quitosana contribuem para a formação de redes poliméricas flexíveis e coesas.

Em contraste, os filmes de amido a 5% apresentaram maior resistência à tração ($14,30 \pm 5,63$ MPa), mas com uma elongação na ruptura significativamente inferior ($7,83 \pm 2,67\%$), evidenciando a rigidez do amido em concentrações mais elevadas. Esse aumento na resistência está relacionado à maior cristalinidade do amido em concentrações elevadas, o que favorece a formação de redes mais rígidas. Esse fenômeno também foi observado por Jiménez et al. (2012), que destacaram que o amido em concentrações mais altas tende a formar redes mais densas, comprometendo a flexibilidade e aumentando a rigidez do material.

As blendas de amido a 1% e quitosana a 1%, nas proporções 2:1, 1:1 e 1:2, apresentaram comportamentos intermediários. A proporção 1:1, em particular, destacou-se como a mais equilibrada em termos de resistência e flexibilidade, com resistência à tração de $17,31 \pm 6,25$ MPa e elongação de $40,03 \pm 11,70\%$. Esse comportamento sugere que a interação entre os biopolímeros, como as pontes de hidrogênio entre os grupos hidroxila do amido e os grupos amino da quitosana, otimiza as propriedades mecânicas dos filmes. Bourtoom (2008) relatou que a formação de pontes de hidrogênio entre amido e quitosana é crucial para o desenvolvimento de filmes com características mecânicas balanceadas, uma vez que essas interações aumentam a coesão da rede polimérica, resultando em maior resistência e flexibilidade.

Com relação às proporções de amido a 5%, observou-se um aumento na elongação na ruptura, com valores superiores a 56% nas formulações 1:1 e 1:2. No entanto, essa maior deformabilidade foi acompanhada de uma redução na resistência mecânica, especialmente na formulação 1:1, com resistência de $5,93 \pm 1,19$ MPa. Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito termoplástico do amido em concentrações elevadas, que facilita a mobilidade das cadeias poliméricas, mas compromete a rigidez estrutural. De acordo com Jiménez et al. (2012), a maior flexibilidade observada em amidos mais concentrados pode ser atribuída ao aumento na mobilidade molecular do material, que permite maior deformação, mas com o custo da perda de resistência.

Em conclusão, as blendas de amido e quitosana demonstram um grande potencial para o desenvolvimento de materiais com características ajustáveis de resistência e flexibilidade, o que pode ser explorado em diversas aplicações, incluindo embalagens biodegradáveis. A proporção 1:1 de amido e quitosana apresentou o melhor equilíbrio entre resistência e flexibilidade, evidenciando que a escolha da proporção correta de biopolímeros é crucial para a otimização das propriedades mecânicas dos filmes. Estudos como o de Bourtoom (2008) corroboram essa ideia, sugerindo que a modulação da proporção de biopolímeros pode gerar materiais com características mecânicas desejáveis, com ampla aplicabilidade no desenvolvimento de produtos sustentáveis.

Este estudo sugere que a modulação das propriedades dos filmes pode ser alcançada por meio da combinação estratégica de amido e quitosana, ampliando suas possibilidades de uso em materiais sustentáveis. Além disso, pode-se esperar que, à medida que a compreensão das interações entre os biopolímeros avance, seja possível melhorar ainda mais as propriedades mecânicas desses filmes, aumentando sua aplicabilidade em diferentes áreas, como alimentos, farmacêutica e embalagens sustentáveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta desenvolvida neste trabalho, que envolveu a caracterização e avaliação de filmes biodegradáveis à base de quitosana e amido, os filmes de amido e quitosana mostraram que a combinação das proporções desses biopolímeros têm grande influência nas suas propriedades físicas e mecânicas. A solubilidade foi afetada pela interação entre os biopolímeros, sendo maior nas blendas com maior proporção de amido, o que reflete as interações hidrofílicas entre amido e quitosana. Quanto à espessura, os filmes com maior concentração de amido (5%) apresentaram maiores valores, enquanto as formulações com menor concentração de amido foram mais finas, conforme esperado pela compactação da rede polimérica.

Em relação às propriedades ópticas, os filmes com maior proporção de quitosana (1%) exibiram maior transparência, enquanto as formulações com mais amido (5%) foram mais opacas, adequadas para aplicações como barreiras ópticas. A análise do ângulo de contato demonstrou que o aumento da concentração de amido elevou a hidrofobicidade dos filmes, enquanto a presença de quitosana aumentou a molhabilidade.

A análise dinâmica mecânica revelou que a proporção 1:1 de amido e quitosana proporcionou um bom equilíbrio entre resistência à tração e alongação, indicando um potencial promissor para aplicações que exigem resistência e flexibilidade, como embalagens biodegradáveis. A modulação das propriedades mecânicas, como resistência e flexibilidade, pode ser otimizada com a escolha estratégica das proporções de biopolímeros.

Em resumo, este estudo demonstra que a combinação de amido e quitosana oferece flexibilidade na modulação das propriedades dos filmes, permitindo seu uso em uma variedade de aplicações, como embalagens sustentáveis e sistemas de liberação controlada.

Futuras pesquisas podem explorar mais a fundo as condições de processamento, como a variação da temperatura e umidade, bem como a adição de agentes plastificantes ou outros biopolímeros, para melhorar ainda mais as propriedades dos filmes e expandir seu campo de aplicação. Além disso, a análise da biodegradabilidade e da interação dos filmes com o meio ambiente será crucial

para validar sua sustentabilidade e viabilidade em processos industriais de longo prazo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. F.; PEREIRA, C. R. Estudo das propriedades mecânicas de biopolímeros através de análise dinâmico-mecânica. ****Revista Brasileira de Polímeros****, v. 21, n. 3, p. 123-134, 2018.

AZEREDO, H. M. C. Nanocomposites for food packaging applications. ****Food Research International****, v. 42, p. 1240–1253, 2009.

AZEREDO, H. M. C. Nanocompósitos de polissacarídeos para aplicações em embalagens biodegradáveis. ****Química Nova****, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 757–763, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300027>. Acesso em: 20 out. 2023.

AZEVEDO, V. V. C.; CHAVES, S. A.; BEZERRA, D. C.; FOOK, M. V. L.; COSTA, A. C. F. M. Quitina e Quitosana: aplicações como biomateriais. ****Revista Eletrônica de Materiais e Processos****, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 27-34, 2007. Disponível em: https://www2.ibb.unesp.br/Museu_Escola/4_diversidade/alimentacao/Textos/Quitina_Quitosa.pdf. Acesso em: 20 out. 2023.

BANDIERA, P. M.; ALMEIDA, F. F.; COSTA, F. D. Mechanical and barrier properties of biodegradable films made from starch and chitosan. ****International Journal of Biological Macromolecules****, v. 151, p. 553-560, 2020.

BERGSTRÖM, M. et al. Propriedades antimicrobianas e biocompatibilidade de filmes de quitosana. ****Carbohydrate Polymers****, v. 155, p. 308-316, 2017.

BOURTOOM, T. Edible films and coatings: characteristics and properties. ****International Food Research Journal****, v. 15, p. 237–248, 2008.

BOURTOOM, T. Properties of biodegradable films from starch and chitosan. ****Journal of Food Science****, v. 73, n. 9, p. 124-133, 2008.

BOURTOOM, T. Factors affecting the properties of edible film prepared from mung bean proteins. ****International Food Research Journal****, Selangor, v. 15, n. 2, p. 167–180, 2008.

BULEON, A. et al. Amido: Estrutura e funcionalidade. ****Carbohydrate Polymers****, v. 235, p. 115-122, 2020.

CASTRO, Thais Hessab Moreira de. ****OS BIOPLÁSTICOS: IMPACTOS AMBIENTAIS E PERSPECTIVAS DE MERCADO****. 2019. 72 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Thais_Hessab._MESTRADO_2019.pdf. Acesso em: 20 out. 2023.

CORRÊA, A. et al. Interações moleculares e propriedades funcionais de blendas de quitosana e amido. ****International Journal of Biological Macromolecules****, v. 129, p. 102-111, 2019.

GÁNAN, M.; PÉREZ, C.; PÉREZ, M. Influence of processing conditions on the mechanical properties of chitosan-based films. ****Carbohydrate Polymers****, v. 164, p. 174-183, 2017.

GÓMEZ-ESTACA, J. et al. Active antioxidant edible films based on fish gelatin and gelatin hydrolysate incorporated with *origanum vulgare* extract. ****Food Hydrocolloids****, v. 23, p. 1462–1470, 2009.

GÓMEZ-ESTACA, J. et al. Biodegradable gelatin–chitosan films incorporated with essential oils as antimicrobial agents for fish preservation. ****Food Microbiology****, v. 26, n. 5, p. 482–490, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.01.003>

GONÇALVES, A. et al. Propriedades mecânicas e de flexibilidade em filmes de amido e quitosana. ****International Journal of Biological Macromolecules****, v. 125, p. 870-878, 2019.

JIMÉNEZ, A. et al. Characterization of chitosan-based films: Thermal, mechanical, and barrier properties. ****Carbohydrate Polymers****, v. 89, n. 4, p. 981-987, 2012.

JIMÉNEZ, A. et al. Effect of lipid incorporation on mechanical and optical properties of hydroxypropylmethylcellulose films for food packaging. ***Food Hydrocolloids***, Amsterdam, v. 26, n. 1, p. 302–310, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.011>.

KHAN, A.; ALI, A.; AHMAD, M. Characterization of starch and chitosan blends using FTIR spectroscopy. ***International Journal of Biological Macromolecules***, v. 118, p. 964-971, 2018.

KHAN, S. et al. Quitosana em sistemas de liberação controlada e curativos biomédicos. ***Journal of Biomedical Materials Research***, v. 44, n. 4, p. 112-123, 2020.

KUREK, M. et al. Characterization and evaluation of chitosan-based films with different essential oils. ***Food Hydrocolloids***, v. 35, p. 126–134, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.05.014>

LI, H. et al. Modificação química e termoplástica de amido para aplicações em filmes. ***Food Hydrocolloids***, v. 106, p. 105-113, 2020.

LOPEZ, L. et al. Propriedades mecânicas de filmes de amido e seus desafios de permeabilidade. ***Food Hydrocolloids***, v. 109, p. 106-115, 2020.

LÓPEZ, S. et al. Estrutura e modificações do amido para aplicações tecnológicas. ***Starch/Stärke***, v. 70, p. 290-297, 2018.

LU, Y. et al. Biodegradabilidade de filmes de biopolímeros no solo: Comparação com plásticos convencionais. ***Environmental Science & Technology***, v. 52, n. 8, p. 4563-4572, 2018.

MALI, S. et al. Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect. ***Carbohydrate Polymers***, v. 60, n. 3, p. 283–289, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.01.003>

MALINOVSKY, A. et al. Efeito da quitosana sobre a permeabilidade e biodegradabilidade de blendas com amido. ****Journal of Polymers and the Environment****, v. 28, n. 3, p. 184-193, 2020.

MALZONI, L. et al. Propriedades termoplásticas de filmes de amido para recobrimento de alimentos. ****Journal of Food Science and Technology****, v. 58, n. 3, p. 873-882, 2021.

PAIVA, P. et al. Propriedades antimicrobianas de filmes à base de quitosana para embalagem de alimentos. ****Food Control****, v. 101, p. 1-9, 2019.

PÉREZ-GAGO, M. B.; KROCHTA, J. M. Water vapor permeability of whey protein emulsion films as affected by pH, emulsion droplet size and lipid content. ****Journal of Agricultural and Food Chemistry****, v. 49, p. 5560–5567, 2001.

PÉREZ-GAGO, M. B.; KROCHTA, J. M. Water vapor permeability of whey protein-based edible films as affected by pH, glycerol content and lipid content. ****Journal of Food Science****, v. 66, n. 7, p. 945–948, 2001.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb08219.x>

PEREDA, M. et al. Chitosan-gelatin composites and bi-layer films with potential as biodegradable packaging. ****Food Hydrocolloids****, v. 25, p. 1372–1381, 2011.

PEREDA, M. et al. Pectin-based films with potential antimicrobial properties. ****Food Hydrocolloids****, v. 25, n. 5, p. 1372–1380, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.12.005>

RESENDE, Rodrigo Ribeiro. ****Biotecnologia Aplicada à Agro&Indústria: Fundamentos e aplicações****. [S. l.]: Edgard Blücher Ltda., 2016. 1069 p. v. 4. ISBN 978-85-212-1115-0. Disponível em:
<https://openaccess.blucher.com.br/article-list/biotecnologia-aplicada-a-agro-e-industria-326/list#undefined>. Acesso em: 20 out. 2023.

RHIM, J. W. et al. Preparation and characterization of chitosan-based nanocomposite films with antimicrobial activity. ****Food Hydrocolloids****, v. 33, p. 118–126, 2013.

RIGGLEMAN, J. et al. Biopolímeros: Alternativas sustentáveis e ecológicas no setor industrial. ****Green Materials****, v. 9, n. 4, p. 31-44, 2021.

SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, L. et al. Physical and antimicrobial properties of chitosan–tea tree essential oil composite films. ****Journal of Food Engineering****, v. 98, n. 4, p. 443–452, 2011.

SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, L. et al. Characterization of edible films based on hydroxypropylmethylcellulose and chitosan: effect of oil inclusion. ****Food Hydrocolloids****, v. 24, n. 4, p. 306–313, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.10.012>

SANTIESTEBAN, L. F.; COVA, A.; MARANGONI, A. G. Water sensitivity of starch-based films: A review. ****Starch/Stärke****, v. 70, n. 5-6, p. 1700355, 2018.
<https://doi.org/10.1002/star.201700355>

SANTOS, M. et al. Avanços em biopolímeros e processos de extrusão para aplicações em economia circular. ****Materials Science and Engineering****, v. 104, p. 217-227, 2021.

SANTOS, M. L. et al. Effect of chitosan and starch blends on the physicochemical properties of biodegradable films. ****Carbohydrate Polymers****, v. 246, p. 116577, 2020.

SINGH, P. et al. Quitosana e suas propriedades antimicrobianas em embalagens alimentícias. ****International Journal of Food Science****, v. 43, p. 74-83, 2020.

SOUZA, A. C.; DITCHFIELD, C.; TADINI, C. C. Biodegradable films based on starch and gelatin: Effect of plasticizer and crosslinking agent on the solubility and physical properties. ****Journal of Food Engineering****, v. 106, n. 3, p. 331–336, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.035>

SOUZA, Marcela Tavares de; SILVA, Michelly Dias da; CARVALHO, Rachel de. Integrative review: what is it? How to do it?. ****Einstein****, São Paulo, v. 8, n. 1, p.

102-106, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1679-45082010rw1134>. Disponível em: <https://journal.einstein.br/pt-br/article/revisao-integrativa-o-que-e-e-como-fazer/>. Acesso em: 20 out. 2023.

SOTHORNVIT, R.; KROCHTA, J. M. Plasticizers in edible films and coatings. ***Innovative Food Science & Emerging Technologies***, v. 1, p. 203–209, 2000.

SOTHORNVIT, R.; KROCHTA, J. M. Plasticizer effect on mechanical properties of beta-lactoglobulin films. ***Journal of Food Engineering***, v. 50, n. 3, p. 149–155, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00084-0)

TAO, X. et al. Uso de plastificantes e blendas em filmes de amido: Impactos nas propriedades de barreira e mecânicas. ***Journal of Applied Polymer Science***, v. 138, n. 5, p. 45145-45156, 2021.

VIEIRA, M. G. A. et al. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. ***European Polymer Journal***, v. 47, p. 254–263, 2011.

WORLD ECONOMIC FORUM. ***The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics***. Industry Agenda. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf. Acesso em: 20 out. 2023.

ZHANG, J. et al. Characterization of edible films made from the blend of chitosan and soluble starch. ***International Journal of Biological Macromolecules***, v. 88, p. 256–264, 2016.

ZHANG, S. et al. Formação de complexos entre amido e quitosana: Implicações para aplicações em filmes e biocompósitos. ***Carbohydrate Polymers***, v. 254, p. 117-125, 2021.

ZHANG, X. et al. Ação da quitosana na estimulação do crescimento vegetal e absorção de nutrientes. ***Plant Growth Regulation***, v. 88, n. 2, p. 123-134, 2019.

ZHANG, Y.; WEI, Y.; JIANG, Q. Preparation and characterization of starch and chitosan films: effect of blending ratio and processing conditions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** , v. 66, n. 17, p. 4372-4380, 2018.

ZHANG, Z.; LI, F.; YU, Z. Improvement of mechanical and thermal properties of biodegradable films by chitosan. **Journal of Polymers and the Environment** , v. 22, p. 543-552, 2014.