



VITÓRIA SANTOS PIRES

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FILMES
BIODEGRADÁVEIS À BASE DE ALGINATO, MESOCARPO
DE COCO BABAÇU E FIBRAS DE ARIRI**

VITÓRIA SANTOS PIRES

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FILMES
BIODEGRADÁVEIS À BASE DE ALGINATO, MESOCARPO
DE COCO BABAÇU E FIBRAS DE ARIRI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Colegiado de Curso da Engenharia Química
do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da
Universidade Federal do Maranhão, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Profa. Dra. Audirene Amorim Santana

São Luís
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Pires, Vitória.

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FILMES BIODEGRADÁVEIS À
BASE DE ALGINATO, MESOCARPO DE COCO BABAÇU E FIBRAS DE
ARIRI / Vitória Pires. - 2025.

56 f.

Orientador(a): Audirene Santana.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, Ufma, 2025.

1. Biopolímeros. 2. Mesocarpo de Coco Babaçu. 3.
Alginato. 4. Biocompósitos. 5. Endocarpo de Coco Ariri.
I. Santana, Audirene. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. AUDIRENE AMORIM SANTANA
Orientadora – COEQ/CCET/UFMA

Prof. WALBERT SILVA ALVES CARTAGENES
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. DENNYS CORREIA DA SILVA
PPGEQ/UFRN

07 de agosto de 2025

DADOS CURRICULARES

Vitória Santos Pires

NASCIMENTO	25/07/1999 – SÃO LUIS / MA
FILIAÇÃO	Paulo Renato Pereira Pires Rosana Cátia dos Santos Pires
2018.2/2025.1	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho ao meu pai e à memória da
minha mãe.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, por ter me ensinado a resiliência e moldado o significado de ser uma mulher.

Ao meu pai, por ser meu maior ídolo, meu pilar e meu protetor.

Ao meu irmão, por ser um guerreiro de nascença e me ensinar o que é ter orgulho.

À Ju, minha madrastra, defensora da nossa família.

Aos meus amigos, que estiveram sempre presentes nos momentos alegres e tristes.

À minha orientadora, Profa. Audirene Amorim Santana, pela empatia e instrução.

Por fim, agradeço a uma pessoa que me move e me inspira, Nohan, não seria eu, se não fosse você, eu te amo!

*“E você conseguiu o que queria desta vida, mesmo assim?
Eu consegui.
E o que você queria?
Me chamar de amado, me sentir amado na Terra.”*

Raymond Carver

PIRES, V. S. **Desenvolvimento E Avaliação De Filmes Biodegradáveis À Base De Alginato, Mesocarpo De Coco Babaçu E Fibras De Ariri**. 2025. 56 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

RESUMO

Os biocompósitos vêm ganhando destaque devido à crescente demanda por alternativas sustentáveis em substituição aos materiais petroquímicos não degradáveis. Entre as opções estudadas estão os biopolímeros naturais, como os polissacarídeos, que, em meio aquoso, formam géis e soluções viscosas e permitem o desenvolvimento de filmes biodegradáveis. O amido do mesocarpo de coco babaçu (AMCB), abundante no Maranhão, destaca-se como uma matéria-prima promissora por seu baixo custo, não toxicidade e fácil degradação, representando uma alternativa viável ao polietileno presente em curativos convencionais. Neste estudo, foram desenvolvidas membranas de biocompósitos à base de AMCB e alginato, reticuladas com cloreto de cálcio dihidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), agente de reticulação iônica dos grupos carboxilato do alginato e reforçadas com fibras do endocarpo de coco ariri, utilizada para melhorar a resistência mecânica das membranas. As formulações diferiram na concentração de glicerol, quantidade de CaCl_2 e presença de fios de algodão. Os filmes sem glicerol apresentaram-se quebradiços, enquanto os com maior teor de glicerol, que atua como plastificante, apresentaram melhor maleabilidade. Entre os resultados obtidos destacam-se: umidade de 7,72% a 31,18%, solubilidade de 28,56% a 49,64%, espessura de 0,14 a 0,24 mm e permeabilidade ao vapor d'água de 2,75 a 8,27 (g.mm)/(m².dia.kPa). As formulações F1 e F2 foram selecionadas por apresentarem os melhores desempenhos nas análises. O filme F2, com maior teor de CaCl_2 , apresentou maior rigidez e tensão de ruptura, mas menor alongamento, o que restringe o movimento das cadeiras poliméricas. A análise morfológica revelou cristais de CaCl_2 e poros na superfície, enquanto as análises de difração raios X (DRX) confirmaram o caráter semicristalino dos filmes. Os resultados indicam o potencial das membranas como curativos biodegradáveis e embalagens. Estudos futuros incluem a adição de fibras e compostos bioativos para ampliar suas funcionalidades.

Palavras-chave: Biopolímeros. Mesocarpo de Coco Babaçu. Alginato. Biocompósitos. Endocarpo de Coco Ariri.

PIRES, V. S. Development and Evaluation of Biodegradable Films Based on Alginate, Babassu Coconut Mesocarp, and Ariri Fibers. 2025. 56 pages. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

ABSTRACT

Biocomposites have been gaining prominence due to the growing demand for sustainable alternatives to replace non-degradable petrochemical materials. Among the options studied are natural biopolymers, such as polysaccharides, which, in aqueous media, form gels and viscous solutions, enabling the development of biodegradable films. The starch from babassu coconut mesocarp (BCMS), abundant in Maranhão, stands out as a promising raw material due to its low cost, non-toxicity, and easy degradation, representing a viable alternative to polyethylene found in conventional wound dressings. In this study, biocomposite membranes based on BCMS and alginate were developed, crosslinked with calcium chloride dihydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), an ionic crosslinking agent for the carboxylate groups of alginates, and reinforced with fibers from the ariri coconut endocarp, used to improve the mechanical strength of the membranes. The formulations differed in glycerol concentration, CaCl_2 content, and the presence of cotton threads. Films without glycerol were brittle, while those with higher glycerol content, which acts as a plasticizer, exhibited better flexibility. Among the results obtained, notable values include moisture content ranging from 7.72% to 31.18%, solubility from 28.56% to 49.64%, thickness from 0.14 to 0.24 mm, and water vapor permeability from 2.75 to 8.27 $(\text{g} \cdot \text{mm})/(\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{kPa})$. Formulations F1 and F2 were selected for presenting the best performances in the analysis. The F2 film, with a higher CaCl_2 content, showed greater stiffness and tensile strength but lower elongation, which restricts the movement of the polymer chains. Morphological analysis revealed CaCl_2 crystals and pores on the surface, while X-ray diffraction (XRD) analyses confirmed the semicrystalline nature of the films. The results indicate the potential of these membranes for use as biodegradable wound dressings and packaging. Future studies include the addition of fiber and bioactive compounds to expand their functionalities.

Keywords: Biopolymers. Babassu Coconut Mesocarp. Alginate. Biocomposites. Ariri Coconut Endocarp.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Attalea Speciosa Mart</i>	04
Figura 2 – <i>Attalea Speciosa Mart</i>	06
Figura 3 – Ensaios construídos.....	24
Figura 4 – Ensaio 12 com fibras entrelaçadas	25
Figura 5 – Imagens capturada pelo MEV	29
Figura 6 – Imagens capturada pelo MEV	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planejamento experimental.....	19
Tabela 2 – Conteúdo de umidade e solubilidade	25
Tabela 3 – Espessura e Permeabilidade ao vapor de água	28
Tabela 4 – Resultados das propriedades físicas dos biopolímeros	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 COCO BABAÇU (<i>Attalea Speciosa</i> Mart.)	4
3.2 BIOPOLÍMEROS.....	5
3.2.1 Amido de Mesocarpo de Coco Babaçu (<i>Attalea speciosa</i> Mart.)	5
3.2.2 Alginato	6
3.3 FILMES BIODEGRADÁVEIS.....	7
3.4 PLASTIFICANTES.....	8
3.4.1 Glicerol	8
3.5 RETICULANTE.....	9
3.5.1 Cloreto de Cálcio	10
3.6 COCO ARIRI (<i>Syagrus cocoides Martius</i>)	10
3.7 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS	10
3.7.1 Umidade.....	11
3.7.2 Solubilidade	12
3.7.3 Espessura	13
3.7.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)	13
3.7.5 Propriedades Mecânicas	14
3.7.6 Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raio X (EDS)	15
4 MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1 MATERIAL.....	16
4.2 LOCAL DA PESQUISA	17
4.3 INSTRUMENTOS/EQUIPAMENTOS/SOFTWARES UTILIZADOS	17
4.4 ANÁLISES, MÉTODOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	18
4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS	19
4.5.1 Aspecto visual e coloração	19
4.5.2 Conteúdo de umidade (ω).....	20
4.5.3 Solubilidade em água (S).....	20

4.5.4 Espessura (δ).....	20
4.5.5 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)	21
4.5.6 Propriedades mecânicas.....	21
4.5.7 Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raio X (EDS)	22
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5.1 ASPECTO VISUAL.....	23
5.2 CONTEÚDO DE UMIDADE E SOLUBILIDADE EM ÁGUA.....	25
5.3 ESPESSURA E PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (PVA).....	26
5.4 ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA DE RAIO X (EDS)	28
5.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS	30
6 CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

O avanço acelerado na criação de novos produtos e empresas tem elevado o nível de exigência dos consumidores tornando qualidade e velocidade de entrega requisitos obrigatórios para o consumo. Paralelamente, cresce o interesse por materiais renováveis e biodegradáveis como alternativa aos polímeros sintéticos derivados do petróleo, cuja produção anual ultrapassa 300 milhões de toneladas (PLASTIC OCEANS, 2022). Esses materiais, presentes no mercado há mais de 70 anos, apresentam baixos índices de reciclagem: apenas 10% são reciclados, 14% são incinerados, e o restante é destinado a aterros sanitários ou descartado de forma inadequada no ambiente, o que poderá resultar em 1,1 bilhão de toneladas de resíduos plásticos até 2050 caso o padrão de consumo e descarte persista (GEYER, 2020). No Brasil, a situação também é preocupante: cerca de 19 mil toneladas de resíduos não são recolhidas diariamente, e um terço do lixo doméstico corresponde a embalagens plásticas, gerando aproximadamente 25 mil toneladas de resíduos descartados em depósitos de lixo diariamente (ABRELPE, 2023; MMA, 2019).

Nesse contexto, surgem os materiais compósitos e biocompósitos como alternativas sustentáveis. Os compósitos são definidos como materiais formados por uma matriz (fase contínua) e um reforço (fase descontínua), que ao serem combinados apresentam propriedades superiores às dos materiais isolados, dependendo do grau de afinidade entre as fases e da técnica empregada para a mistura (MARGEM, 2013; ONO, 2019). Tradicionalmente, as matrizes poliméricas eram oriundas de materiais fósseis, mas atualmente buscam-se fontes renováveis, como polissacarídeos, proteínas e lipídios de origem animal e vegetal (SANTANA; KIECKBUSCH, 2013; RAPOSO *et al.*, 2021). A produção de biopolímeros a partir dessas fontes permite obter materiais com propriedades mecânicas e de barreira aprimoradas, além de vantagens sinérgicas em relação aos componentes puros (BRASIL *et al.*, 2022).

Dentre os biocompósitos mais promissores destacam-se os que utilizam polissacarídeos, em especial os amidos de diversas fontes botânicas, por serem biodegradáveis, de baixo custo e amplamente disponíveis. Um exemplo relevante é o amido do mesocarpo de coco babaçu (AMCB), abundante no Maranhão e nos estados vizinhos, contendo cerca de 60% de amido, alta cristalinidade (determinação via DRX) e temperatura de gelatinização entre 63 °C e 73 °C (medida por DSC) (CARNEIRO *et al.*, 2013; CINELLI *et al.*, 2014; MANIGLIA; TAPIA-BLÁCIDO, 2016). O AMCB já é utilizado como alimento e na medicina tradicional, além de apresentar potencial para aplicação em matrizes elásticas e termoplásticos, quando

plastificados com glicerol, água ou sorbitol (MÜLLER et al., 2009). No campo farmacêutico, esse biopolímero tem sido estudado como agente biocompatível e biodegradável em curativos, com ação espessante, estabilizadora e potencial cicatrizante, atribuídas às propriedades anti-inflamatórias, antimicrobianas e antitumorais relatadas em estudos sobre o mesocarpo (ARARUNA et al., 2021).

Outro polissacarídeo amplamente utilizado é o alginato, extraído da parede celular de algas marrons e azuis, conhecido por sua estabilidade química, térmica e mecânica (ROMANI; PRENTICE-HERNÁNDEZ; MARTINS, 2017; SENTURK PARREIDT; MÜLLER; SCHMID, 2018). Para aprimorar suas propriedades, os biocompósitos à base de alginato e amido têm sido reforçados com fibras vegetais, como as do endocarpo do coco ariri (*Syagrus cocoides*), que conferem melhorias na resistência mecânica, permeabilidade e estabilidade em água (PAIXÃO et al., 2019a; RAPOSO et al., 2021). Além disso, a reticulação com cloreto de cálcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) promove maior coesão estrutural, aumentando a resistência à tração e reduzindo a solubilidade em água (COSTA et al., 2018).

Este estudo visou o desenvolvimento e a caracterização de membranas de biocompósitos à base de AMCB e alginato, reticuladas com cloreto de cálcio, que promove ligações iônicas entre os grupos carboxilato do alginato e os íons Ca^{2+} , aumentando a coesão estrutural, reforçadas com fibras do endocarpo de coco ariri. O objetivo foi obter materiais de baixo custo, atóxicos e biodegradáveis, destinados à substituição de embalagens e curativos petroquímicos, alinhando-se às demandas ambientais e às políticas pró-sustentabilidade. A iniciativa contribui para o avanço científico e tecnológico na área de materiais renováveis, promovendo soluções viáveis para os desafios ambientais atuais.

1.1 JUSTIFICATIVA

O avanço tecnológico acompanha a necessidade fundamental da substituição dos plásticos sintéticos, uma vez que a vasta maioria dos plásticos não são biodegradáveis, os detritos desse material e suas consequências irão persistir durante séculos. No Brasil, dados sobre a produção e Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) revelam que existem 19.000 toneladas/dia de resíduos sem recolhimento no país e que, por consequência, acabam em locais de descarte impróprios, além de evidenciar que 75% dos brasileiros não separam seus resíduos para a realização de logística reversa (ABRELPE, 2023).

Surge, dessa forma, uma preocupação crescente com problemas ambientais e a necessidade de estudos voltados a esse ramo. Sendo assim, a produção de biocompósitos combinando amido de mesocarpo de coco babaçu e glicerol é o foco dessa pesquisa. O amido do mesocarpo de coco babaçu que é utilizado na produção dos biocompósitos é coletado no Maranhão, estimulando as pesquisas com matérias-primas regionais, além da experimentação de novas fontes naturais na produção de substitutos do plástico, sendo também um polissacarídeo encontrado em alta escala e barato.

Os curativos objetivam proteger a ferida e prevenir infecções, para, dessa forma, iniciar o processo de cicatrização da pele. Esse estudo possui como meta principal encontrar formulações adequadas para a fabricação desse produto realizando testes com diferentes teores de glicerol, a fim de avaliar seus efeitos na plasticidade, flexibilidade e resistência mecânica das membranas, como também avaliando a utilização de fibras de algodão como reforço natural, cuja compatibilidade com a matriz de amido e alginato pode influenciar as propriedades mecânicas e a estabilidade em meio úmido.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Confeccionar e caracterizar membranas biopoliméricas à base de amido de mesocarpo de coco babaçu (AMCB) para possíveis uso como curativos bioativos para tratamento de feridas cutâneas superficiais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as concentrações ideais de AMCB com base em propriedades físico-químicas e mecânicas obtidas em testes preliminares.
- Elaborar membranas de AMCB;
- Desenvolver membranas de AMCB adicionando fibras de endocarpo de coco de ariri;
- Realizar a caracterização físicoquímica e morfológica das membranas obtidas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COCO BABAÇU (*Attalea Speciosa* Mart.)

O coco babaçu (*Attalea speciosa* Mart.), pertencente à família botânica *Arecaceae*, é uma palmeira nativa do Brasil, amplamente encontrada nas regiões Norte e Nordeste. Apresenta tronco único, cilíndrico, que pode alcançar até 20 metros de altura e cerca de 30 a 50 centímetros de diâmetro. Suas folhas são pinadas e longas, variando entre 5,6 e 12 metros de comprimento, com bainhas de até 79 centímetros e pecíolos que medem de 0,4 a 1,5 metro. Cada lado da folha contém entre 170 e 224 pinas (LIMA, 2019).



Figura 1: *Attalea Speciosa* Mart. Fonte: Cardoso (2015)

As inflorescências do babaçu são do tipo espádice, podendo ser masculinas, femininas ou mistas, e surgem de forma solitária nas axilas das folhas. Os frutos, do tipo drupa, possuem formato oval, superfície lisa e coloração marrom quando maduros, medindo em média 11,3 cm de comprimento por 6,3 cm de largura. No interior, o fruto apresenta uma polpa fibrosa (mesocarpo) e entre três a seis amêndoas brancas, de onde se extrai um óleo de alto valor econômico (SILVA, 2014).

O babaçu possui grande relevância socioeconômica, principalmente no estado do Maranhão, que abriga extensas áreas de babaçuais nativos. Estima-se que mais de 16 milhões de hectares de terras no estado sejam cobertos por essa palmeira, sendo a espécie utilizada por comunidades extrativistas como importante fonte de renda. Além do óleo da amêndoa, considerado o principal produto comercial do fruto, destacam-se também a produção de carvão, a torta de babaçu (resíduo da extração de óleo) e o amido do mesocarpo, que vem sendo estudado devido à sua biodegradabilidade, abundância regional e capacidade de formar filmes para aplicações em biocompósitos e embalagens sustentáveis (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023; CARNEIRO et al., 2013).

3.2 BIOPOLÍMEROS

Em contraste com os polímeros sintéticos, que são produzidos a partir de derivados de petróleo e, portanto, de fontes não renováveis, os biopolímeros são macromoléculas orgânicas obtidas a partir de organismos vivos ou de seus resíduos, como plantas, animais e fungos, por meio de processos naturais ou industriais. Sua obtenção ocorre por meio de processos metabólicos intracelulares complexos, envolvendo reações de biossíntese, muitas vezes catalisadas por enzimas (HABITZREUTER et al., 2021). Além dos biopolímeros naturais, há também os chamados plásticos bio-baseados emergentes, definidos como macromoléculas orgânicas artificiais derivadas de recursos biológicos e utilizadas para fins não alimentícios em aplicações plásticas — excluindo papel e papelão — sendo que alguns autores incluem, inclusive, fibras artificiais, embora estas sejam frequentemente excluídas da categoria de plásticos (SHEN; HAUFÉ; PATEL, 2009).

3.2.1 Amido de Mesocarpo de Coco Babaçu (*Attalea speciosa* Mart.)

O mesocarpo do coco babaçu (MCB) corresponde à polpa fibrosa do fruto e representa cerca de 20,4% do peso do coco babaçu, cujos frutos pesam entre 90 g e 280 g. Trata-se de uma parte rica em amido, o que amplia suas possibilidades de uso, desde a alimentação humana e animal até aplicações industriais, como na fabricação de materiais aglomerantes e brinquedos (PINHEIRO; CORRÊA; ARAÚJO, 2024). Além do mesocarpo, o fruto é composto por cerca de 12,6% de epicarpo (casca externa), 58,4% de endocarpo (parte lenhosa usada como

substituto da lenha) e 8,7% de amêndoa, esta última rica em óleo (PINHEIRO; CORRÊA; ARAÚJO, 2024).

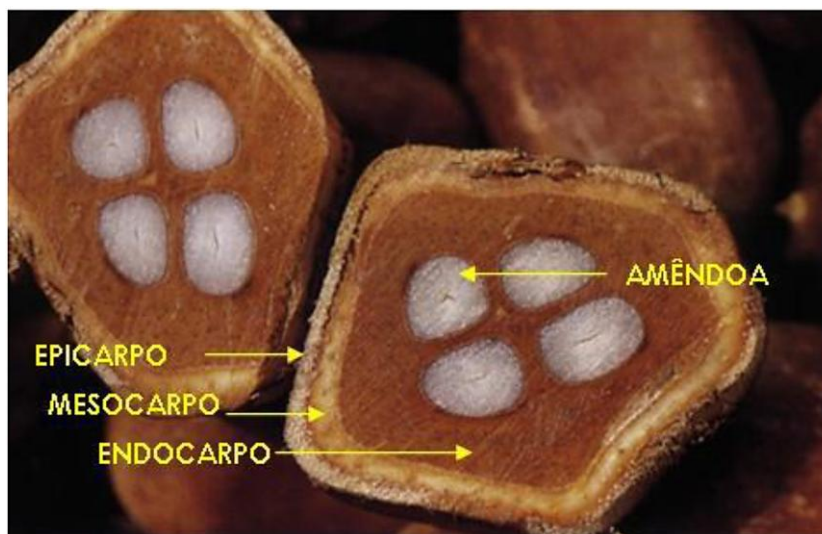


Figura 2: *Attalea Speciosa Mart.* Fonte: Silva, 2014.

O MCB é obtido durante o processamento do fruto do coco babaçu e tem ampla comercialização nos estados do Maranhão, Piauí e Tocantins (SILVA et al., 2012). A farinha seca de mesocarpo é utilizada como substituta da farinha de mandioca na alimentação e na medicina tradicional, sendo empregada no tratamento de diversas doenças (PINHEIRO et al., 2012; SOUZA et al., 2011).

Análises físico-químicas demonstram que a farinha do MCB contém cerca de 60% de amido, com temperatura de gelatinização entre 63°C e 73°C, e apresenta significativa quantidade de amilose e elevado grau cristalinidade em sua estrutura polimérica, o que a torna promissora para a formação de matrizes elásticas em biocompósitos (CINELLI et al., 2014; MANIGLIA; TAPIA-BLÁCIDO, 2016). Estudos recentes apontam que a combinação do amido do MCB com agentes reticulantes contribui para equilibrar flexibilidade, resistência e propriedades de barreira em filmes biodegradáveis, favorecendo sua aplicação em embalagens alimentícias e materiais sustentáveis (BANGAR et al., 2024).

3.2.2 Alginato

O alginato é um biopolímero natural extraído das paredes celulares de algas marrons, sendo composto por unidades de ácidos β -D-manurônico e α -L-gulurônico, que se organizam em blocos segmentados ordenados na cadeia polimérica (HABITZREUTER et al., 2021). Sua capacidade de formar géis em presença de íons divalentes e suas propriedades de

biodegradabilidade, biocompatibilidade e formação de filmes tornam o alginato um material amplamente estudado para aplicações em embalagens alimentícias e recobrimentos biodegradáveis (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023).

Além de sua estabilidade térmica, química e mecânica, o alginato pode ser processado em blendas com outros biopolímeros, como amidos, ampliando as possibilidades de formulação de biocompósitos com propriedades ajustadas às demandas específicas de embalagens e revestimentos (ROMANI; PRENTICE-HERNÁNDEZ; MARTINS, 2017). Entretanto, filmes de alginato isolado geralmente apresentam propriedades plásticas e barreiras inferiores quando comparados a polímeros sintéticos tradicionais (SHEN; HAUFÉ; PATEL, 2009).

Para superar essas limitações, pesquisas recentes têm explorado a adição de fibras vegetais, como as do endocarpo de ariri, às matrizes de alginato, com o objetivo de reforçar a estrutura dos filmes e melhorar características como resistência mecânica, impermeabilidade e estabilidade dimensional (GEHLEN, 2014; PAIXÃO et al., 2019a; RAPOSO et al., 2021). Outra abordagem amplamente utilizada é a reticulação dos filmes com íons cálcio, o que promove maior coesão estrutural, melhora a resistência à tração e reduz a solubilidade em água, aspectos fundamentais para ampliar a aplicabilidade dos filmes em embalagens sustentáveis (COSTA et al., 2018; BANGAR et al., 2024).

3.3 FILMES BIODEGRADÁVEIS

Filmes e revestimentos biodegradáveis à base de biopolímeros naturais, como amido, celulose, pectina, quitosana e proteínas, vêm se consolidando como alternativas sustentáveis aos plásticos convencionais. Esses materiais, além de serem obtidos de fontes renováveis, apresentam capacidade de se degradar em compostos que são reintegrados aos ciclos naturais, reduzindo o impacto ambiental. Avanços recentes em formulações e técnicas de processamento têm aprimorado suas propriedades mecânicas, de barreira e funcionais, viabilizando aplicações em embalagens e outras áreas industriais (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023).

Os polímeros biodegradáveis podem ter diferentes origens: fontes renováveis, como milho, celulose, batata e cana-de-açúcar; processos biotecnológicos, nos quais bactérias produzem materiais como PHB e PHB-HV; ou ainda fontes animais, como quitina e quitosana. Há também polímeros biodegradáveis derivados de petróleo, como PCL e poliesteramidas, que, apesar da origem fóssil, apresentam capacidade de degradação em condições específicas, como em compostagem industrial (LIMA, 2019).

Entre os métodos de produção desses filmes, o casting se destaca nos laboratórios por sua simplicidade e eficiência. Nele, aplica-se uma solução do polímero sobre um substrato, geralmente de vidro, e o solvente é evaporado, muitas vezes com auxílio de aquecimento, formando o filme biodegradável (VIÉGAS, 2016).

3.4 PLASTIFICANTES

Os plastificantes são aditivos fundamentais no desenvolvimento de filmes poliméricos biodegradáveis, pois conferem maior flexibilidade e reduzem a dureza, a rigidez e a temperatura de transição vítrea (T_g), sendo a T_g especialmente relevante em filmes à base de polissacarídeos como o amido, contribuindo para o aumento da tenacidade e do alongamento na ruptura dos materiais (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023). Em geral, os plastificantes são compostos hidrofílicos e de baixo peso molecular, que se inserem entre as cadeias poliméricas e diminuem as ligações de hidrogênio, promovendo maior mobilidade das macromoléculas (AHMAD; SULAIMAN; YUSOF, 2023).

Para garantir sua eficácia, é essencial que esses aditivos sejam compatíveis com o polímero da matriz, evitando exsudação e mantendo as propriedades desejadas do filme. Entre os plastificantes mais utilizados em filmes à base de amido destacam-se os polióis, como glicerol e sorbitol, sendo o glicerol considerado mais eficiente na promoção da flexibilidade (AHMAD; SULAIMAN; YUSOF, 2023; PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023).

Além dos plastificantes, agentes reticulantes são amplamente empregados para reforçar a resistência mecânica e reduzir a solubilidade dos filmes em água. Os avanços recentes em amidos reticulados apontam que a reticulação promove maior integridade estrutural e estabilidade funcional, sendo uma estratégia importante no desenvolvimento de embalagens alimentícias mais sustentáveis (BANGAR et al., 2024).

3.4.1 Glicerol

O glicerol, também conhecido como glicerina, é um composto orgânico de estrutura simples e bastante utilizado como plastificante em filmes biodegradáveis. Trata-se de um triol, ou seja, um álcool com três grupos hidroxila ($-OH$) em sua molécula, com fórmula química $C_3H_8O_3$. Essa configuração confere ao glicerol alta polaridade e solubilidade em água, além de

grande afinidade por matrizes poliméricas hidrofílicas (AHMAD; SULAIMAN; YUSOF, 2023).

Por ser um subproduto abundante da indústria do biodiesel e da fabricação de sabões, o glicerol apresenta baixo custo e ampla disponibilidade, o que favorece sua aplicação industrial e em materiais para embalagens sustentáveis (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023). A presença dos grupos hidroxila permite que ele forme pontes de hidrogênio com as macromoléculas poliméricas, promovendo maior mobilidade da matriz e contribuindo para a flexibilidade dos filmes, embora também possa reduzir a resistência mecânica do material. Por outro lado, sua natureza higroscópica pode resultar em maior absorção de umidade e maior permeabilidade ao vapor d'água, o que exige ajustes na formulação de acordo com o uso pretendido (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023).

Além de seu uso isolado, o glicerol tem sido estudado em combinação com agentes reticulantes, com o objetivo de equilibrar flexibilidade, resistência e propriedades de barreira nos filmes biodegradáveis. Essa estratégia auxilia na mitigação dos efeitos indesejados associados à absorção de água, ampliando as possibilidades de aplicação em embalagens alimentícias (BANGAR et al., 2024).

3.5 RETICULANTE

O uso de biopolímeros naturais em filmes biodegradáveis apresenta desafios, especialmente devido à alta solubilidade desses materiais em água. Essa característica acelera a degradação dos filmes, limitando sua aplicação em ambientes úmidos ou em contato direto com líquidos (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023; HABITZREUTER et al., 2021). Uma solução eficaz para minimizar essa limitação é a reticulação, formando uma rede polimérica mais coesa e resistente, podendo ser parcialmente tridimensional, a depender do tipo de ligação promovida. A reticulação melhora propriedades como resistência ao calor, força mecânica e reduz a solubilidade em água (BANGAR et al., 2024).

Esse processo, conhecido como *crosslinking*, resulta na formação de ligações covalentes (mais estáveis e permanentes) ou iônicas (reversíveis e dependem da umidade do meio) entre as cadeias dos biopolímeros, conferindo ao material maior rigidez e coesão. No entanto, é necessário equilibrar cuidadosamente o grau de reticulação o uso de plastificantes, para evitar a perda de flexibilidade dos filmes (AHMAD; SULAIMAN; YUSOF, 2023). Além disso, a combinação com fibras vegetais vem sendo explorada como estratégia adicional para

otimizar as propriedades mecânicas e de barreira dos biocompósitos (HABITZREUTER et al., 2021).

3.5.1 Cloreto de Cálcio

O cloreto de cálcio (CaCl_2) é um sal iônico amplamente utilizado como agente reticulante em filmes à base de biopolímeros, especialmente os formulados com alginato. Sua alta solubilidade em água e capacidade de formar ligações iônicas com grupos carboxilato dos biopolímeros permitem a formação de filmes com maior resistência à tração e menor solubilidade, características essenciais para aplicações em embalagens biodegradáveis e em curativos bioativos (BORGES; OLIVEIRA; SILVEIRA, 2019).

3.6 COCO ARIRI (*Syagrus cocoides Martius*)

O coco ariri (*Syagrus cocoides Martius*) é uma palmeira nativa do Brasil, encontrada em diversas regiões, incluindo o Maranhão, e tradicionalmente utilizada em práticas agroextrativistas. O endocarpo do coco ariri, parte lenhosa que protege as sementes, tem despertado interesse científico devido ao seu potencial como reforço em biocompósitos. As fibras vegetais obtidas do endocarpo de ariri são vistas como uma solução para melhorar as propriedades mecânicas, a resistência à água e a permeabilidade a gases de filmes produzidos com biopolímeros naturais, como amido e alginato, que geralmente apresentam desempenho inferior ao dos polímeros sintéticos convencionais (PAIXÃO et al., 2019a; RAPOSO et al., 2021).

O uso de fibras vegetais em materiais compósitos poliméricos tem aumentado de forma significativa devido a suas vantagens, como baixo custo, origem em fontes renováveis, biodegradabilidade e boa resistência mecânica. A eficiência do reforço promovido por essas fibras depende da natureza do biopolímero utilizado e de seu grau de cristalinidade, que influenciam diretamente a adesão na interface entre matriz e reforço (RODRIGUES et al., 2021).

3.7 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS

A caracterização de biopolímeros é uma etapa fundamental para sua aplicação em embalagens sustentáveis, pois permite avaliar o desempenho dos filmes em diferentes condições de uso. Essa caracterização envolve a medição de propriedades físicas (espessura, cor), químicas (solubilidade, teor de umidade), térmicas (estabilidade térmica) e funcionais (permeabilidade e resistência mecânica) (HABITZREUTER et al., 2021).

Essas propriedades físico-químicas estão diretamente ligadas à composição do filme (tipos de polímeros e plastificantes), à estrutura molecular (grau de cristalinidade e morfologia) e ao processo de fabricação (tempo de secagem, temperatura e método de formação), que influenciam características como transparência, rigidez, solubilidade e capacidade de barreira (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023; AHMAD; SULAIMAN; YUSOF, 2023).

Por exemplo, a análise térmica, como a análise termogravimétrica (TGA) e a calorimetria exploratória diferencial (DSC), permite avaliar a estabilidade do material em relação à temperatura, enquanto testes de tração e alongamento informam sobre suas propriedades mecânicas. A medição da permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio fornece dados cruciais sobre a eficácia do filme como barreira, especialmente em aplicações alimentícias (RAPOSO et al., 2020; PAIXÃO et al., 2019a).

Além disso, o comportamento dos biofilmes frente à umidade é uma característica crítica, dada a natureza hidrofílica da maioria dos biopolímeros. Isso exige que os métodos de análise sejam adaptados para capturar com precisão variações de massa, estrutura e funcionalidade em ambientes com diferentes níveis de umidade (HABITZREUTER et al., 2021).

Portanto, a caracterização físico-química dos biopolímeros não apenas determina sua viabilidade técnica, mas também orienta o desenvolvimento de formulações otimizadas para atender requisitos específicos de conservação, segurança alimentar e sustentabilidade.

3.7.1 Umidade

A presença de umidade nos filmes biodegradáveis é um fator determinante para suas propriedades físico-químicas e estabilidade durante o armazenamento. Biopolímeros como o amido possuem natureza hidrofílica, o que os torna altamente suscetíveis à absorção de umidade do ambiente, impactando negativamente características como rigidez, flexibilidade e integridade estrutural (HABITZREUTER et al., 2021).

Essa sensibilidade é ainda mais acentuada na presença de plastificantes naturais, frequentemente utilizados com o objetivo de aumentar a maleabilidade dos filmes. Embora promovam maior flexibilidade, plastificantes como glicerol elevam o teor de umidade residual, o que pode comprometer a estabilidade do material em condições de variação de umidade relativa. Estudos mostram que níveis de umidade relativa de 50% e 75% influenciam significativamente a taxa de absorção de água e a integridade estrutural dos filmes (AHMAD; SULAIMAN; YUSOF, 2023), sendo recomendada a avaliação experimental dessas condições para previsão do desempenho durante o armazenamento. Além disso, estudos recentes apontam que a instabilidade frente à umidade continua sendo um dos principais desafios técnicos para a aplicação industrial de filmes biodegradáveis, especialmente no setor de embalagens alimentícias, onde variações ambientais são comuns e afetam diretamente o desempenho funcional dos materiais (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023).

Embora os bioplásticos apresentem vantagens ambientais relevantes, sua performance ainda é limitada por fatores como a alta absorção de umidade e a consequente perda de propriedades mecânicas, o que restringe sua competitividade frente aos polímeros sintéticos em determinadas aplicações (SHEN; HAUFE; PATEL, 2009).

3.7.2 Solubilidade

A solubilidade em água é uma propriedade essencial no desempenho funcional de filmes biodegradáveis, especialmente em aplicações onde a integridade do material em contato com umidade é crítica. Em sistemas destinados à proteção de alimentos com alta atividade de água, o controle da solubilidade é crucial para garantir barreiras eficientes contra a perda de qualidade, umidade ou contaminação (LOPES et al., 2020).

Filmes produzidos com alginato, por exemplo, apresentam alta afinidade por água, o que confere excelente solubilidade, sendo vantajosos para aplicações específicas como coberturas comestíveis, embalagens para sopas instantâneas e alimentos desidratados, nos quais a dissolução completa do filme se torna vantajosa (PAIXÃO et al., 2019a). No entanto, essa característica exige atenção redobrada quando a aplicação requer resistência à umidade, sendo necessário ajustar a formulação por meio da incorporação de plastificantes hidrofóbicos ou aditivos estruturais para reduzir a solubilidade.

Além disso, estudos recentes demonstram que a combinação de biopolímeros - como amido, alginato e fibras vegetais - pode modular a solubilidade final do filme, oferecendo

alternativas mais balanceadas entre resistência à água e biodegradabilidade. Raposo et al. (2020) observaram que a adição de fibras de babaçu a filmes de alginato e amido resultou em materiais com menor solubilidade, possivelmente devido à formação de uma rede polimérica mais densa e à presença de fibras insolúveis que atuam como barreiras físicas, reduzindo a difusão da água para o interior da matriz. Além disso, houve melhora nas propriedades mecânicas, sem comprometer a compostabilidade do produto (capacidade de se decompor em compostagem industrial ou doméstica). Portanto, a escolha dos componentes e a estrutura da matriz polimérica devem ser criteriosamente definidas conforme o perfil de aplicação desejado, uma vez que a solubilidade pode ser tanto uma vantagem quanto uma limitação, dependendo do contexto funcional do filme.

3.7.3 Espessura

A espessura é um parâmetro fundamental na formulação de filmes biodegradáveis, influenciando diretamente propriedades como resistência mecânica, permeabilidade ao vapor d'água e desempenho como barreira (HABITZREUTER et al., 2021). Em embalagens alimentícias, sua escolha depende da natureza do produto, da quantidade a ser embalada e das condições de armazenamento (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023).

A obtenção de filmes por *casting* - método mais comum em escala laboratorial - apresenta limitações no controle da espessura, devido às variações na viscosidade da solução formadora e na distribuição do material no molde, o que pode comprometer a uniformidade do filme final (HABITZREUTER et al., 2021).

Espessuras mais elevadas tendem a oferecer maior resistência e menor solubilidade, porém podem afetar a flexibilidade e a transparência do material, características importantes em diversas aplicações (AHMAD; SULAIMAN; YUSOF, 2023). Portanto, o controle da espessura é uma etapa crítica para garantir desempenho funcional adequado e reprodutibilidade nas propriedades dos filmes.

3.7.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A permeabilidade ao vapor de água (WVTR – *Water Vapor Transmission Rate*) é uma propriedade funcional crítica no desempenho de filmes biodegradáveis aplicados em embalagens, influenciando diretamente a proteção do alimento contra ganho ou perda de

umidade. Segundo a norma ASTM E-96, essa propriedade é definida como a taxa de transmissão de vapor de água por unidade de área, gerada por diferença de umidade relativa entre os dois lados do filme.

A aplicação ideal do filme depende do grau de permeabilidade: materiais mais permeáveis são indicados para o empacotamento de hortaliças frescas, pois permitem a troca gasosa e evitam condensação, enquanto filmes menos permeáveis são preferidos para produtos desidratados, onde o bloqueio de umidade é essencial para estabilidade (PERERA; JAISWAL; JAISWAL, 2023).

A permeabilidade depende de fatores como composição química, grau de cristalinidade, estrutura morfológica e tipo de plastificante utilizado. Filmes com estrutura predominantemente amorfa e baixa densidade molecular tendem a apresentar maior difusão de vapor, não apenas pela menor organização cristalina, mas também devido à maior mobilidade das cadeias poliméricas e à presença de espaços livres na matriz. Além disso, a interação hidrofílica dessas regiões amorfas com o vapor d'água favorece o intumescimento, aumentando a taxa de permeabilidade (HABITZREUTER et al., 2021). Essa relação entre estrutura e permeabilidade também foi observada por Ahmad, Sulaiman e Yusof (2023), que destacam que plastificantes hidrofílicos elevam a permeabilidade, enquanto os hidrofóbicos podem reduzi-la.

Em estudos com filmes à base de alginato, amido e fibras vegetais como o mesocarpo do coco babaçu, verificou-se que a combinação de polímeros e a modificação da matriz polimérica permitem ajustes finos na permeabilidade ao vapor, adequando o filme a diferentes aplicações alimentares (RAPOSO et al., 2020; PAIXÃO et al., 2019b).

Assim, compreender e controlar a permeabilidade ao vapor de água é essencial para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis eficazes, ajustadas às demandas específicas de conservação de umidade dos alimentos.

3.7.5 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas de filmes biopoliméricos estão intimamente relacionadas à estrutura molecular dos materiais utilizados, especialmente à capacidade de interação entre cadeias poliméricas, o que afeta diretamente a coesão e a estabilidade do material formado. Essa interação é fortemente influenciada pela presença de plastificantes, aditivos e pela morfologia do biopolímero (ESLAMI et al., 2023).

Entre os testes disponíveis, o ensaio de tração é o método mais utilizado para avaliar o desempenho mecânico desses filmes, fornecendo dados como resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade. Esses parâmetros são essenciais para determinar a viabilidade de aplicação dos materiais em embalagens funcionais, filmes comestíveis ou sistemas de liberação controlada (FRONTIERS IN NUTRITION, 2022).

A literatura recente aponta que filmes baseados em alginato, amido ou proteínas, quando reforçados com agentes estruturantes ou com adição de plastificantes adequados, podem apresentar propriedades mecânicas compatíveis com exigências industriais. A adição de cargas funcionais ou a incorporação de estruturas organizadas, como grafeno ou nanocelulose, têm demonstrado melhorias significativas nas propriedades mecânicas, como aumento do módulo de Young de 66,16 MPa para 105,10 MPa e resistência à tração de até 3,42 MPa, resultados próximos aos obtidos por Raposo et al. (2021) para filmes de alginato, AMCB e fibras de coco babaçu (1,13 a 4,48 MPa), e superiores aos encontrados em outras combinações poliméricas com menor grau de reforço (PERERA et al., 2023). (PERERA et al., 2023).

Estudos envolvendo a incorporação de grafeno alinhado em matriz de PLA, por exemplo, demonstraram aumentos expressivos no módulo de elasticidade e na resistência à tração, mesmo com pequenas concentrações de reforço ($\sim 0,1\%$), sem comprometer a flexibilidade do material (EL MAROUAZI et al., 2022).

3.7.6 Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raio X (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em conjunto com a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS), é uma técnica amplamente aplicada na caracterização de biopolímeros, fornecendo informações sobre a morfologia e a composição química superficial dos materiais. A observação de superfícies e cortes transversais de filmes, fibras e hidrogéis permite analisar características como porosidade, uniformidade e presença de agregados. A operação em baixa voltagem (~ 5 kV) é indicada para materiais sensíveis, como os biopolímeros naturais, por reduzir a degradação térmica e o acúmulo de carga elétrica durante a varredura eletrônica (ACHARYA, 2023).

A preparação das amostras para MEV requer cuidados rigorosos, especialmente em sistemas com baixa condutividade elétrica. O uso de fita de carbono dupla face para fixação e a aplicação de uma camada condutora via *sputter coating* (tipicamente de ouro ou carbono) são procedimentos padrão para evitar o efeito de carregamento elétrico (charging) e garantir a

nitidez das imagens. Entretanto, é importante considerar que a metalização pode alterar a morfologia real de estruturas frágeis, como aerogéis e filmes porosos, gerando artefatos que comprometem a interpretação dos resultados (EGE UNIVERSITY, 2023; JUHÁSZ et al., 2021). Para minimizar esse problema, podem ser empregadas alternativas metodológicas, como MEV em baixa voltagem com detectores que dispensam a metalização, microscopia eletrônica de varredura ambiental (ESEM) ou técnicas complementares, como a microscopia de força atômica (AFM), que permitem a análise sem recobrimento metálico e preservam a integridade estrutural da amostra.

A literatura destaca que o uso de MEV e EDS em hidrogéis é especialmente valioso para a investigação da microarquitetura, sendo possível mapear a distribuição de elementos com resolução micrométrica, além de correlacionar a composição química com a resposta biológica esperada em aplicações celulares. A análise por EDS, ao detectar os raios X característicos emitidos pelos elementos constituintes, fornece uma identificação qualitativa e semiquantitativa dos elementos presentes, sendo aplicável tanto em modo pontual quanto em mapeamentos de área. Entretanto, a técnica apresenta baixa sensibilidade para elementos de baixo número atômico, como C, N e O, e o limite típico de detecção situa-se na faixa de 0,1 a 1% em peso (aproximadamente 1000 a 10.000 ppm), dependendo das condições de análise e do equipamento utilizado (MARTINEZ-GARCIA et al., 2022).

A integração dessas técnicas oferece suporte robusto à avaliação estrutural e funcional de biocompósitos e filmes poliméricos, permitindo a validação de tratamentos químicos, a identificação de resíduos e a verificação da distribuição homogênea de componentes em formulações complexas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

As membranas de biocompósitos foram confeccionadas utilizando insumos selecionados de acordo com critérios de pureza, compatibilidade química e funcionalidade na formulação final. O alginato de sódio (A-2033, Sigma, São Paulo, Brasil) possuía massa molar média de aproximadamente 90 kDa, viscosidade intrínseca de 690 mL/g a 25 °C e composição monomérica de 61% de ácido manurônico e 39% de ácido gulurônico, características que conferem elevada capacidade de formação de géis por reticulação iônica. O pó de mesocarpo

de coco babaçu foi obtido manualmente a partir do fruto, apresentando teor de umidade de $1,9 \pm 0,1\%$ (base úmida). O material passou por lavagem com água destilada para remoção de impurezas solúveis, seguido de secagem em estufa com recirculação de ar a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fanem, modelo 099 EV, Brasil). Posteriormente, foi peneirado em peneiras vibratórias padrão Tyler, sendo retido na malha de 270 mesh ($\sim 53\text{ }\mu\text{m}$ de abertura), de modo a maximizar a área superficial disponível para interações com a matriz polimérica.

O cloreto de cálcio dihidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Merck, Darmstadt, Alemanha) foi utilizado como agente reticulante, explorando sua capacidade de formar ligações iônicas entre os grupos carboxilato do alginato. O glicerol (Synth, São Paulo, Brasil) foi empregado como plastificante, atuando na redução da rigidez e aumento da flexibilidade do filme. As fibras de coco ariri (*Syagrus cocoides* Martius) foram coletadas manualmente no Campus Bacanga da Universidade Federal do Maranhão – UFMA (São Luís – MA). O tratamento químico das fibras consistiu em imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH, Isofar, Duque de Caxias, Brasil) para remoção parcial de lignina e hemicelulose, aumentando a exposição das microfibrilas de celulose e melhorando a adesão à matriz polimérica.

4.2 LOCAL DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia de Produtos e Processos em Biorrecursos (LEPPBio), localizado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA), no campus do Bacanga, na cidade de São Luís - MA.

4.3 INSTRUMENTOS/EQUIPAMENTOS/SOFTWARES UTILIZADOS

Diversos instrumentos e equipamentos foram empregados visando assegurar precisão nos dados experimentais e reprodutibilidade dos resultados. As fibras do endocarpo de coco ariri foram secas em estufas a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, seguindo os métodos AOAC 934.06 e AOAC 926.12 (AOAC INTERNATIONAL, 2007), garantindo a determinação padronizada da umidade residual. As pesagens foram realizadas em balança analítica de resolução mínima de $0,01\text{ g}$, garantindo exatidão na quantificação dos componentes.

O preparo físico das fibras envolveu a utilização de triturador industrial e tesouras manuais para redução inicial do tamanho. Para os tratamentos químicos, empregaram-se dispersor tipo Turrax e bomba peristáltica, assegurando homogeneidade e controle de fluxo

das soluções.

A caracterização mecânica foi realizada em máquina de ensaio universal, de acordo com o método ASTM D882 (ASTM, 2018), para avaliação da resistência à tração e alongamento na ruptura. A espessura dos filmes foi medida com micrômetro digital de resolução de 0,01 mm. As análises morfológicas foram efetuadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) operando a 5 kV, otimizando a visualização de superfícies poliméricas sensíveis. As análises estatísticas e o tratamento de dados foram processados nos softwares Matlab® 2013b e Statistica® 9.0 (StatSoft, EUA).

4.4 ANÁLISES, MÉTODOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente, caracterizou-se a cinética de secagem das fibras de endocarpo de coco ariri em estufas a 40, 50 e 60 °C, até atingir equilíbrio higroscópico, definido pela variação máxima de 0,01 g no peso. As fibras foram submetidas a tratamento químico com solução de NaOH 3% a 70 °C por 4 h. A escolha dessa concentração e tempo de tratamento baseou-se em estudos prévios que indicaram eficácia na remoção de lignina e hemicelulose, resultando em fibras com maior exposição superficial de celulose e melhor adesão à matriz. Após neutralização por lavagens até pH neutro, as fibras foram secas a 105 °C por 24 h, moídas em moinho de martelos e peneiradas em 120 mesh.

O planejamento experimental adotou um delineamento composto central rotacional com 11 ensaios (Tabela 1), variando-se as concentrações de fibras (CF) e de agente de reticulação (crosslinking). A formulação básica consistiu na dispersão de alginato em 100 mL de água, adição de 4 g de mesocarpo de coco babaçu (MCB), 0,8 g de glicerol e quantidades variáveis de fibras tratadas. As fibras foram misturadas à matriz a 80 °C por 30 min, seguidas da adição de solução de CaCl₂ a 80 °C por 15 min para promover a reticulação iônica. As membranas foram secas a 60 °C.

As análises incluíram: espessura (micrômetro digital), umidade (AOAC 926.12), solubilidade em água (DA SILVA et al., 2019), permeabilidade ao vapor d'água (ASTM E96/E96M-16, 2016), resistência à tração e alongamento na ruptura (ASTM D882), e morfologia (MEV). A permeabilidade ao vapor foi determinada em célula com controle ambiental, calculando-se os valores segundo a norma ASTM E96/E96M-16.

Tabela 1: Planejamento experimental para os filmes biocompósitos com fibras de coco ariri.

Ensaio	Variáveis independentes			
	Real		Codificada	
	Crosslinking (%)	CF (g)	Crosslinking (%)	CF (g)
1	1,5	0,5	-1	-1
2	8,5	0,5	1	-1
3	1,5	1,3	-1	1
4	8,5	1,3	1	1
5	0	0,8	-1,41	0
6	10	0,8	1,41	0
7	5	0	0	-1,41
8	5	1,5	0	1,41
9	5	0,8	0	0
10	5	0,8	0	0
11	5	0,8	0	0

Fonte: Autora (2025).

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS

Os filmes foram caracterizados quanto ao aspecto visual obtidos, conteúdo de umidade (ω), solubilidade (S), espessura (δ), permeabilidade ao vapor de água (PVA), espectroscopia por dispersão de energia de raio x (eds) e propriedades mecânicas.

4.5.1 Aspecto visual e coloração

Foi realizada uma avaliação visual e tátil baseada em critérios de homogeneidade (ausência de partículas visíveis), continuidade (sem rupturas ou zonas quebradiças), e uniformidade de coloração (tonalidade marrom-clara característica do amido de mesocarpo de coco babaçu), conforme protocolo de PAIXÃO (2019).

4.5.2 Conteúdo de umidade (ω)

O conteúdo de umidade foi determinado pelo método gravimétrico, conforme a AOAC 926.12 (AOAC, 2007), utilizando uma estufa a 105°C durante 24h. A fração mássica e o conteúdo de umidade foram expressos de acordo com a Equação 1:

$$\omega = \frac{m_i - m_s}{m_i} * 100 \quad (1)$$

onde:

ω = fração de massa de umidade do biopolímero;

m_i = massa total inicial da amostra em gramas;

m_s = massa seca da amostra em gramas.

4.5.3 Solubilidade em água (S)

A solubilidade em água foi determinada de acordo com a metodologia de Lopes et al. (2020), conforme a Equação 2:

$$S = \left[\frac{m_u(1 - \omega) - m_f}{m_u(1 - \omega)} \right] * 100 \quad (2)$$

A massa inicial (g) da amostra seca foi aferida e, logo após, foi imersa em 50 mL de água destilada com agitação (175 rpm) a temperatura de 25°C durante 24h, utilizando uma mesa agitadora (modelo 3545-40-EA, Termo Fisher Sci Inc, EUA). Em seguida, o material foi levado à estufa para secagem ((Nova Técnica, modelo 400-1ND, Brasil) a uma temperatura de 105°C durante 24h. Assim, pesou-se a amostra para determinar a massa final (mf) do material.

4.5.4 Espessura (δ)

A membrana foi cortada em um molde retangular e foram tiradas 9 medidas, sendo elas: lado inferior esquerdo e direito, lado lateral esquerdo, meio inferior, lado superior esquerdo e direito, lado lateral direito, meio superior e meio central com um micrômetro digital

com resolução 0,001 mm (Mitutoyo, modelo MDC-25S, Japão). A espessura final foi calculada pela média aritmética das nove medidas obtidas.

4.5.5 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

Determinou-se a permeabilidade ao vapor de água (PVA) pelo método gravimétrico, de acordo com a metodologia E95-96 (ASTM, 2012), utilizando-se de potes de acrílico completamente cheios com CaCl_2 anidro (Êxodo Científica, São Paulo, Brasil) a fim de se manter a umidade dentro do pote de aproximadamente zero. O material foi cuidadosamente colocado sob o pote, que, por sua vez, foi colocado em outro frasco, contendo uma solução de NaCl (Synth, São Paulo, Brasil) no fundo, a fim de se estabelecer uma umidade relativa de 75%; deste modo, estabelecendo-se uma diferença de pressão de vapor de aproximadamente 2.38 kPa (calculada conforme método ASTM E96, para umidade relativa de 0% vs. 75%). A taxa de aumento na massa total do filme foi obtida através de medidas monitoradas durante 72h, encontrando-se a taxa de permeabilidade de água através da membrana. Os valores de PVA foram obtidos através da Equação 3:

$$PVA = \left[\frac{G * \delta}{A_e * \Delta P_a} \right] * \quad (3)$$

Onde: δ é a espessura do filme (mm), A_e é a área exposta do filme (m^2), ΔP_a é a pressão parcial de água através do filme (kPa), G é a taxa de permeabilidade de água (g/dia), calculada através de regressão linear da relação de massa por tempo.

4.5.6 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram determinadas diretamente para os dois filmes biocompósitos selecionados no planejamento experimental, utilizando uma máquina de ensaio mecânico universal (modelo STANDARD Biopdi, EUA/Brasil), sob temperatura controlada de 25 ± 1 °C e umidade relativa de $55 \pm 2\%$, conforme o método padrão D882 da ASTM International Methods (ASTM D882, 2018). Os ensaios foram realizados com cinco repetições para cada amostra, sendo que todas apresentavam dimensões de 10 cm \times 3 cm.

A velocidade de teste de tração empregada foi de 10 mm/min. Durante os ensaios, as curvas tensão-deformação foram registradas automaticamente por um computador acoplado ao

equipamento, e as propriedades de resistência à tração (RT, MPa), alongamento na ruptura (AL, %) e módulo de elasticidade (ME, MPa) foram calculadas por meio do software da própria máquina. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada e comparativa das propriedades mecânicas dos filmes, assegurando reprodutibilidade e rigor metodológico.

As Equações (4) e (5) foram utilizadas para o cálculo da resistência à tração e alongamento na ruptura, respectivamente:

$$RT = \frac{F_m}{A_0} \quad (4)$$

$$AL = \frac{l_m - l_0}{l_0} \quad (5)$$

Onde:

F_m (N) é a força máxima antes da quebra;

A_0 é a área transversal inicial do filme;

l_m é o comprimento máximo ativo;

l_0 é o comprimento inicial do filme.

4.5.7 Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raio X (EDS)

A caracterização da composição elementar dos materiais foi realizada por meio da técnica de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS), acoplada a um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), operando com tensão de aceleração de 5 kV, visando melhor resolução de superfície e análise de elementos leves, embora possa limitar a detecção de elementos mais pesados. As amostras analisadas incluíram os pós de alginato de sódio, mesocarpo de coco babaçu, fibras tratadas de endocarpo de coco ariri e os filmes biocompósitos selecionados.

Para a preparação das amostras, estas foram fixadas sobre suportes com fita de carbono dupla face e recobertas com uma camada fina de ouro, a fim de garantir a condutividade elétrica necessária para a análise. As imagens das superfícies e das seções transversais dos filmes foram adquiridas com aumento de 100×, mesma ampliação utilizada na observação dos pós e fibras.

As análises de EDS permitiram a identificação qualitativa e semiquantitativa dos elementos presentes nas amostras, por meio da obtenção de perfis espectrais e mapas químicos.

Essa abordagem possibilitou a verificação da composição elementar dos materiais utilizados, bem como a homogeneidade de distribuição dos elementos nos biopolímeros formados.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos para a cinética de secagem foram ajustados aos modelos de Page, Henderson e Pabis, e Lewis, utilizando regressão não linear no software Matlab®. Foram calculados os coeficientes de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro relativo médio (MRE), adotando como critérios de melhor ajuste o maior R^2 e menores valores de RMSE e MRE. Os coeficientes de Arrhenius foram determinados por regressão linear dos dados logarítmicos de difusividade efetiva em função da inversa da temperatura.

Os dados experimentais do planejamento foram ajustados a uma equação polinomial de segunda ordem. Realizou-se análise de variância (ANOVA), teste F e teste de falta de ajuste, com avaliação de diferenças entre médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Apenas variáveis com nível de confiança superior a 95% foram consideradas estatisticamente significativas. A geração de superfícies de resposta foi feita no software Statistica® 9.0.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ASPECTO VISUAL

A Figura 4 apresenta as imagens das membranas desenvolvidas, sendo que no Ensaio 1 foram utilizadas fibras de algodão dispostas aleatoriamente sobre a placa, com o objetivo de testar sua influência na sustentação e nas propriedades mecânicas do biopolímero, sugerindo também um potencial aplicação de uso como curativo. Tentativas posteriores, envolvendo a aplicação de fios de algodão entrelaçados (Figura 4), não apresentaram desempenho satisfatório, embora tenham evidenciado a necessidade de incorporar camadas adicionais, como um possível “recheio”, para melhoria estrutural. Essa abordagem está em continuidade e será aprofundada em futuras publicações científicas.

Os demais filmes produzidos, no entanto, apresentaram características visuais satisfatórias, com boa resistência ao manuseio, maleabilidade, homogeneidade de superfície e facilidade de desprendimento do suporte. Notou-se que as formulações com maior teor de glicerol resultaram em filmes mais flexíveis e uniformes. A coloração final variou entre

marrom-claro e marrom-escuro, determinada principalmente pela proporção de fibras e nível de reticulação, sendo semelhante à coloração natural do mesocarpo de coco babaçu (MCB) e das fibras de endocarpo de coco ariri tratadas, o que também conferiu baixa transparência às membranas.

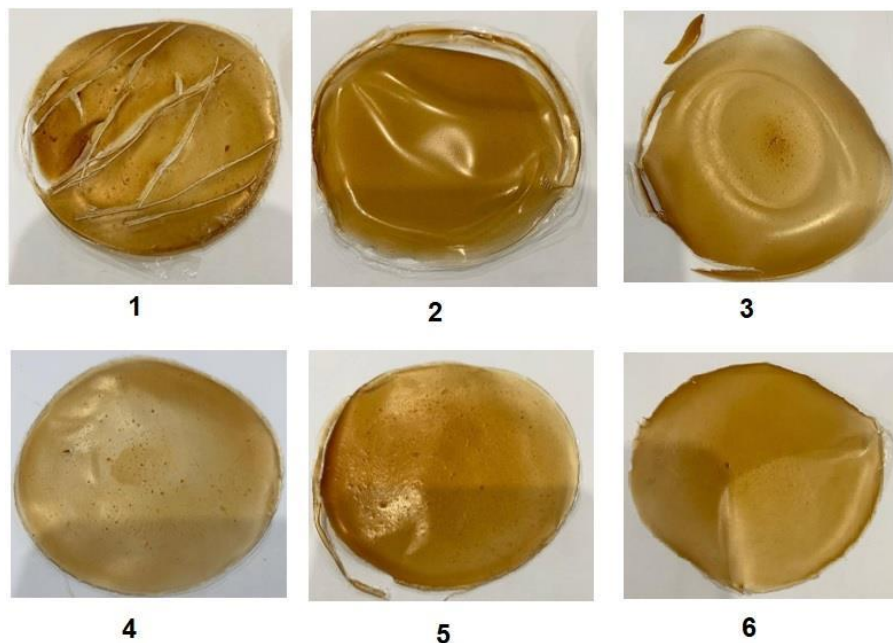


Figura 3: *Ensaio construídos com as seis formulações.* Fonte: Autora (2025)

Do Ensaio 1 ao 6, os filmes apresentaram desprendimento adequado e integridade estrutural. Já o Ensaio 7, sem fibras e com 5% de agente reticulante, resultou em um filme mais contraído e rígido. Em contrapartida, o Ensaio 6, com 10% de agente reticulante, manteve-se surpreendentemente maleável. A presença de fibras nos Ensaio 8 a 11 proporcionou estrutura semelhante, indicando que a adição de fibras combinada ao $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (5%) estabiliza mecanicamente os biopolímeros, indicando uma interação sinérgica entre a rede iônica do alginato e a estrutura física das fibras, promovendo maior resistência mecânica.

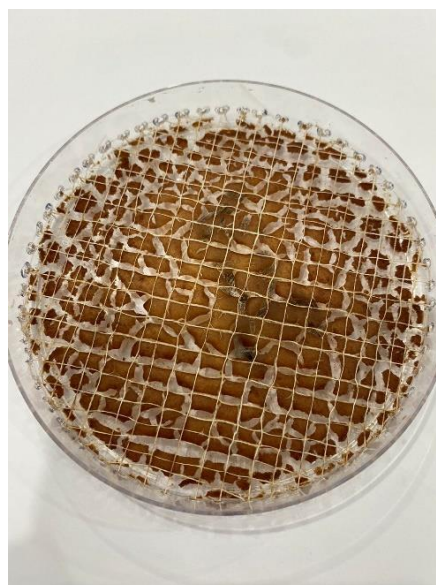


Figura 4: Ensaio 12. Imagem do teste com fibras de algodão entrelaçadas nas placas de Petri. Fonte: Autora (2025)

5.2 CONTEÚDO DE UMIDADE E SOLUBILIDADE EM ÁGUA

Os resultados referentes ao conteúdo de umidade e à solubilidade em água estão apresentados na Tabela 2. O teor de umidade variou de 16,63% (Ensaio 8) a 24,02% (Ensaio 3), valores semelhantes aos relatados por Paixão et al. (2019a) e Raposo et al. (2021), que utilizaram matrizes à base de alginato incorporadas com fibras de coco-da-baía e juçara, respectivamente. Essa variação reflete o impacto da concentração de fibras e do grau de reticulação na retenção de água pelos filmes.

Tabela 2: Conteúdo de umidade e solubilidade em água dos biopolímeros estudados no planejamento experimental.

Ensaio	Umidade (%) [*]	Solubilidade (%) [*]
1	19,628±0,002 ^c	35,659±2,051 ^c
2	19,068±0,013 ^c	19,505±1,410 ^b
3	24,022±0,007 ^d	26,254±0,950 ^c
4	16,867±0,011 ^{ab}	16,968±0,889 ^a
5	19,038±0,016 ^c	34,171±1,192 ^c
6	18,184±0,009 ^{bc}	30,605±1,508 ^d
7	17,956±0,014 ^b	26,200±1,241 ^c
8	16,627±0,005 ^a	28,664±2,171 ^c
9	18,803±0,020 ^c	25,571±0,991 ^c
10	18,532±0,011 ^b	24,648±2,142 ^c
11	18,091±0,042 ^b	23,339±1,449 ^c

^{*}Média ± desvio padrão das repetições. As mesmas letras na mesma coluna indicam não haver diferença significativa entre os valores das médias (p<0,05). Fonte: Autora (2025).

A média geral de solubilidade em água foi de 26,52%, apresentando ampla variação entre os ensaios. O valor mínimo foi de 16,97% (Ensaio 4) e o máximo de 35,66% (Ensaio 1). Essa dispersão pode ser explicada pela heterogeneidade da matriz e pela interação das fibras com a rede polimérica. Resultados similares foram obtidos por Paixão et al. (2019a), com valor de 23,92% para biopolímeros com fibras de coco-da-baía tratadas.

Apesar do caráter hidrofílico do alginato, a incorporação de MCB e fibras de ariri reduziu significativamente a solubilidade dos compósitos. Esse comportamento pode estar relacionado à possível obstrução de porosidades hidrofílicas ou à natureza menos hidrossolúvel das fibras utilizadas, o que dificulta a difusão da água pela matriz. Além disso, a interação física entre as fibras e a rede polimérica pode resultar na formação de uma estrutura mais densa e menos permeável, atuando como barreira física à penetração de água. Paixão et al. (2019b) relataram que filmes de alginato sem reforço de fibras, mesmo quando reticulados com cálcio, apresentaram solubilidade elevada, próxima de 100%, indicando que a ausência de reforço estrutural vegetal compromete a estabilidade hidrofílica do material. Esse resultado reforça o papel do cálcio como agente reticulante e das fibras vegetais como estabilizadores estruturais, capazes de reduzir a solubilidade e melhorar o desempenho funcional dos filmes. Outros estudos corroboram essa tendência, como os de Ortiz et al. (2018) e Raposo et al. (2021), que relataram comportamento semelhante em sistemas reforçados com celulose microfibrilada ou fibras da juçara.

Do ponto de vista estatístico, os ensaios 9, 10 e 11 apresentaram resultados semelhantes para ambos os parâmetros, evidenciando boa repetibilidade experimental ao nível de 95% de confiança ($p < 0,05$).

5.3 ESPESSURA E PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (PVA)

Os resultados de espessura e permeabilidade ao vapor de água (PVA) estão apresentados na Tabela 3, permitindo uma análise comparativa entre as diferentes formulações e condições experimentais. As espessuras variaram de 0,24 mm (Ensaio 5) a 0,94 mm (Ensaio 8), valores superiores aos relatados por Paixão et al. (2019a) para filmes reforçados com fibras de coco-da-baía (0,14–0,69 mm) e por Babapour; Jalali; Mohammadi Nafchi (2021) para filmes de amido (0,12–0,15 mm).

O aumento de espessura observado pode estar diretamente associado ao maior teor de sólidos presente na formulação, o que favorece a formação de camadas mais espessas durante

a secagem, fenômeno também descrito por Shankar; Wang; Rhim (2017), que ressaltam o impacto da carga de fibras no volume final do filme. As fibras atuam como reforços estruturais que aumentam o volume sólido, mas também interferem na mobilidade da matriz durante a formação, resultando em maior espessura.

Curiosamente, o Ensaio 7, mesmo sem fibras, apresentou espessura elevada. Isso indica que outros fatores, como o efeito do agente reticulante sobre a viscosidade da formulação e o empacotamento molecular, também desempenham papel relevante. A maior concentração de reticulante pode induzir uma organização mais rígida e compacta da rede polimérica durante a secagem, favorecendo o espessamento do filme. Assim, confirma-se que a espessura não depende exclusivamente do teor de fibras, mas também da interação sinérgica entre todos os constituintes e do grau de reticulação, que afeta diretamente a mobilidade das cadeias poliméricas e o volume final do filme.

Quanto à permeabilidade ao vapor de água, os valores variaram de 9,83 a 74,92 $\text{g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{dia}\cdot\text{kPa}$, sendo o valor mais elevado registrado no Ensaio 8. O aumento da PVA está relacionado à formação de cavidades e poros na estrutura do filme, que funcionam como canais de difusão, favorecendo o fluxo de vapor. Essa interpretação encontra suporte nos resultados de Do Evangelho et al. (2019), que correlacionaram maiores valores de PVA com porosidade estrutural e heterogeneidade interna dos filmes.

Comparativamente, Paixão et al. (2019a) obtiveram valores de 7,75 a 56,21 $\text{g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{dia}\cdot\text{kPa}$ para filmes similares, enquanto Mahuwala et al. (2020), trabalhando com filmes de amido/ágar reforçados com nanopartículas, reportaram valores muito inferiores (1,53 a 1,88 $\text{g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{dia}\cdot\text{kPa}$), demonstrando que a microestrutura e a composição são determinantes para a barreira ao vapor. Como parâmetro de referência, o polietileno de baixa densidade (PEBD) apresenta PVA de aproximadamente 0,072 $\text{g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{dia}\cdot\text{kPa}$ (BRASIL et al., 2022; OTONI et al., 2017), evidenciando que, embora os biopolímeros tenham desempenho inferior nesse aspecto, ainda podem ser adequados para embalagens que requeiram permeabilidade controlada.

Foi possível observar uma tendência de aumento da PVA com o acréscimo de espessura nos Ensaios 6 a 8, provavelmente associada à formação de microestruturas mais porosas ou heterogêneas. Esse comportamento indica que, nessas condições, o aumento da espessura não resultou em maior barreira ao vapor — como poderia ser esperado para filmes densos —, mas sim em maior fluxo difusivo, efeito relacionado à distribuição e ao tamanho dos poros. Diversos autores (BRASIL et al., 2022; PAIXÃO et al., 2019b; SANTANA; KIECKBUSCH, 2013)

apontam que, embora a espessura possa influenciar as propriedades de barreira, esse efeito está condicionado à morfologia interna do filme: estruturas densas e homogêneas reduzem a permeabilidade, enquanto estruturas porosas a aumentam.

Com base na análise do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), as formulações F1 (8,5% de crosslinking + 0,8 g de fibras) e F2 (10% de crosslinking + 0,8 g de fibras) apresentaram o melhor equilíbrio entre resistência mecânica e propriedades de barreira, sendo as mais indicadas para aplicações como embalagens biodegradáveis ativas ou passivas, especialmente na conservação de produtos com vida de prateleira intermediária e que demandem controle moderado de umidade.

Tabela 3: Espessura e Permeabilidade ao vapor de água dos biopolímeros estudados no planejamento experimental.

Ensaio	Espessura (mm)*	Permeabilidade ao Vapor de Água [(g.mm)/(m ² .dia.kPa)]*
1	0,304±0,022 ^b	18,095±1,875 ^d
2	0,297±0,009 ^b	13,300±2,340 ^b
3	0,343±0,007 ^c	13,225±2,355 ^b
4	0,308±0,012 ^b	14,185±1,925 ^b
5	0,243±0,018 ^a	9,830±1,630 ^a
6	0,551±0,031 ^d	31,140±1,630 ^c
7	0,831±0,019 ^c	66,485±2,245 ^g
8	0,942±0,017 ^f	74,915±3,895 ^h
9	0,547±0,018 ^d	47,400±4,900 ^f
10	0,531±0,095 ^d	42,855±3,745 ^f
11	0,535±0,017 ^d	48,475±2,585 ^f

*Média ± desvio padrão das repetições. As mesmas letras na mesma coluna indicam não haver diferença significativa entre os valores das médias (p<0,05). Fonte: Autora (2025).

5.4 ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA DE RAIOS X (EDS)

A análise de espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS) foi realizada nos principais componentes utilizados na formulação dos biopolímeros (Figura 5), assim como nas formulações selecionadas (Figura 6), com aquisição de dados em pontos previamente definidos nas imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os espectros gerados (Figuras 5b, 5d e 5f; Figuras 6b e 6d) fornecem a composição elementar local em termos de porcentagem de massa, permitindo uma análise qualitativa e semiquantitativa da distribuição dos elementos constituintes nas amostras.

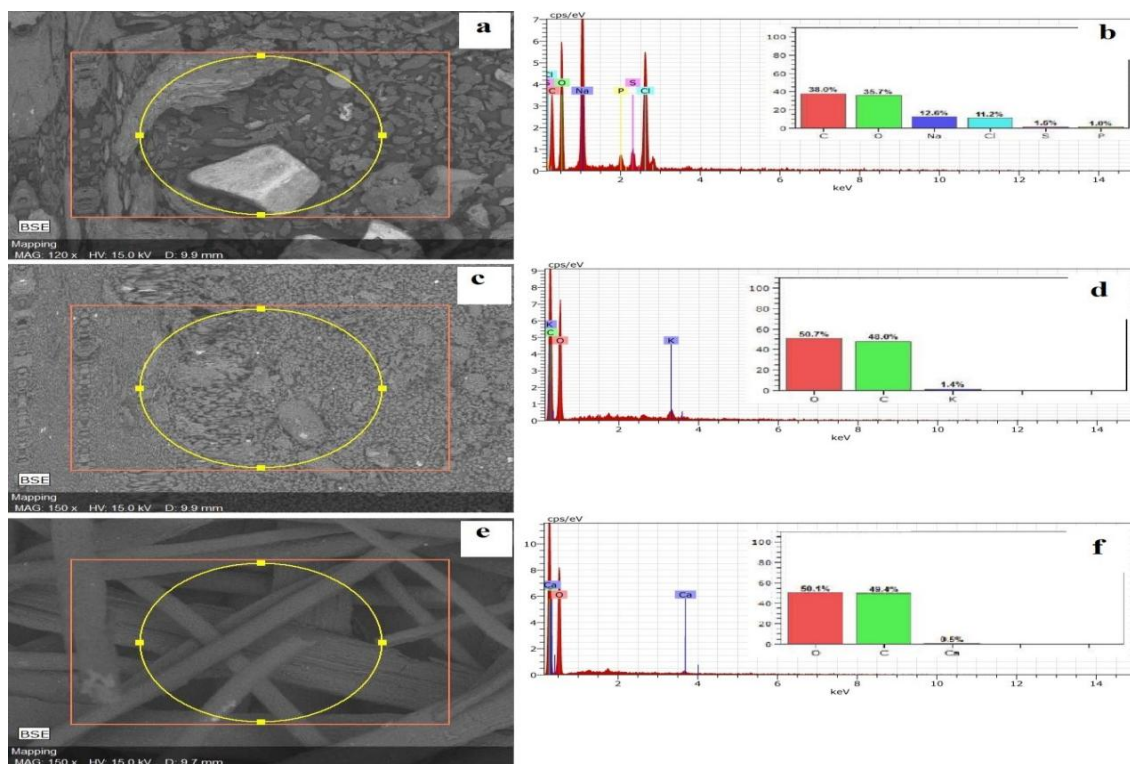


Figura 5: Imagens capturadas pelo MEV com os respectivos pontos para a análise de composição elementar do alginato de sódio (a), mesocarpo de coco babaçu (c) e fibras de ariri (e) e espectros de EDS com composição dos elementos do alginato de sódio (b), mesocarpo de coco babaçu (d) e fibras de ariri (f)

Na Figura 5 é possível observar que os elementos majoritários presentes no alginato de sódio, no mesocarpo de coco babaçu (MCB) e nas fibras de ariri são o carbono (C) e o oxigênio (O), o que é compatível com a natureza orgânica e polissacarídica desses materiais. No espectro do alginato (Figura 5b), além dos elementos C (38,0%) e O (36,7%), foram detectados sódio (Na, 12,6%), cloro (Cl, 11,2%), enxofre (S, 1,6%) e fósforo (P, 1,0%). A presença de S e P pode estar associada a resíduos de reagentes utilizados no processo de extração ou purificação do alginato, ou ainda a contaminantes provenientes do processo industrial. Esses teores também podem ser compatíveis com especificações fornecidas por fabricantes de alginato de grau técnico, não sendo necessariamente indicativos de impurezas prejudiciais ao desempenho do material.

No caso do MCB (Figura 5d), a composição também foi dominada por C (48,0%) e O (50,7%), com presença de potássio (K, 1,4%). Resultados semelhantes foram encontrados por Araújo (2016) e Gomes (2017), que analisaram amostras de MCB da mesma região, observando proporções compatíveis de oxigênio, carbono e potássio em suas análises elementares.

Para as fibras de ariri (Figura 5f), a composição manteve os elementos principais (C = 49,4%; O = 50,1%), com adição de cálcio (Ca) em baixa concentração (0,5%). A presença de cálcio pode estar associada à própria matriz vegetal original ou, alternativamente, a vestígios

provenientes do processo de reticulação com cloreto de cálcio dihidratado. Nas formulações finais selecionadas, F1 (8,5% de reticulação + 0,8 g de fibra) e F2 (10% de reticulação + 0,8 g de fibra), apresentadas na Figura 6, os elementos majoritários permaneceram sendo o oxigênio e o carbono, como esperado pela predominância da matriz alginato e MCB. No entanto, observou-se que as concentrações de cloro, cálcio e sódio foram mais elevadas na formulação F2 (Figura 6d) quando comparada à F1 (Figura 6b). Esse comportamento confirma a influência direta do aumento da concentração de cloreto de cálcio dihidratado no processo de reticulação iônica, promovendo maior incorporação desses íons no biopolímero final, como também apontado por Acharya (2023) e Martinez-Garcia et al. (2022) em seus estudos de mapeamento elementar de hidrogéis.

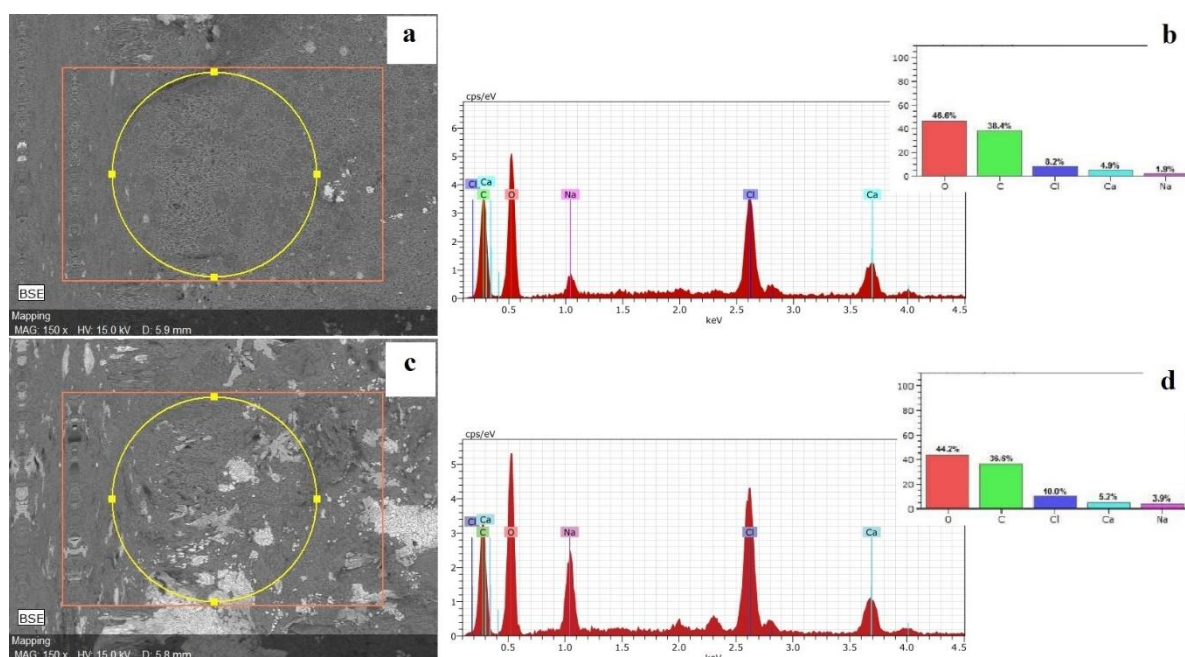


Figura 6: Imagens capturadas pelo MEV com os respectivos pontos para a análise de composição elementar dos biopolímeros F1 (a) e F2 (c) e espectros de EDS com composição dos elementos dos biopolímeros F1 (b) e F2 (d). Fonte: Autora (2025).

Portanto, os resultados da EDS reforçam a compatibilidade química dos componentes utilizados na formulação, evidenciam a eficácia do processo de reticulação, e confirmam a presença dos elementos-chave na estrutura dos biocompósitos desenvolvidos.

5.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A Tabela 4 apresenta os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos biopolímeros reformulados. As análises estatísticas indicaram diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre as

formulações para todos os parâmetros avaliados. As concentrações de alginato, mesocarpo de coco babaçu (MCB) e fibras tratadas foram mantidas constantes, variando apenas a concentração do agente de reticulação.

Do ponto de vista técnico, o biopolímero F2 apresentou valores mais elevados de umidade, solubilidade, espessura e permeabilidade ao vapor de água (PVA) em comparação com F1, efeito atribuído à maior concentração de cloreto de cálcio na matriz filmogênica. A reticulação pode ter promovido o fechamento da cadeia polimérica; entretanto, no compósito F2, a maior concentração de 10% de reticulante pode ter promovido uma densidade de reticulação excessiva, reduzindo o volume livre entre cadeias e, consequentemente, aumentando a rigidez, mas também levando a uma fragilidade estrutural que favorece a ruptura, conforme descrito por DA SILVA et al. (2019), o que explica o aumento observado nessas propriedades.

Tabela 4: Resultados das propriedades físicas dos biopolímeros reformulados.

Caracterizações	F1	F2
Conteúdo de umidade (%)*	17,301±0,002 ^a	18,184±0,009 ^b
Solubilidade em água (%)*	20,173±0,920 ^a	30,605±1,508 ^b
Espessura (mm)*	0,310±0,006 ^a	0,551±0,031 ^b
PVA (g.mm/m ² .dia.kPa)*	14,210±0,985 ^a	31,140±1,630 ^b
Tensão na ruptura (MPa)*	3,415±1,501 ^a	1,686±0,345 ^b
Alongamento na ruptura (%)*	2,625±0,063 ^b	2,222±0,065 ^a
Módulo de Young (MPa)*	66,162±2,990 ^b	105,097±4,871 ^a

*Média ± desvio padrão das repetições. As mesmas letras na mesma linha indicam não haver diferença significativa entre os valores das médias ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey. Fonte: Autora (2025).

De acordo com Brasil et al. (2022), parâmetros mecânicos, estruturais e químicos dos polímeros, bem como fatores externos, influenciam diretamente suas respostas mecânicas. Entre as características estruturais, destacam-se a cristalinidade, a presença de grupos polares e a ocorrência de ligações cruzadas, enquanto fatores externos incluem o uso de plastificantes, elastômeros e reforços com fibras ou partículas inorgânicas (PAIXÃO et al., 2019b; RAPOSO et al., 2021). Além disso, a espessura do filme e o teor de umidade também exercem influência sobre a resistência mecânica (BASIAK; LENART; DEBEAUFORT, 2017; BRASIL et al., 2022).

A tensão na ruptura foi de 3,42 MPa para F1 e 1,69 MPa para F2. O maior valor observado para F1 pode estar relacionado à interação entre os grupos polares presentes nas matrizes

poliméricas (alginato e amido), à possível cristalização do cálcio e à presença do reforço fibroso. A adição de fibras pode ter atuado como reforço físico, restringindo a mobilidade das cadeias e aumentando a rigidez local, o que pode ter contribuído para o aumento da resistência mecânica observada em F1. Entretanto, essa ocupação física também pode dificultar interações poliméricas, o que, em alguns casos, tende a reduzir a coesão da matriz. Por outro lado, o aumento da concentração de reticulante em F2 não intensificou esse fenômeno, resultando em menor tensão na ruptura. Esses resultados estão em concordância com os obtidos por Mali, Grossmann e Yamashita (2010), que observaram maior resistência em filmes com maior grau de interação da matriz.

Os resultados de tensão na ruptura estão dentro da faixa encontrada por Raposo et al. (2021) para filmes de alginato, AMCB e fibras do endocarpo de coco babaçu (1,13 a 4,48 MPa), e por Paixão et al. (2019b) para misturas com fibras do coco-da-baía (0,82 a 2,35 MPa). Foram, no entanto, inferiores aos valores observados em sistemas com alginato combinado a pectina e goma xantana (13,8 a 119,5 MPa) (YANG et al., 2021) ou com poliuretano (29,65 a 39,81 MPa) (WANG et al., 2019).

No tocante ao alongamento na ruptura, os valores obtidos para F1 (2,63%) e F2 (2,22%) foram baixos. Esse comportamento pode ter sido influenciado pelo efeito da reticulação, que reduziu a flexibilidade dos filmes. Além disso, a presença de sais de cálcio pode ter deslocado o plastificante (glicerol), diminuindo sua ação flexibilizante. Araruna (2021) define o alongamento como a variação percentual no comprimento do filme quando submetido a tensão até a ruptura.

Os valores observados neste estudo foram inferiores aos de Raposo et al. (2021), que relataram alongamento entre 4,18% e 7,60% para compósitos de alginato, AMCB e fibras de coco babaçu; Paixão et al. (2019b), com valores entre 5,06% e 7,31% para fibras de coco-da-baía; e Santana et al. (2019), que trabalharam com filmes de amido de mandioca reforçados com celulose e nanopartículas de prata (3,70% a 7,20%). Valores ainda mais elevados foram registrados por Babapour, Jalali e Mohammadi Nafchi (2021) em filmes de amido de batata (18,45% a 27,64%), Yang et al. (2021) com filmes de alginato/pectina/goma xantana (13,11% a 19,02%), e Wang et al. (2019) com filmes de alginato e poliuretano (9,65% a 256,4%).

Quanto ao módulo de Young, os valores variaram entre 66,16 MPa (F1) e 105,10 MPa (F2), sugerindo aumento da rigidez mecânica com o incremento da reticulação. Babapour, Jalali e Mohammadi Nafchi (2021) também relataram valores entre 61,05 e 139,11 MPa para filmes

de amido de batata, enquanto López, Osorio e Checa (2019) observaram valor de 105,04 MPa para filmes de pectina e óleo mineral.

Esses resultados reforçam que o crosslinking exerce efeito significativo sobre as propriedades mecânicas dos biopolímeros, aumentando a rigidez e a tensão de ruptura, e diminuindo o alongamento. Esse comportamento é atribuído ao efeito desplastificante, que reduz o volume livre entre as cadeias e intensifica as interações polímero-polímero, restringindo a mobilidade molecular (ARARUNA, 2021; BRASIL et al., 2022).

6 CONCLUSÃO

Com base nos testes realizados, observou-se que os filmes biopoliméricos contendo fibras tratadas do endocarpo de coco ariri apresentaram características morfológicas, estruturais e físico-mecânicas adequadas para aplicações como embalagens biodegradáveis. A análise visual demonstrou boa homogeneidade e coloração marrom uniforme, compatível com a presença de fibras naturais, apresentando flexibilidade satisfatória em todas as formulações contendo fibras.

A umidade dos filmes permaneceu dentro da faixa esperada para materiais hidrofílicos, enquanto a adição de fibras e a variação do teor de agente de reticulação demonstraram efeito redutor sobre a solubilidade em água, indicando maior integridade estrutural. A espessura aumentou proporcionalmente com o incremento do teor de agente de reticulação, influenciando diretamente as demais propriedades.

A permeabilidade ao vapor de água (PVA) foi elevada em comparação com a de polímeros sintéticos, porém adequada para o uso em embalagens ativas ou biodegradáveis de alimentos com baixa umidade. A espectroscopia por dispersão de energia (EDS) confirmou a presença majoritária de carbono e oxigênio nas formulações, com teores crescentes de cálcio e cloro nas amostras com maior concentração de CaCl_2 , o que corrobora o efeito do processo de reticulação iônica.

Do ponto de vista mecânico, os filmes apresentaram comportamento típico de biocompósitos com matriz polimérica e reforço lignocelulósico: a formulação F1 (8,5% de CaCl_2 + 0,8 g de fibra) demonstrou melhor desempenho em termos de resistência à tração, o que pode estar relacionado ao equilíbrio entre rigidez e flexibilidade conferido pela concentração intermediária de reticulante, suficiente para estabilizar a matriz polimérica sem torná-la excessivamente rígida. enquanto a F2 (10% de CaCl_2 + 0,8 g de fibra) evidenciou maior

rigidez (módulo de Young), mas menor alongamento, confirmando o efeito desplastificante promovido pelo reticulante.

Portanto, os filmes desenvolvidos apresentam potencial para aplicações como embalagens sustentáveis, com destaque para a formulação F1. Estudos complementares de biodegradabilidade, atividade microbiológica e propriedades funcionais, como barreira a gases, resistência térmica e atividade oxidante, são recomendados para validar sua viabilidade frente a alternativas sintéticas.

REFERÊNCIAS

A., PAIXÃO, L. C., DA SILVA, L. J. S., ROCHA, A. A., BARROS FILHO, A. K. D., & SANTANA, A. A. (2020). Elaboration and characterization of biopolymer films with alginate and babassu coconut mesocarp. *Carbohydrate polymers*, 234, 115747.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023. São Paulo: ABRELPE, 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/>. Acesso em: 3 ago. 2025.

ACHARYA, Aniruddha. Development and application of SEM/EDS in biological, biomedical & nanotechnological research. *arXiv*, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2311.00667>. Acesso em: 28 jul. 2025.

AHMAD, N. M.; SULAIMAN, N. S.; YUSOF, N. A. M. Natural plasticizers for biopolymer films: A review. *Polymers*, v. 15, n. 6, p. 1350, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15061350>.

AOAC International. (2007). Official methods of analysis of AOAC international. (18th ed.). AOAC International; Library Hub Discover.

ARARUNA, F. O. S., ARARUNA, F. B., PEREIRA, L. P. L. A., BRITO, M. C. A., GOMES, P. D. B., SANTOS, D. C. P., FIRMO, W. DA C. A., ROCHA, A. A., RODRIGUES, K. A. DA F., SANTANA, A. A., NUNES, L. C. C., & COUTINHO, D. F. (2021). Development and characterization of curative films based on *Attalea speciosa* Mart mesocarp. Ex Spreng and glycolic extract of *Aloe vera* (L.) Burm. f. *Research, Society and Development*, 10(2), 1-15. 10.33448/rsd-v10i2.12520. <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/12520>.

ARARUNA, R. A. Propriedades de barreira e mecânicas de filmes biodegradáveis: uma revisão. *Revista Ciência em Foco*, v. 13, n. 1, p. 21–33, 2021.

BABAPOUR, M.; JALALI, V.; MOHAMMADI NAFCHI, A. Biodegradable starch-based films: effect of modified starch and reinforcement agents on mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 185, p. 442–450, 2021.

BABAPOUR, S.; JALALI, M.; MOHAMMADI NAFCHI, A. Development of starch-based biodegradable film containing betel leaf extract and nanoclay. *Food Science & Nutrition*, v. 9, n. 4, p. 2245–2253, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.2193>.

BANGAR, S. P.; SUNOOJ, K. V.; NAVAF, M.; PHIMOLSIRIPOL, Y.; WHITESIDE, W. S. Recent advancements in cross-linked starches for food applications – a review. *International Journal of Food Properties*, v. 27, n. 1, p. 411–430, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2024.2318427>.

BASIAK, E.; LENART, A.; DEBEAUFORT, F. Effect of starch type on the physico-chemical properties of edible films. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 98, p. 348–356, 2017.

BORGES, Maria Eduarda Campos; OLIVEIRA, Aline Fernandes de; SILVEIRA, Cristian Berto da. Desenvolvimento e caracterização de biofilmes de alginato de sódio com cloreto de cálcio: efeito do processo de reticulação. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, v. 1, n. 1, p. 1-6, 2019.ta

BRASIL, D. M. F. et al. Biopolímeros com propriedades barreira e mecânicas aprimoradas por fibras vegetais. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 32, e2022032, 2022.

BRASIL, L. M. et al. Biopolímeros: propriedades e aplicações em embalagens biodegradáveis. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 32, e2022022, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20210095>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: MMA, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/>. Acesso em: 3 ago. 2025.

C16 Committee. (2017). Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0096-00>

CARNEIRO, M. I. F.; SAKOMURA, N. K.; KAWAUCHI, I. M.; SILVA, E. P.; ARAUJO, J. A.; FERNANDES, J. B. K.; GOMES FILHO, J. S. avaliação do mesocarpo de babaçu (*orbignya ssp*) na alimentação de frangos de corte. *Ars Veterinaria*, v.29, n.3, p. 175-182, 2013.

CINELLI, B.A.; LÓPEZ, J.A.; CASTILHO, L.R.; FREIRE, D.M.G.; CASTRO A.M. Granular starch hydrolysis of babassu agroindustrial residue: a bioprocess within the context of biorefinery, *Fuel*, v.124, p.41-48, 2014.

COSTA, M. J. et al. Physicochemical properties of alginate-based films: Effect of ionic crosslinking and mannuronic and guluronic acid ratio. *Food Hydrocolloids*, v. 81, p. 442–448, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.014>. Acesso em: 3 ago. 2025.

DA SILVA, T. L. et al. Efeitos do agente de reticulação na estrutura e propriedades mecânicas de filmes de alginato. *Revista Matéria*, v. 24, n. 1, p. e12493, 2019.

DO EVANGELHO, J. B. et al. Effect of different starch sources on the properties of biodegradable films. *Carbohydrate Polymers*, v. 224, 115161, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115161>.

EGE UNIVERSITY Central Research Test and Analysis Laboratory. Sputter Coating – SEM – Sample Preparation Techniques. JEOL Resources, 14 jun. 2023. Disponível em: <https://www.jeolusa.com/RESOURCES/Sample-Preparation/Documents-Downloads/sample-preparation-techniques-conductive-coatings>. Acesso em: 28 jul. 2025.

EL MAROUAZI, H. et al. Great enhancement of mechanical features in PLA based composites containing aligned few layer graphene. *arXiv*, Oct. 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2210.07624>. Acesso em: 28 jul. 2025.

ESLAMI, Z.; ELKOUN, S.; ROBERT, M.; ADJALLÉ, K. A review of the effect of plasticizers on the physical and mechanical properties of alginate-based films. *Molecules*, v. 28, n. 18, p. 6637, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28186637>.

FRONTIERS IN NUTRITION. Biopolymer based functional films for packaging applications: a review. *Frontiers in Nutrition*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1000116>.

Geyer, R. (2020). Chapter 2—Production, use, and fate of synthetic polymers. Em T. M. Letcher (Org.), *Plastic Waste and Recycling* (p. 13–32). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5>

HABITZREUTER, Filipe; GABRIEL, Amanda Grizzo; SEMENSATO, Leonardo Henrique; SANTOS, Danilo Martins dos; CAMPANA FILHO, Sérgio Paulo. Biopolímeros, processamento e aplicações. In: HABITZREUTER, F. et al. (org.). Capítulo 3: Biopolímeros, Processamento e Aplicações. 2021.

JUHÁSZ, L. et al. False morphology of aerogels caused by gold coating for SEM imaging. *Polymers*, v. 13, n. 4, p. 588, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13040588>.

LIMA, Meyrelle Figueiredo. Estudo do comportamento do mesocarpo de coco babaçu na formação de biofilmes aditivados com compostos antioxidantes – cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*). 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/4354>. Acesso em: 14 dez. 2023.

LOPEZ, C. G.; OSORIO, M. L.; CHECA, M. F. Biopolymer films from pectin reinforced with mineral oil: mechanical and optical evaluation. *Food Hydrocolloids*, v. 87, p. 905–912, 2019.

MAHUWALA, H. et al. Development and characterization of biodegradable starch/agar-based composite films reinforced with silver nitrate and ZnO nanoparticles. *Journal of Food Process Engineering*, v. 43, n. 12, e13491, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13491>.

MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. Effects of yam starch and glycerol concentration on film properties. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 20, n. 4, p. 254–259, 2010.

MANIGLIA, B.C.; TAPIA-BLÁCIDO, D. Isolation and characterization of starch from babassu mesocarp. *Food Hydrocolloids*, v.55, p.47-55, 2016.

MARGEM, Jean Igor. Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva. Campos dos Goytacazes, 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2013.

MARTINEZ-GARCIA, F. D. et al. A beginner's guide to the characterization of hydrogel microarchitecture for cellular applications. *Gels*, v. 8, n. 9, p. 535, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels8090535>. PMID: 36135247; PMCID: PMC9498492.

MÜLLER, G., SCHÖPPER, C., VOS, H., KHARAZIPOUR, A., & POLLE, A. ftratr spectroscopic analyses of changes in wood properties during particle- and fibreboard production of hard- and softwood trees. *BioResources*, 2008 Nov 12.

ONO, Rodrigo. Obtenção e caracterização de compósitos de copolímero aleatório de polipropileno e carga de amido de mandioca. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.

ORTIZ, L. M. G. et al. Mechanical and barrier properties of soy protein films reinforced with cellulose microfibers. *Food Hydrocolloids*, v. 82, p. 253–263, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.04.006>.

OTONI, C. G. et al. Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 57, n. 5, p. 1328–1340, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.916762>.

PAIXÃO, J. A. et al. Desenvolvimento de filmes biodegradáveis com fibras do endocarpo de coco-da-baía. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 4, p. 271–276, 2019b.

PAIXÃO, L. C.; LOPES, I. A.; BARROS FILHO, A. K. D.; SANTANA, A. A. Alginate biofilms plasticized with hydrophilic and hydrophobic plasticizers for application in food packaging. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 136, n. 48, p. 48263, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.48263>. Acesso em: 3 ago. 2025.

PAIXÃO, L. C., LOPES, I. A., BARROS FILHO, A. K. D., SANTANA, A. A. (2019). Alginate biofilms plasticized with hydrophilic and hydrophobic plasticizers for application in food packaging. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(48), 48263. doi:10.1002/app.48263.

PAIXÃO, T. R. S. et al. Desenvolvimento de biopolímeros à base de alginato, mesocarpo de coco babaçu e fibras de coco-da-baía. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 12, p. 29939–29955, 2019a. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-221>.

PAIXÃO, T. R. S. et al. Influência do agente de reticulação na estabilidade de biopolímeros à base de alginato. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 12, p. 30021–30035, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-222>.

PERERA, K. Y.; JAISWAL, A. K.; JAISWAL, S. Biopolymer-based sustainable food packaging materials: Challenges, solutions, and applications. *Foods*, v. 12, n. 12, p. 2422, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12122422>.

PERERA, K. Y.; JAISWAL, A. K.; JAISWAL, S. Biopolymer-based sustainable food packaging materials: challenges, solutions, and applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1088211>.

PINHEIRO, Eduardo Mendonça; CORRÊA, Thais Roseli; ARAÚJO, José Ribamar Gusmão. A palmeira de babaçu e a importância do mesocarpo para alimentação humana: uma revisão. *Revista Convibra*, v. 17, n. 7, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.7-140. Disponível em: <https://convibra.org/publicacao/papers/index/?id=revconv.17n.7-140>. Acesso em: 3 ago. 2025.

PLASTIC OCEANS. (2022, novembro 8). The Facts. Plastic Oceans International. <https://plasticoceans.org/the-facts/>

RAPOSO, A. K. DA S., PAIXÃO, L. C., ROCHA, A. A., LOPES, I. A., SANTOS, G. A. S., RIBEIRO, G. A. C., DE MENEZES, A. S., BARROS FILHO, A. K. D., SANTANA, A. A. (2020). Characterization of biodegradable films produced from mixtures of alginate, starch and babassu fibers. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-15. Doi: 10.1007/s10924-020-01952-z

RAPOSO, A. K. da S. et al. Characterization of biodegradable films produced from mixtures of alginate, starch and babassu fibers. *Journal of Polymers and the Environment*, p. 1–15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01952-z>. Acesso em: 3 ago. 2025.

RAPOSO, A. R. F. et al. Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis de alginato com fibras da juçara. *Revista Ciência Agronômica*, v. 52, n. 1, p. 130–139, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210015>.

RAPOSO, M. F. et al. Filmes biodegradáveis com fibras do endocarpo de coco babaçu: avaliação das propriedades físico-mecânicas. *Revista Matéria*, v. 26, n. 1, p. e12463, 2021.

RODRIGUES, A. A. M.; COSTA, R. R.; SANTOS, L. F.; SILVA, S. de M.; BRITTO, D.; LIMA, M. A. C. de. Properties and characterization of biodegradable films obtained from

different starch sources. *Food Science and Technology (Campinas)*, v. 41, supl. 2, p. 476–482, 2021. DOI: 10.1590/FST.28520. Acesso em: 4 ago. 2025.

ROMANI, V. P.; PRENTICE-HERNÁNDEZ, C.; MARTINS, V. G. Active and sustainable materials from rice starch, fish protein and oregano essential oil for food packaging. *Industrial Crops and Products*, v. 97, p. 268–274, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.026>. Acesso em: 3 ago. 2025.

SANTANA, R. C.; KIECKBUSCH, T. G. Permeabilidade ao vapor de água, ao oxigênio e ao gás carbônico de filmes de amido e gelatina. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 33, n. 1, p. 123–130, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612013005000020>.

SANTANA, R. F.; KIECKBUSCH, T. G.; OLIVEIRA, L. M. Filmes biodegradáveis de amido de mandioca reforçados com nanocelulose e prata. *Food Hydrocolloids*, v. 87, p. 293–301, 2019.

SENTURK PARREIDT, T.; MÜLLER, K.; SCHMID, M. Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods*, v. 7, n. 10, Artigo 10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods7100170>. Acesso em: 3 ago. 2025.

SHANKAR, S.; WANG, L. F.; RHIM, J. W. Preparation of alginate/collagen/CMC-based biodegradable films and their characterization. *Food Hydrocolloids*, v. 71, p. 161–168, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.005>.

SHEN, L.; HAUFE, J.; PATEL, M. K. Product overview and market projection of emerging bio-based plastics. Utrecht: Utrecht University, 2009. Disponível em: <https://www.bio-based.eu/download/?did=6294>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SILVA, M. V. V.; SALES, J. F.; SILVA, F. G.; RUBIO-NETO, A.; ALBERTO, P. S.; PEREIRA, F. D. The influence of moisture on the in vitro embryogermmination and morphogenesis of babassu (*Orbignya phalerata* Mart.). *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 34, p. 453–458, 2012.

SILVA, Nohana de Carvalho. Avaliação sensorial de biscoito tipo cookie contendo farinha do mesocarpo de babaçu. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2014. Disponível em:

<https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/164/1/TCC%20de%20Nohana%20de%20Carvalho%20Silva.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2023.

VIÉGAS, Larissa Paiva. Preparação e caracterização de filmes biodegradáveis a partir de amido com quitosana para aplicação em embalagens de alimentos. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2016. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Vers%C3%A3o-Impress%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 12 set. 2023.

WANG, Y. et al. Mechanical enhancement of alginate-based films via polyurethane blending. *Carbohydrate Polymers*, v. 224, p. 115204, 2019.

YANG, L. et al. Enhanced mechanical and barrier performance of alginate/pectin/xanthan composite films. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 138, n. 16, p. 50120, 2021.