



MAYNNE CONCEIÇÃO DE SOUSA SILVA

**BIOCOMPÓSITOS DE AMIDO DO MESOCARPO DO COCO
BABAÇU E ALGINATO: EFEITOS DA ARGILA
VERMICULITA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E
MECÂNICAS**

MAYNNE CONCEIÇÃO DE SOUSA SILVA

**BIOCOMPÓSITOS DE AMIDO DO MESOCARPO DO COCO
BABAÇU E ALGINATO: EFEITOS DA ARGILA
VERMICULITA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E
MECÂNICAS**

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.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Audirene Amorim
Santana

Coorientador: Casi Santos dos Santos

São Luís
2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a. Dr.^a. AUDIRENE AMORIM SANTANA
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Mestre CASI SANTOS DOS SANTOS
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. DENNYS CORREIA DA SILVA
PPGEQ/UFRN

18 de novembro de 2024

Dedico este trabalho aos meus três grandes amores: minha mãe Leuziane por tudo que és e fizeste por mim, ao meu pai José Mário (in memoriam) minha estrela mais brilhante e a minha avó Evanilde pelos melhores abraços da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por cuidar de mim e me proporcionar a força que em muitos momentos se fez necessária. Quanto mais eu observo os detalhes, mais percebo sua bondade. Sem Ele a jornada teria sido impossível.

À minha orientadora, Prof^a. Audirene Amorim, pela ajuda, orientação, auxílio e paciência que foram essenciais durante esse processo. Sua trajetória acadêmica e profissional é fonte de muita inspiração.

Ao meu coorientador, Casi dos Santos por me ajudar e apoiar em todos os momentos. A troca que tivemos durante a pesquisa foi muito enriquecedora.

À minhas amigas, Regina, Larissa, Isabel e Ana Caroline, que em momentos diferentes estiveram comigo durante essa caminhada. Obrigada por me apoiarem, me incentivarem e tornarem tudo mais leve.

Aos amigos que conquistei ao longo desses anos e futuros colegas de profissão na engenharia por todos os momentos compartilhados e pelos sorrisos que dividimos.

Aos meus colegas, Pablo e Liandra por toda dedicação e companhia no laboratório.

Ao amor da minha vida, que no momento mais difícil, no qual eu já não tinha mais forças para prosseguir foi a minha força me encorajando a seguir firme. Obrigada por ser quem você é na minha vida.

À minha família, por acreditar em mim, ser minha base e meu porto seguro. Em especial à minha mãe que sempre foi a minha maior inspiração, aos meus irmãos, Mário e Mayza que sempre foram a melhor irmandade que eu poderia ter e às minhas sobrinhas, Safira e Liz por serem a minha razão, meus anjos nessa vida, minhas maiores motivações.

“É preciso que eu suporte duas ou três larvas se quiser conhecer as borboletas.”

Antoine de Saint-Exupéry (O Pequeno Príncipe)

SILVA, M. C. S. **Biocompósitos de Amido do Mesocarpo do Coco Babaçu e Alginato: Efeitos da Argila Vermiculita nas Propriedades Físico-Químicas e Mecânicas**. 2024. 58 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

RESUMO

Biopolímeros são materiais naturais feitos a partir de proteínas, polissacarídeos, lipídios ou seus derivados. Eles são amplamente utilizados na produção de embalagens biodegradáveis, representando uma alternativa sustentável, acessível e socialmente responsável. A incorporação da argila além de melhorar as propriedades mecânicas, melhora a consistência e traz maior estabilidade térmica aos biocompósitos produzidos, conferindo maior aplicabilidade. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar como as concentrações de amido, alginato, argila e plastificante impactam propriedades como umidade, solubilidade, permeabilidade ao vapor de água (PVA) e propriedades mecânicas (resistência a tração, alongação e módulo de Young). Os biocompósitos foram produzidos pelo método *casting*, analisando 15 ensaios com variação da concentração de amido e argila, além da variação na quantidade da mistura na placa, obtendo como respostas o teor de umidade, solubilidade, permeabilidade ao vapor de água (PVA), propriedades mecânicas e aspectos visuais. Os filmes com a maior concentração de argila apresentaram o menor conteúdo de umidade variando de 20,64 a 24,61%. Por outro lado, os valores de solubilidade dessa concentração foram mais altos. Essa tendência não foi observada nas demais concentrações. Nos ensaios apresentados notou-se que a medida de PVA aumenta conforme aumentou-se a espessura dos filmes. Para as propriedades mecânicas, a combinação de 3 g de argila destacou-se devido à sua resistência e flexibilidade superiores em comparação às demais concentrações testadas. A resistência à tração apresentou variações entre 2,26 e 4,84 MPa, enquanto a alongação variou de 9,27 a 20,47%. Esses valores indicam uma capacidade do material de suportar tensões moderadas antes da ruptura, mantendo-se mais resistente que as concentrações de 1 g e 5 g de argila. Além disso, o módulo de Young, que variou de 13,65 a 52,27 MPa, reflete um equilíbrio desejável entre rigidez e deformabilidade, características fundamentais para aplicações que exigem materiais com boa resistência mecânica associada à flexibilidade.

Palavras-chave: Biopolímeros. Amido. Coco babaçu. Alginato de sódio. Argila Vermiculita.

SILVA, M. C. S. **Biocomposites from the babassu coconut mesocarp starch and alginate: Effects of Vermiculite Clay on Physicochemical and Mechanical Properties.** 2024. 58 p. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

ABSTRACT

Biopolymers are natural materials made from proteins, polysaccharides, lipids, or their derivatives. They are widely used in the production of biodegradable packaging, representing a sustainable, accessible, and socially responsible alternative. The incorporation of clay, in addition to improving mechanical properties, enhances consistency and provides greater thermal stability to the produced biocomposites, offering broader applicability. Thus, the present study aims to evaluate how the concentrations of starch, alginate, clay, and plasticizer impact properties such as moisture, solubility, water vapor permeability (WVP), and mechanical properties (tensile strength, elongation, and Young's modulus). The biocomposites were produced using the casting method, analyzing 15 tests with variations in starch and clay concentration, as well as the amount of mixture on the plate. The responses evaluated included moisture content, solubility, water vapor permeability (WVP), mechanical properties, and visual aspects. The films with the highest clay concentration showed the lowest moisture content, ranging from 20.64% to 24.61%. On the other hand, the solubility values for this concentration were higher, a trend not observed in the other concentrations. In the presented tests, it was noted that the WVP measurement increased as the thickness of the films increased. Regarding mechanical properties, the combination of 3 g of clay stood out due to its superior resistance and flexibility compared to the other tested concentrations. Tensile strength ranged from 2.26 to 4.84 MPa, while elongation varied from 9.27% to 20.47%. These values indicate the material's capacity to withstand moderate stresses before breaking, showing greater resistance than the concentrations of 1 g and 5 g of clay. Furthermore, Young's modulus, ranging from 13.65 to 52.27 MPa, reflects a desirable balance between stiffness and deformability, essential characteristics for applications requiring good mechanical strength combined with flexibility.

Keywords: Biopolymers. Starch. Babassu coconut. Sodium alginate. Vermiculite Clay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção e venda de babaçu (coco e amêndoa) em 2017	01
Figura 2 – Classificação dos polímeros biodegradáveis.....	04
Figura 3 – Análise de Mercado de Fibras Naturais (2023-2028)	05
Figura 4 – Componentes do coco babaçu observados por meio de um corte transversal	07
Figura 5 – Formação da rede tridimensional pelo alginato de sódio reticulado com íons Ca^{2+}	09
Figura 6 – Estrutura do glicerol, destacando suas três hidroxilas responsáveis pela propriedade plastificante.....	11
Figura 7 – Estrutura molecular do Sorbitol	12
Figura 8 – Estrutura cristalina da vermiculita, destacando as camadas interlamelares contendo moléculas de água.....	14
Figura 9 – Fluxograma do processo de obtenção dos biofilmes.....	20
Figura 10 – Representação esquemática das etapas do processo de produção dos biofilmes, incluindo a preparação da solução filmogênica, transferência para placa, secagem e obtenção do filme final	22
Figura 11 – Célula de acrílico projetada para acondicionar os biofilmes durante a determinação da PVA.....	25
Figura 12 – Visualização esquemática do armazenamento da célula que contém o biofilme no recipiente que contém a solução de NaCl.....	25
Figura 13 – Filmes obtidos a partir da confecção dos biocompósitos nas diferentes concentrações de argila e massa na placa (MS)	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planejamento experimental para biofilmes de amido de mesocarpo de coco babaçu, alginato de sódio e argila vermiculita.....	21
Tabela 2 – Teor de umidade (ω) e solubilidade em água (S) e espessura (δ) dos filmes em função da massa do material nas placas (MS) e da concentração de argila	28
Tabela 3 – Permeabilidade ao vapor de água dos filmes.....	31
Tabela 4 – Tensão de ruptura (TR), Elongação (E) e Módulo de Young (MY) dos biofilmes confeccionados a partir de amido do mesocarpo do coco babaçu e alginato de sódio reticulados com cloreto de cálcio aditivados com argila vermiculita.....	33

SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	ii
	DEDICATÓRIA.....	iii
	AGRADECIMENTOS.....	iv
	EPÍGRAFE.....	v
	RESUMO.....	vi
	ABSTRACT.....	vii
	LISTA DE FIGURAS.....	viii
	LISTA DE TABELAS.....	ix
	SUMÁRIO.....	x
1	INTRODUÇÃO.....	01
2	OBJETIVOS.....	03
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	03
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	03
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
3.1	BIOCOMPÓSITOS: Definição e Propriedades.....	04
3.2	BIOPOLÍMEROS.....	06
3.3	AMIDO DO MESOCARPO DO COCO BABAÇU.....	07
3.4	ALGINATO DE SÓDIO.....	08
3.5	PLASTIFICANTE.....	10
3.5.1	Glicerol.....	11
3.5.2	Sorbitol.....	12
3.6	ARGILA VERMICULITA.....	13
3.7	RETICULANTE.....	14
3.7.1	Cloreto de cálcio.....	15
3.8	CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES.....	16
3.8.1	Conteúdo de umidade.....	16
3.8.2	Solubilidade.....	17
3.8.3	Permeabilidade ao vapor de água.....	17
3.8.4	Espessura.....	18
3.8.5	Propriedades mecânicas.....	18
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	20

4.1	MATERIAL.....	20
4.2	OBTENÇÃO DO AMIDO DO MESOCARPO DO COCO BABAÇU.....	20
4.3	BENEFICIAMENTO DA ARGILA.....	21
4.4	FORMULAÇÕES DAS BLENDS.....	21
4.4.1	Produção dos biofilmes.....	22
4.5	CARACTERIZAÇÃO DOS BIOFILMES.....	23
4.5.1	Aspecto visual.....	23
4.5.2	Conteúdo de umidade.....	23
4.5.3	Solubilidade em água.....	23
4.5.4	Espessura.....	24
4.5.5	Permeabilidade ao vapor de água.....	24
4.5.6	Propriedades mecânicas.....	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1	Aspecto visual.....	27
5.2	Conteúdo de umidade e solubilidade em água.....	28
5.3	Espessura dos filmes.....	30
5.4	Permeabilidade ao vapor de água.....	31
5.5	Propriedades mecânicas.....	33
6	CONCLUSÃO.....	37
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	37
	REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos fazem parte do dia a dia das pessoas, tornando-se presente em toda a economia e em diversos setores desde embalagens à saúde. Contudo, apesar dos benefícios, o uso intenso e o descarte incorreto ao longo dos anos acarretaram diversos problemas ambientais. Dessa forma, a fabricação de bioplásticos surge como uma alternativa para a produção de embalagens tradicionais, visto que diminui os danos ambientais. (ABANG et al., 2023).

Os biopolímeros são produtos orgânicos elaborados a partir de proteínas, polissacarídeos, lipídeos e/ou derivados. São produzidos principalmente para fabricação de embalagens biodegradáveis, representando uma alternativa sustentável, economicamente viável e socialmente responsável. Dentre os recursos naturais e renováveis utilizados na produção de bioplásticos, o amido é um dos componentes mais importantes, pois além de ser de baixo custo e amplamente disponível, o amido é biodegradável e contribui para a formação de biofilmes inodoros, incolores, não tóxicos e com boas propriedades termoplásticas.

Essas propriedades permitem que o amido seja amplamente utilizado na indústria alimentícia, farmacêutica, biomédica e de polímeros (BRASIL et al., 2022). A produção de biopolímeros utilizando como insumo orgânico o amido do mesocarpo do coco babaçu aborda uma questão regional e social, dado que, se encontra em grande abundância no estado do Maranhão e representa uma fonte da qual povos e comunidades retiram seu principal sustento (BRASIL, 2022).

O extrativismo da palmeira babaçu (*Attalea speciosa* Mart. ex Spreng.) é atividade econômica de grande relevância para meios de vida de comunidades tradicionais extrativistas em condições de vulnerabilidade, principalmente no estado do Maranhão, que concentra mais de 90% do total das amêndoas desta oleaginosa produzidas e comercializadas no país (PORRO, 2021). A figura 1 apresenta os dados referentes à produção e comercialização do babaçu, abrangendo tanto o coco quanto a amêndoa no ano de 2017.

Figura 1 - Produção e venda de babaçu (coco e amêndoa) em 2017

estabelecimentos	quantidade produzida (t)	quantidade vendida (t)	valor da produção (mil reais)	valor da venda	R\$/t produzida	R\$/t vendida
Babaçu (coco)						
Brasil	17.058	67.234	10.089	78.939	9.658	1.174
Maranhão	12.125	56.857	5.357	65.685	6.842	1.155
Piauí	3.775	6.052	2319	9.852	2.240	1.628
Tocantins	446	1.359	273	1.429	187	1.052
Ceará	304	1.201	827	954	245	794
Pará	67	980	765	526	58	537
outros	341	785	548	493	86	628
Babaçu (amêndoa)						
Brasil	19.331	18.907	15.774	39.173	31.309	2.072
Maranhão	15.491	16.937	14.799	33.156	28.713	1.957
Piauí	3.308	1.229	663	3.347	1.821	2.723
Tocantins	344	387	222	1.494	608	3.860
Ceará	37	152	60	481	22	3.164
Pará	22	155	20	425	101	2.742
outros	129	45	10	266	40	5.911

Fonte: PORRO (2021).

Geralmente os biopolímeros oriundos de alginato de sódio e amido do mesocarpo do coco babaçu exibem propriedades mecânicas (tensão de ruptura, elongação e módulo de Young) e de barreiras (permeabilidade ao vapor de água) pouco satisfatórias, as quais necessitam ser aperfeiçoadas para que eles possam ser utilizados em diferentes aplicações (Lopes et al., 2021; Raposo et al., 2021). Nesse caso, utiliza-se um agente de reforço para melhorar as propriedades desse material, essa melhoria geralmente é alcançada pelo espaço preenchido na matriz polimérica em comparação com os materiais convencionais. A argila vermiculita é utilizada nesta pesquisa como material compósito do biofilme e é produto principalmente de depósitos metamórficos no Piauí, Paraíba, Bahia e Goiás. O objetivo dessa adição é conferir ao material características de umidade, solubilidade, PVA, tensão de ruptura, elasticidade e flexibilidade que possibilitem sua utilização nas mais variadas aplicações.

Deste modo, o presente estudo possui como principal objetivo avaliar como a incorporação da argila melhora as propriedades dos biocompósitos de amido do mesocarpo do coco babaçu e alginato de sódio. De suma relevância, este estudo possui grande potencial para a geração de produtos e processos tecnológicos inovadores, com destaque para o desenvolvimento de biopolímeros com boas propriedades que possam substituir as embalagens à base de petróleo. A substituição dessas embalagens por bioplásticos contribui diretamente para a redução do impacto ambiental, uma vez que os bioplásticos são biodegradáveis e de fontes renováveis, ao contrário das embalagens de petróleo, que levam séculos para se decompor e estão associadas à poluição de ecossistemas e emissões de gases de efeito estufa.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Otimizar as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos biocompósitos de amido do mesocarpo do coco babaçu (AMCB) e alginato a partir da adição da argila vermiculita, com o objetivo de melhorar o desempenho das propriedades da mistura comparadas às dos biofilmes produzidos apenas com a matéria orgânica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Extrair e purificar o mesocarpo de coco babaçu por meio do processo de lavagem e filtração, visando à eliminação dos resíduos orgânicos presentes na matéria-prima;
- Produzir biopolímeros a partir do AMCB, alginato de sódio e argila vermiculita;
- Identificar a concentração ótima desses componentes na formação dos biopolímeros;
- Avaliar a influência da concentração da argila vermiculita nas propriedades dos biopolímeros modificados comparando os resultados com trabalhos disponíveis na literatura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

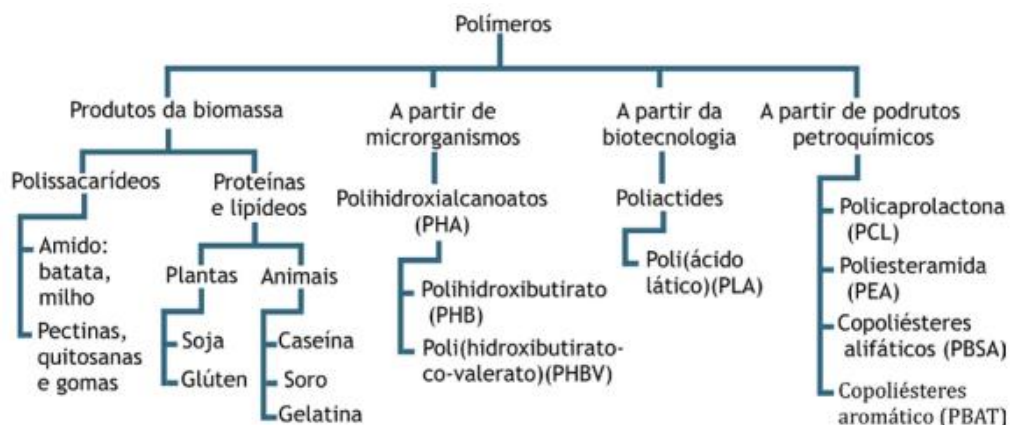
3.1 BIOCOMPÓSITOS: Definição e Propriedades

Biocompósitos são compostos formados pela combinação de dois ou mais materiais, onde pelo menos um dos constituintes é natural para fornecer estabilidade e resistência de acordo com as necessidades do material. São formados pelo reforço de fibras naturais em adesivo ou matriz. A matriz pode ser um material natural, sintético ou uma combinação de materiais naturais e sintéticos (SHARMA, 2021).

A modificação ou funcionalização de fibras naturais é importante para melhorar a ligação interfacial com biopolímeros e para obter com sucesso materiais compósitos de alto desempenho que podem competir com contrapartes de compósitos de polímeros convencionais à base de petroquímicos. Outra técnica de desenvolvimento de compósitos amplamente aceita é combinar diferentes tipos de fibras em uma única matriz para desenvolver compósitos híbridos altamente valorizados (AALIYA, SUNOOJ, LACKNER, 2021).

A autora Melo (2021) apresentou em seu trabalho a classificação dos polímeros biodegradáveis segundo sua síntese, como agropolímeros (polissacarídeos, proteínas) que são obtidos geralmente por fracionamento de biomassa a partir de agroprodutos, polihidroxialcanoatos microbianos (PHA) sintetizado por microrganismos a partir de fontes renováveis, o polilactídeo (PLA) sintetizado quimicamente a partir de monômeros derivados de processos biotecnológicos, polímeros biodegradáveis oriundos de fontes não renováveis sintetizados por processos petroquímicos conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Classificação dos polímeros biodegradáveis

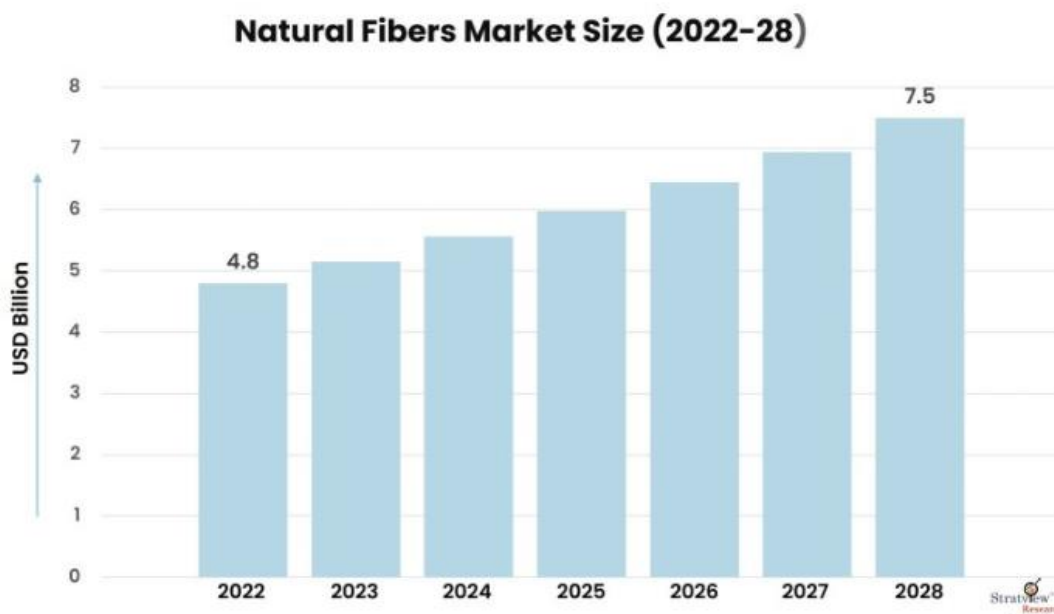


Fonte: MELO (2021).

As interações que ocorrem entre os componentes são fundamentais para a formação da interface que determina o bom desempenho mecânico destes materiais. A interface pode ser descrita como o limite entre duas camadas com diferença química e/ou microestrutural. Essa interação pode ocorrer por meio de três mecanismos: acoplamento mecânico ou intertravamento micromecânico dos dois materiais; acoplamento físico, como van der Waals ou interação eletrostática; e ligação covalente (por meio de um agente de acoplamento) entre a fibra e a matriz. Nos compósitos de matriz polimérica, as cadeias longas da matriz são perturbadas pela interação com grupos funcionais do reforço. (LOZANO, 2022).

Segundo os autores Lopes, Lazarini e Marconcini (2023) o interesse em usar fibras naturais como materiais de reforço em biocompósitos aumentou significativamente nos últimos anos. A Figura 3 mostra o panorama global de crescimento do mercado de fibras naturais.

Figura 3 - Análise de Mercado de Fibras Naturais (2023-2028)



Fonte: STRATVIEW RESEARCH (2023).

Embora ainda existam desafios para alcançar a compatibilidade entre fibras naturais e matrizes poliméricas, como a baixa adesão interfacial devido à natureza hidrofílica das fibras em contraste com a hidrofobicidade das matrizes, avanços têm sido feitos com o uso de tratamentos de superfície, como acetilação e plasma. Esses métodos visam melhorar a estrutura e otimizar as propriedades mecânicas e térmicas dos biocompósitos, tornando-os mais eficientes.

Além disso, a possibilidade de projetar biocompósitos para atender a diferentes

requisitos amplia sua aplicabilidade em diversos setores. A produção desses materiais a partir de polímeros biodegradáveis representa uma solução promissora para a gestão de resíduos, contribuindo significativamente para a sustentabilidade ambiental (LOPES, LAZARINI, MARCONCINI, 2023).

3.2 BIOPOLÍMEROS

Segundo a norma para terminologias da American Society for Testing and Materials ASTM D-883, biopolímeros são definidos como polímeros produzidos por organismos vivos ou partes isoladas desses organismos, como enzimas. Além disso, quando biodegradáveis, são polímeros cuja degradação ocorre através da ação de microrganismos de ocorrência natural, como bactérias, fungos ou algas, que transformam o material em compostos simples, como dióxido de carbono, água, metano e biomassa, dependendo das condições ambientais.

A União Europeia (UE) reconheceu os bioplásticos como uma alternativa promissora aos plásticos convencionais. Entretanto, para que esses materiais sejam viáveis, é crucial que apresentem eficiência econômica, reduzida pegada ambiental e estejam alinhados aos princípios da economia circular (MOGANY, BHOLA, BUX, 2024). Dentre todas as alternativas já conhecidas, as que estão atraindo mais atenção são as que são obtidas a partir de amido, celulose e polissacarídeos de diversas fontes biodegradáveis como, polissacarídeos de fontes como amido de milho, quitina de crustáceos e celulose de resíduos agrícolas que possuem baixo custo e são de fácil obtenção (SCHAEFFER, 2020).

A aplicabilidade dos polímeros vai desde materiais simples até grandes componentes para uso na medicina, aviação, alimentação, cosméticos, dentre outros. O que torna relevante o conhecimento desses materiais, para elaboração dos mesmos em escala maior, a partir de fontes naturais. As plantas com base na sua composição química possuem polímeros com bastante utilidade para os diversos ramos industriais. Muitas espécies apresentam em sua estrutura polissacarídeos capazes de formar redes poliméricas com amplas aplicações no mercado (FARIAS et al., 2016).

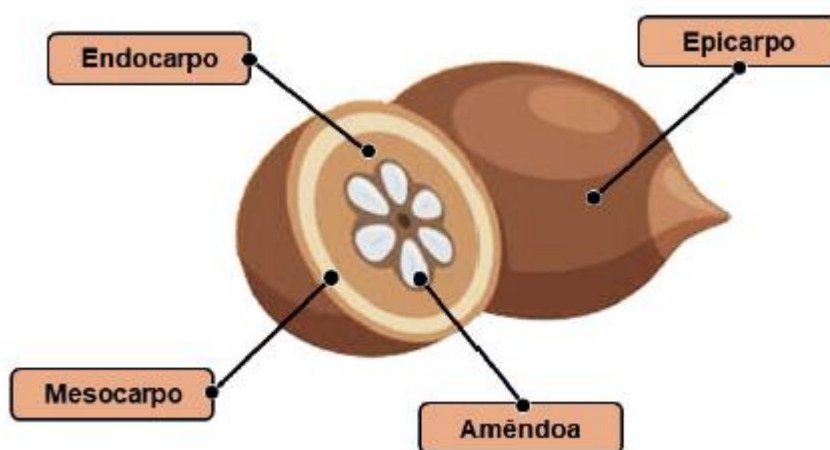
Por serem utilizados tanto como embalagens como componentes dos alimentos, os filmes devem permanecer estáveis e manter suas propriedades funcionais durante o tempo de uso desejado. Também devem cumprir alguns requisitos específicos, como boas propriedades de barreira (permeabilidade ao vapor de água), eficiência mecânica (resistência e flexibilidade), propriedades ópticas e sensoriais adequadas, além de possuir baixo custo de matéria-prima e de fabricação (ASEVEDO, 2018).

Para biofilmes de amido, valores típicos encontrados de permeabilidade ao vapor de água são inferiores a $3 \times 10^{-9} \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$, especialmente quando aditivos como álcool polivinílico são incorporados. A resistência à tração pode variar amplamente, mas geralmente excede 10 Mpa, dependendo de modificações no filme, como reforços com nanopartículas ou outros polímeros, para atender as exigências de aplicações específicas (REJAK *et al.*, 2014).

3.3 AMIDO DO MESOCARPO DO COCO BABAÇU (AMCB)

A palmeira do babaçu (*Attalea Speciosa Mart. ex Spreng*) é uma planta de muita frequência no Brasil, mais especificamente na região conhecida como Mata dos Cocais, principalmente no Nordeste Brasileiro. É uma palmeira cilíndrica, alta, com uma coroa de folhas, e frutos de formato elipsoide, lisos e de coloração marrom quando maduros, popularmente conhecidos como coco (PAIXÃO *et al.*, 2019). Nota-se quatro partes distintas que podem ser aproveitadas, sendo estas o epicarpo, o mesocarpo, o endocarpo e a amêndoa, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Componentes do coco babaçu observados por meio de um corte transversal



Fonte: Santos *et al.* (2023).

O mesocarpo do babaçu é geralmente transformado em farinha e tem sido utilizado na produção de uma farinha nutritiva, a substância é comercializada em lojas de produtos naturais, apresentando em sua composição mais 50% de amido. O alto teor de amido na constituição do mesocarpo viabiliza sua aplicação na fabricação de outros produtos relatados a seguir: alimentos para humanos e animais, produção de filmes bioativos, carvão ativado e na síntese

de nanomaterial com atividade antimicrobiana, biopolímero modificado, entre outras aplicações (CRUZ, 2021).

Em trabalho anterior, Maniglia e Tapia-Blácido (2016) demonstraram que a farinha do mesocarpo de babaçu apresenta atividade antioxidante devido a presença de compostos fenólicos. Esses autores isolaram o amido da farinha do mesocarpo de babaçu por duas metodologias, maceração em água e maceração em pH alcalino. Essas metodologias proporcionaram ao amido composição química e funcionalidades distintas. Entretanto, o processo de isolamento do amido não foi capaz de remover completamente os compostos fenólicos, portanto o amido final ainda apresentava atividade antioxidante, o que o tornou um material interessante para obtenção de bioativos filmes. A atividade antioxidante é uma característica desejável em materiais que são usados para cobrir frutas, carnes e queijos, que por sua vez são sensíveis a oxidação (MANIGLIA et al., 2017).

O amido é um polissacarídeo formado por amilose e amilopectina. A molécula da amilose é linear e polimérica composta de unidades de glicose e a amilopectina é uma molécula ramificada também contendo unidades de glicose com ligações α -(1,4) e ramificações α -(1,6). A amilopectina é extensivamente ramificada e representa 70-80% do amido. O teor de amilose varia de 15 a 30%, dependendo da origem do amido, e é responsável pela formação de hidrogéis e filmes estáveis e resistentes. A produção de bioplástico de amido é uma alternativa, já que são compostos de biopolímeros feitos de amido (polissacarídeo) que podem apresentar propriedades mecânicas semelhantes às do plástico sintético, sendo biodegradáveis (SILVA e DIAS, 2024).

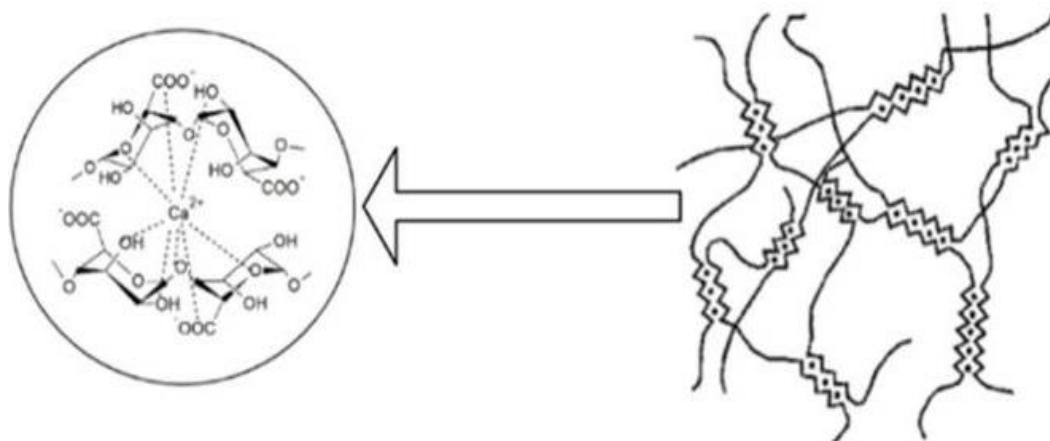
3.4 ALGINATO DE SÓDIO

O alginato de sódio é um biopolímero aquático multifuncional bem explorado, extraído de algas marrons principalmente das espécies *Laminaria* e *Macrocystis*. Devido à sua versatilidade físico-química incomparável e biodegradabilidade eficaz, pode atuar como emulsificante, espessante, estabilizador, formador de gel e agente encapsulante em diversas aplicações científicas. Devido à sua abundância natural, preço mais baixo e facilidade de extração, o alginato de sódio é amplamente utilizado em diversas indústrias. Além disso, suas propriedades como biocompatibilidade, não toxicidade, multifuncionalidade, transições sol/gel e alta resistência mecânica ampliam ainda mais suas aplicações, incluindo alimentícia, farmacêutica, cosmética, têxtil, biomédica, agricultura e muitas outras (KHAN e KHAN, 2023).

O alginato de sódio é um copolímero polianiónico, estruturalmente definido como o sal de sódio do ácido algínico. Sua fórmula química é $(C_6H_7NaO_6)_n$, onde "n" indica o grau de polimerização, ou seja, o número de unidades monoméricas repetidas na cadeia polimérica. O valor de "n" pode variar conforme a fonte do material e o processo de extração utilizado.

O alginato pode formar, por reticulação iônica com cátions polivalentes, géis tridimensionais que têm uma estrutura rígida, ordenada e forte. Estudos mostraram que a reticulação que é feita entre o alginato e os cátions alcalino-terrosos é de natureza eletrostática, e que entre o alginato e os cátions de metais de transição, é covalente. No caso de interações eletrostáticas, o material resultante tende a ser mais flexível e reversível, enquanto as ligações covalentes conferem maior rigidez, estabilidade térmica e resistência mecânica. A gelificação é apresentada como uma rede do tipo “caixa de ovos” que é formada quando os íons Ca^{2+} substituem os íons Na^+ na estrutura do alginato, liga-se transversalmente e é antiparalela a duas moléculas de alginato, conforme mostrado na Figura 5 (FRENT *et al.*, 2022). Essa estrutura cria uma matriz robusta, fundamental para aplicações que demandam alta resistência mecânica.

Figura 5 - Formação da rede tridimensional pelo alginato de sódio reticulado com íons Ca^{2+}



Fonte: Frent et al. (2022).

Entretanto, a interação do alginato com íons de cálcio é influenciada pela temperatura, sendo que em temperaturas mais baixas, sua capacidade de formar redes reticuladas diminui. Uma reticulação mais lenta permite que os íons reticulantes, como o cálcio (Ca^{2+}), interajam de maneira controlada com as cadeias do alginato, promovendo a formação de redes gelatinosas mais ordenadas. Esse processo gradual favorece a organização estrutural da matriz polimérica,

resultando em propriedades mecânicas aprimoradas, como maior rigidez, elasticidade e resistência (FRENT *et al.*, 2022).

Características como a ação gelificante e espessante, biodegradabilidade, biocompatibilidade e ausência de toxidez tornam o alginato de sódio um material interessante para inúmeras aplicações. Dentre as várias aplicações, os filmes de alginato têm sido estudados com o objetivo de utilizá-los em embalagens, cobertura e proteção de diferentes materiais, matriz ou cobertura reticulada para sistemas de liberação de fármacos e no encapsulamento de células vivas (JÚNIOR, 2017).

Pesquisas mostraram que o alginato, combinado com outros polímeros como quitosana, forma hidrogéis e esferas capazes de liberar medicamentos de forma controlada. Por exemplo, a incorporação de fármacos em microesferas de alginato modificadas com quitosana apresentou liberação sustentada e propriedades bioadesivas melhoradas (SANTOS, 2014). Além disso, matrizes de alginato foram usadas para encapsular células destinadas à regeneração de tecidos. Estudos *in vivo* indicaram que esses sistemas podem simultaneamente regenerar cartilagem e osso subcondral, destacando-se pelo suporte à proliferação celular e ativação de vias biológicas importantes (POLETI, 2019).

3.5 PLASTIFICANTE

Como os filmes confeccionados exclusivamente por amido são pouco flexíveis e quebradiços, sendo inadequados aos processamentos convencionais para a produção de embalagens, a introdução de aditivos às matrizes poliméricas é necessária. A adição de aditivos, como plastificantes, é essencial para reduzir a rigidez dos filmes, proporcionando maior flexibilidade e melhorando suas propriedades mecânicas (MARTINEZ, 2020).

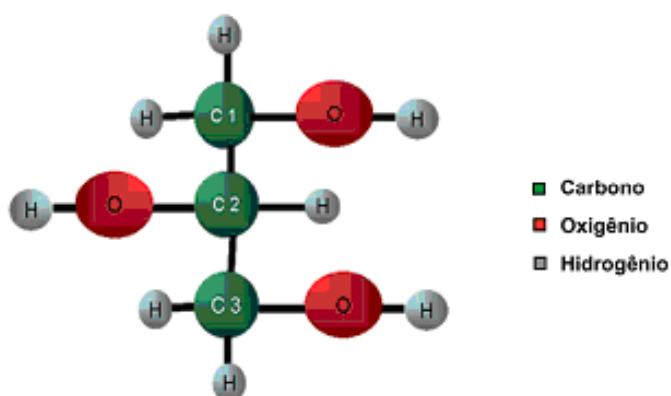
Os plastificantes reduzem as interações entre as moléculas adjuntas, aumentando assim a flexibilidade do filme (SIQUEIRA, PAETZOLD, FARINA, 2021). Além de atuarem no aumento da flexibilidade, os plastificantes também têm a função de reduzir a dureza, rigidez e temperatura de transição vítrea, aumentar a tenacidade e o alongamento na ruptura. São encontrados normalmente na forma líquida, sendo pouco voláteis e constituídos por moléculas pequenas (SCHAEFFER, 2020). Para a aplicação de um plastificante é de extrema importância que haja compatibilidade adequada com o polímero utilizado, como no caso de amido e proteínas, onde a escolha do plastificante correto é crucial para garantir a interação eficiente entre as moléculas, promovendo as propriedades desejadas no material final (SIQUEIRA, PAETZOLD, FARINA, 2021).

3.5.1 Glicerol

Vários tipos de materiais plastificantes podem ser adicionados aos filmes, como os oligossacarídeos (glicose, sacarose), lipídios (ácidos graxos saturados, monoglicerídeos e surfactantes) e os polióis (glicerol, sorbitol, eritritol). Dentre estes agentes plastificantes, os polióis são os mais utilizados para filmes de polissacarídeos (MARTINEZ, 2020).

O glicerol (1,2,3 propanotriol ou glicerina) é um composto orgânico com função álcool, composto por três grupos hidroxila (-OH), o que o classifica como um poliol. Pode ser encontrado em azeites e óleos de coco, dendê, soja, algodão e oliva, ou mesmo em animais, na combinação de glicerina com ácido graxo. Além disso, pode ser obtido de diferentes fontes, sendo importante distinguir entre o glicerol derivado de fontes naturais, como óleos vegetais, e aquele obtido como subproduto de processos industriais, como a produção de biodiesel. No caso do biodiesel, o glicerol é gerado em grande escala durante a transesterificação dos triglicerídeos presentes nos óleos e gorduras, resultando em um subproduto bruto que requer purificação para diversas aplicações industriais. Trata-se de um poliálcool e sua fórmula estrutural é apresentada na Figura 6 (EMBRAPA, 2021).

Figura 6 – Estrutura do glicerol, destacando suas três hidroxilas responsáveis pela propriedade plastificante



Fonte: Embrapa (2021).

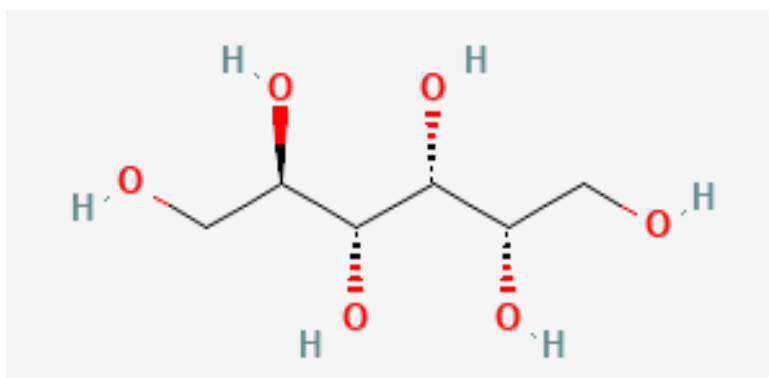
O glicerol vem sendo amplamente utilizado no processo de produção de biofilmes e considerado uma matéria-prima renovável que, por ser um plastificante, ao ser introduzido em filmes biodegradáveis promove alterações significativas de suas propriedades e, assim, garante uma ampla faixa de aplicação (MACHADO, 2021). Seu alto efeito plastificante é atribuído à

facilidade que o glicerol tem de se inserir e posicionar-se na rede proteica tridimensional, interagindo com grupos funcionais através de ligações de hidrogênio. Esse efeito se aplica tanto a biopolímeros baseados em proteínas quanto a polissacarídeos. Essa característica aumenta a hidrofilicidade e permeabilidade ao vapor de água dos filmes plastificados, pois ao se inserir na matriz polimérica, o glicerol reduz as interações entre as cadeias do polímero, criando um ambiente mais acessível para a difusão de água (LEITE, SILVA, JÚNIOR, 2020). Sem a ação deste plastificante, o filme tem uma estrutura rígida e quebradiça, o que torna inviável a sua produção (MACHADO, 2021).

3.5.2 Sorbitol

De acordo com Ramos (2014), o sorbitol (D-glucitol, D-sorbitol, D-glicose) é um poliol (álcool de açúcar) descoberto pela primeira vez em 1872 em bagas de sorveira-brava. É produzido pela hidrogenação da glicose, onde o grupo aldeído é convertido em um grupo hidroxila (álcool) via aldose redutase. O sorbitol ocorre naturalmente em uma ampla gama de plantas, incluindo frutas, vegetais e algas. Sua estrutura molecular é composta de 6 átomos de carbono e 6 grupos alcoólicos conforme ilustra a Figura 7.

Figura 7 – Estrutura molecular do Sorbitol



Fonte: PubChem (2024).

Plastificantes como o sorbitol, que apresentam alto ponto de ebulição e solubilidade em água, têm se mostrado adequados para a mistura com polímeros solúveis em água. Por outro lado, mesmo com propriedades mecânicas adequadas, sistemas como alginato de sódio e sorbitol, em função da sua natureza hidrofílica, exibem baixa resistência à água, limitando em muitos casos sua aplicabilidade. Como alternativa, filmes preparados a partir de polissacarídeos

têm sido submetidos a processos de reticulação visando diminuir a solubilidade em água (LIMA et al., 2007).

Os autores Rocha et al. (2011), demonstraram em seu trabalho que filmes plastificados com sorbitol apresentaram maior diferença de cor, opacidade e espessura, quando comparados com filmes elaborados com glicerol. Contudo, filmes elaborados com glicerol apresentaram maior solubilidade, limitando o uso do mesmo em alimentos com elevado conteúdo de água. O sorbitol possui seis grupos hidroxilas, o que faz com que este tenha maior capacidade de interação com as moléculas de amido que o glicerol, sendo considerado menos hidrofílico que o glicerol (FRIEDRICH, 2017).

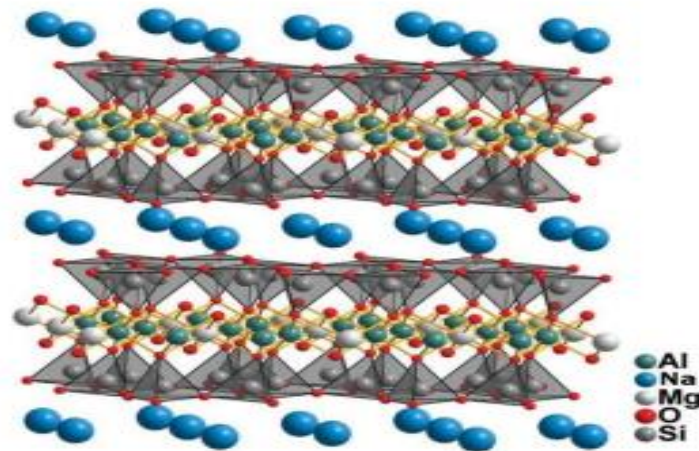
3.6 ARGILA VERMICULITA

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire certa plasticidade quando umedecido com água. Quimicamente, argilas são compostas por silicatos hidratados, frequentemente associados a outros elementos como alumínio, ferro, magnésio e, em menor grau, potássio, sódio ou cálcio. Via de regra, o termo argila refere-se às partículas do solo que possuem diâmetro inferior a 2 μm e que podem conter diferentes tipos de minerais como silicatos lamelares de magnésio e de alumínio, quartzo, carbonatos, óxidos metálicos e até mesmo matéria orgânica. Constituídas por partículas cristalinas extremamente pequenas de um número restrito de minerais conhecidos como argilominerais, podendo ser compostas por um único tipo ou uma mistura deles (BARBOSA, 2017).

A argila vermiculita é amplamente distribuída em solos e rochas, podendo ser encontrada em áreas tropicais, incluindo áreas de baixo e alto índice de chuvas. O Brasil tem três polos distintos de mineração de vermiculita: em Goiás, na Paraíba e na Bahia. As aplicações atuais da vermiculita são, majoritariamente, na construção civil, como isolante acústico e material retardante de chamas, e na agricultura, como veículo para fertilizantes (TEODORO, 2018).

Segundo Diniz (2020) a vermiculita caracteriza também grupo de minerais micáceos que são comercializados, formado por dezenove tipos de silicatos hidratados de magnésio e alumínio, com ferro e outros elementos. O que faz a vermiculita ter valor no mercado é sua camada de moléculas de água que fica entre as camadas de alumínio e silício na estrutura do mineral, sua expressiva expansão ocorre devido à perda de água interlamelar quando submetida ao calor, o que confere características como alta porosidade, leveza e inércia química em muitas aplicações.

Figura 8 - Estrutura cristalina da vermiculita, destacando as camadas interlamelares contendo moléculas de água



Fonte: Brito et al. (2013).

Devido às suas características peculiares, a argila vermiculita apresenta características físico-químicas especiais, que determinam suas propriedades superficiais e as interações com substâncias orgânicas. Desta forma este argilomineral se apresenta como um ótimo precursor na formação de novos materiais híbridos através de reações na superfície externa e no espaço interlamelar (BARBOSA, 2017).

3.7 RETICULANTE

O processo de reticulação pode ser realizado por meio de reações entre biopolímeros e cátions bi e trivalentes. Esta etapa tem por objetivo promover alterações na estrutura do biopolímero, influenciando propriedades como solubilidade, permeabilidade e resistência mecânica (MOREIRA et al., 2020).

A reticulação polimérica é um processo que ocorre quando cadeias poliméricas lineares ou ramificadas são interligadas por pontes de ligações, formando uma rede polimérica tridimensional, processo também conhecido como crosslinking (formação de ligações cruzadas). O crosslinking pode ser induzido através de diferentes métodos, como glicação não enzimática, irradiação utilizando luz ultravioleta com ou sem a associação de fotossensibilizantes e por reações de aldeído. Os aldeídos, como glutaraldeído e formaldeído, são usados em crosslinking devido à sua alta reatividade, formando ligações covalentes que criam redes poliméricas estáveis com melhores propriedades mecânicas. Já os

fotossensibilizantes, como riboflavina e azul de metileno, absorvem luz UV e transferem energia para moléculas, gerando espécies reativas que induzem o processo (DINIZ et al., 2019).

O processo de reticulação é influenciado tanto pelas propriedades físico-químicas dos polímeros, como estrutura e funcionalidade, quanto pelas condições reacionais, incluindo temperatura, pH e duração do processo. Além disso, fatores como a concentração e o tipo de agente reticulante utilizado desempenham um papel crucial na eficiência e nas características finais da reticulação. Com a elevação do grau de reticulação, reduz-se a porosidade do material obtido, a permeabilidade à água e a difusão de possíveis substâncias retidas nas redes poliméricas formadas. Em polissacarídeos, a introdução de vários graus de reticulação dentro das moléculas pode gerar longos agregados moleculares com alta viscosidade ou produtos insolúveis, com diferentes características de inchamento (ABRAHÃO, 2017).

Segundo Ginani et al. (1999), a utilização de sistemas gelificados como veiculadores de princípios ativos em produtos alimentícios, farmacêuticos e cosméticos requer o conhecimento prévio da compatibilidade do substrato a ser incorporado com a estrutura polimérica, assim como o seu efeito na transição sol-gel e no comportamento estrutural do gel quando submetido a condições específicas.

3.7.1 Cloreto de cálcio

Segundo Garrett (2002), o cálcio é um dos elementos mais comuns encontrados na natureza. Embora o cálcio seja um elemento abundante na natureza, o cloreto de cálcio ocorre de forma menos comum em estado sólido, sendo mais frequentemente encontrado em salmouras. O único mineral de cloreto de cálcio encontrado em grandes quantidades é o sal duplo taquiidrita ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Salmouras de cloreto de cálcio são frequentemente encontradas em vários tipos de subterrâneos e em um tipo de formações submarinas.

O alginato de sódio possui alta capacidade de formar hidrogéis estáveis quando ocorre sua interação com cátions divalentes, como o Ca^{2+} . À medida que os íons de cálcio de sua reticulação são substituídos por outros íons presentes no corpo. Esse processo está relacionado à biodegradação controlada e biocompatibilidade, características desejadas em aplicações biomédicas. A formação da rede tridimensional ocorre com a entrada dos íons nas cavidades eletronegativas do alginato, formando interações iônicas com os ânions carboxilato e com os grupos hidroxila. Tal reticulação confere ao alginato alta resistência, formando ligações

cruzadas eletrostáticas reversíveis e fortes, conhecidas como estrutura caixa de ovo (DIAS, 2020).

O cloreto de cálcio (CaCl_2) tem muitas aplicações comuns como em salmoura para máquinas de refrigeração, controle de pó, gelo nas estradas, em queijo, cimento e como agente reticulante em produtos poliméricos (LIMA, 2019). É o agente mais frequentemente utilizado na formação dos hidrogéis de alginato, contudo a velocidade de gelificação é rápida e o processo pouco controlado, devido à alta solubilidade em soluções aquosas. Para superar essa limitação, diferentes abordagens têm sido exploradas. Uma estratégia eficiente é o uso de agentes de liberação lenta, como o gluconato de cálcio, que libera íons Ca^{2+} de forma gradual. Isso permite uma gelificação mais uniforme e controlada (DIAS, 2020).

3.8 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES

Os biofilmes apresentam características que indicam a qualidade de sua produção. Resultado das interações entre os produtos utilizados em sua formulação, do processo de dispersão e condições de secagem às quais foram submetidos.

3.8.1 Conteúdo de Umidade

A umidade em biofilmes é definida como o teor de água presente no material, geralmente expressa como uma porcentagem. Ela pode ser medida de várias formas, sendo a umidade relativa e a umidade absoluta as mais comuns. A umidade em biofilmes é definida como o teor de água presente no material, geralmente expressa como uma porcentagem (CASA FLOR, 2024).

Rindlav-Westling (1998) observou que filmes secos expostos a níveis elevados de umidade relativa tendem a apresentar maior grau de cristalinidade, o que afeta sua estrutura e propriedades mecânicas, além de um maior teor de umidade residual. Essas características tornam os filmes mais vulneráveis a mudanças durante o armazenamento e uso. Segundo os autores Kim e Pometto (1994); Arvanitoyannis et al. (1998), filmes com maior teor de amido são mais rígidos e apresentam menor resistência a variações de umidade.

3.8.2 Solubilidade

O INBRAEP (2022) definiu a solubilidade como uma característica física das substâncias, referindo-se à sua capacidade de se dissolver ou dissolver outras substâncias líquidas. Para isso é necessário o soluto, material que vai ser dissolvido, e o solvente, líquido que irá dissolver.

Define-se solubilidade em água de biofilmes, medida pela quantidade de massa seca que se dissolve após imersão por 24 horas. A avaliação dessa propriedade é essencial para se definir o campo de aplicação do filme. Esta propriedade é de grande importância para filmes biodegradáveis, uma vez que a grande maioria dos filmes elaborados a partir de carboidratos e proteínas possui grande afinidade com a água (JÚNIOR, 2017).

A solubilidade de filmes pode ser diminuída com a incorporação de componentes hidrofóbicos, como lipídios e ceras, mas essa modificação pode provocar efeitos adversos nas propriedades ópticas e mecânicas dos mesmos. Outra alternativa é o processo de reticulação que impede a separação das cadeias e sua passagem para solução. Aumentando-se a densidade de reticulação, a capacidade de absorção de líquido de baixo peso molecular diminui, podendo ser inexistente quando os segmentos que formam o retículo forem muito pequenos, ou seja, quando as cadeias possuírem um melhor empacotamento (LIMA, 2019).

A solubilidade em água determina a aplicação do biofilme. Por exemplo, para biofilmes utilizados como embalagem de produtos alimentícios, no caso de produtos que são destinados ao preparo com cozimento, a total solubilização do filme pode ser benéfica. Já se o alimento for líquido ou aquoso, os filmes biodegradáveis que possuem alta solubilidade não são indicados (SCHAEFFER, 2020).

3.8.3 Permeabilidade ao vapor de água

Segundo a ASTM E96-95, permeabilidade é a taxa de transmissão de vapor de água por unidade de área através do filme, de espessura conhecida, induzida por um gradiente de pressão entre duas superfícies específicas, de umidade relativa e temperatura especificada.

A transmissão de gases e vapores de água através dos filmes é feita por difusão, um processo que pode ser influenciado pela estrutura dos canais porosos e pela mobilidade das moléculas no material. Diversos fatores afetam a permeabilidade do filme, como tamanho, formato e arranjo molecular das cadeias. Quanto maiores as moléculas (ou seja, maior o peso molecular médio) e maior a simetria molecular, menor será a permeabilidade, pois a difusão

das moléculas se torna mais difícil. Maiores ramificações ou maior distanciamento das cadeias poliméricas causam o aumento da permeabilidade (BARROS, 2022).

Segundo Brandelero, Grossmann e Yamashita (2013) o aumento da permeabilidade ao vapor de água (PVA) e da absorção de água é um dos principais fatores que podem contribuir para a degradação de embalagens de filmes de amido, bem como do alimento embalado. A adição de substâncias hidrofóbicas pode formar regiões com menor polaridade dentro da matriz do filme, criando uma barreira que reduz a absorção de água e, assim, melhora a resistência ao vapor de água em filmes de amido. Estas substâncias podem originar regiões na matriz do filme com menor polaridade que o amido, exercendo efeito de barreira através da redução da água adsorvida na superfície do filme. A eficiência da substância hidrofóbica como barreira ao vapor de água pode estar relacionada com a razão entre as porções hidrofílicas e hidrofóbicas do filme e com as características da substância adicionada como polaridade, presença de insaturações ou ramificações.

3.8.4 Espessura

Pode-se definir a espessura como a distância perpendicular entre duas superfícies de um material. A definição da espessura de filmes poliméricos é um parâmetro inicial importante a ser verificado, pois pode estar relacionado a resistência mecânica e as propriedades de barreira aos gases e ao vapor d'água (NICHEL, 2020). Conhecendo-se a espessura, é possível obter informações sobre a resistência mecânica e as propriedades de barreira a gases e ao vapor d'água do material, bem como fazer estimativas sobre a vida útil dos alimentos acondicionados nestes materiais (SILVA, LAPA e SALES, 2019).

O controle da espessura dos filmes é importante, repetitividade, das medidas de suas propriedades funcionais e validade das comparações entre as propriedades dos filmes. A não uniformidade pode causar tanto problemas mecânicos quanto de conservação (LIMA, 2019).

3.8.5 Propriedades mecânicas

Um filme com propriedades de barreira adequadas pode ser ineficiente se as propriedades mecânicas não permitem a manutenção da integridade do filme durante o processo de manipulação, empacotamento e transporte. As principais propriedades mecânicas dos filmes são a resistência à tração, que expressa a tensão máxima desenvolvida pelo filme durante um teste de tração, a elongação, que é a capacidade do filme em esticar (ELIZONDO, 2007) e o

módulo de Young, que é definido como a razão entre a tensão aplicada e a elongação resultante (HESSEL et al., 2016). A resistência à tração e a elongação são determinantes cruciais para a durabilidade do filme, especialmente quando submetido a condições de estiramento e manipulação durante o processo de empacotamento e transporte.

Segundo Vaz (2012) as propriedades mecânicas dos filmes poliméricos são diretamente afetadas pela natureza do material filmogênico como extensão da cadeia polimérica, geometria, distribuição de massa molar e natureza e posição dos grupos laterais bem como, pela coesão da matriz polimérica, a qual depende da distribuição, da concentração e da força das ligações inter e intramoleculares na estrutura filmogênica. As condições de formação, o processo de elaboração e os aditivos utilizados como plastificantes e agentes reticulantes também influem no comportamento mecânico dos filmes.

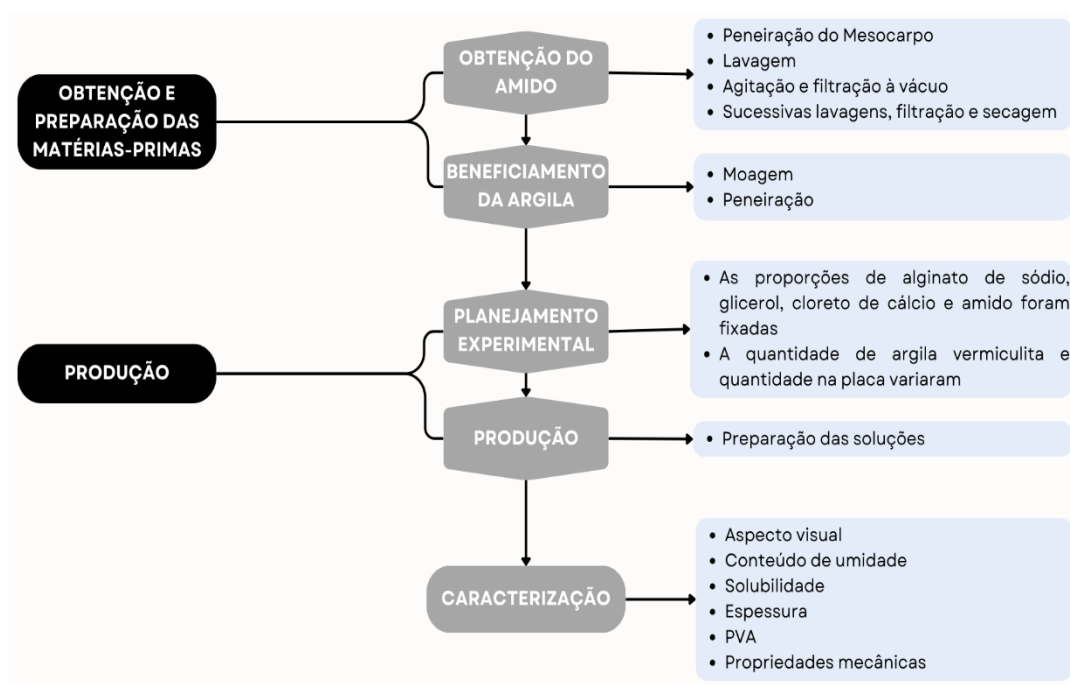
Silva (2022) ressaltou que filmes biodegradáveis provenientes de biopolímeros ainda não competem com os plásticos convencionais, visto que ainda apresentam capacidades limitadas em relação às propriedades mecânicas e funcionais. Dessa forma, Moraes (2009) destacou que a incorporação de nanoargilas a filmes de amido tem sido proposta na literatura como uma alternativa de melhoria das propriedades mecânicas e de barreira desses filmes.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

As blendas poliméricas foram produzidas utilizando amido de mesocarpo do coco babaçu, alginato de sódio puríssimo (Merck), argila vermiculita, glicerol (Dinâmica Química Contemporânea LTDA) e cloreto de cálcio. O procedimento metodológico seguiu-se conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma do processo de obtenção dos biofilmes



Fonte: Próprio Autor (2024).

4.2 OBTENÇÃO DO AMIDO DO MESOCARPO DO COCO BABAÇU

A obtenção do amido foi realizada por meio da metodologia proposta por Oliveira (2021). Iniciou-se o processo com a peneiração sucessiva do pó de mesocarpo, empregando uma malha granulométrica de abertura fina, de 200 mesh. Em seguida, o material resultante foi submetido a uma lavagem sob agitação em uma solução contendo metabissulfito de sódio (1:2 m/v), com o intuito de prevenir o escurecimento do amido. Após isso, a solução foi mantida em agitação por 10 minutos, sendo em seguida, submetida a um processo de filtração à vácuo. Em sequência, foram realizadas várias lavagens utilizando solução de NaOH a 0,05 mol/L, seguidas de lavagens com álcool etílico absoluto, visando a remoção de impurezas alcalinas e o aumento

da pureza do amido extraído. Ao término desse procedimento, o material foi submetido novamente a uma filtragem e então conduzido à estufa, na qual foi mantido sob uma temperatura controlada de 40 °C, durante o período de 24 horas.

4.3 BENEFICIAMENTO DA ARGILA

Iniciou-se com a etapa de moagem, realizada por meio de um moinho de bolas do tipo periquito, escolhido por sua capacidade de reduzir eficientemente o tamanho das partículas de argila, favorecendo a homogeneização do material. Após a etapa de moagem, foi peneirado com uma peneira de 200 mesh. A classificação foi realizada utilizando uma peneira padronizada conforme a norma ABNT nº 200, cuja abertura nominal é de 74µm.

4.4 FORMULAÇÕES DAS BLENDS

As proporções do alginato de sódio, glicerol, cloreto de cálcio e amido foram fixadas conforme o procedimento experimental de Lopes et al. (2020), enquanto as quantidades de argila vermiculita e solução aplicadas nas placas foram variáveis.

Tabela 1 - Planejamento experimental para biofilmes de amido de mesocarpo do coco babaçu, alginato de sódio e argila vermiculita

Amostra	Argila V. [g]	Quantidade de material depositado na Placa [g]	Alginato de sódio [g]	Glicerol [mL]	CaCl₂ (1,5%) [mL]	AMC B [g]
A1	1	40	8	5	30	4
A2	1	50	8	5	30	4
A3	1	60	8	5	30	4
A4	1	70	8	5	30	4
A5	1	80	8	5	30	4
A6	3	40	8	5	30	4
A7	3	50	8	5	30	4
A8	3	60	8	5	30	4
A9	3	70	8	5	30	4
A10	3	80	8	5	30	4

A11	5	40	8	5	30	4
A12	5	50	8	5	30	4
A13	5	60	8	5	30	4
A14	5	70	8	5	30	4
A15	5	80	8	5	30	4

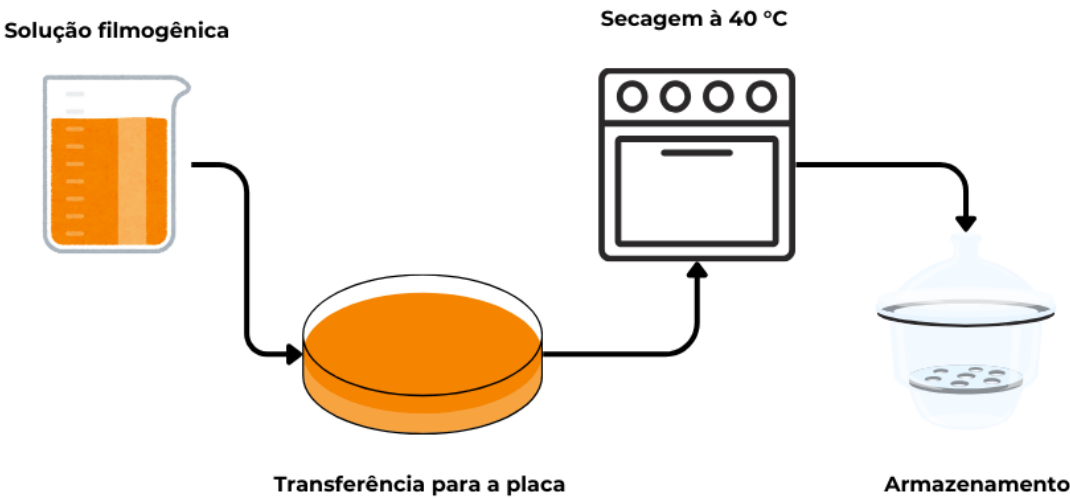
Fonte: Próprio Autor (2024).

4.4.1 Produção dos biofilmes

Os biofilmes foram produzidos seguindo o protocolo estabelecido por Santana e Kieckbush (2013). Os filmes foram preparados a partir da solução filmogênica, que foi depositada em placas de acrílico com diâmetro de 15 mm. A espessura dos filmes foi controlada pela quantidade exata de solução aplicada nas placas, utilizando um sistema de pesagem para garantir a uniformidade.

A secagem dos filmes, foi realizada em uma estufa com recirculação de ar (modelo Nova Ética, 400 1ND, Brasil), o que favoreceu uma secagem uniforme e controlada a uma temperatura de 40 °C durante um período de 18-20 horas. Após a secagem, os filmes foram retirados das placas de suporte e armazenados em ambiente controlado, com umidade relativa de 52%. O processo descrito é representado pela Figura 10.

Figura 10 - Representação esquemática das etapas do processo de produção dos biofilmes, incluindo a preparação da solução filmogênica, transferência para placa, secagem e obtenção do filme final



Fonte: Próprio Autor (2024).

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOFILMES

Os biofilmes foram caracterizados, quanto ao conteúdo de umidade, solubilidade em água, espessura, aspecto visual, permeabilidade ao vapor de água (PVA) e propriedades mecânicas.

4.5.1 Aspecto visual

Foi realizada uma avaliação subjetiva por meio da observação visual e tátil, buscando selecionar apenas biofilmes que sejam homogêneos, sem partículas insolúveis e com uma coloração uniforme. Esses materiais devem ser contínuos, ou seja, sem qualquer presença de rupturas ou zonas quebradiças, e precisam apresentar uma superfície lisa que facilite o manuseio, permitindo que sejam facilmente desprendidos do suporte. Além disso, é essencial que tenham uma boa flexibilidade. Aqueles bioplásticos que não se encaixaram nessas características foram descartados.

4.5.2 Conteúdo de umidade (ω)

A determinação do conteúdo de umidade foi conduzida conforme as normas da AOAC (2007), utilizando uma amostra de biofilme, cuja massa inicial (m_i) foi obtida através de pesagem. Logo após, essa amostra foi submetida a uma estufa (modelo SL-100/A, Solab, Brasil), que foi previamente ajustada para operar a uma temperatura constante de 105°C, durante um período de 24 horas. A estufa teve como objetivo a remoção completa da umidade presente na amostra, resultando na obtenção da massa final da amostra seca (m_f). Os valores relativos ao teor de umidade foram expressos em relação à massa inicial da amostra seca, e a quantificação será realizada aplicando a Equação (1).

$$\omega = \frac{m_i - m_f}{m_f} \quad (1)$$

4.5.3 Solubilidade em água (S)

A determinação da solubilidade em água foi realizada seguindo a metodologia estabelecida por Irissin-Mandata et al. (2001). Para isso, pesou-se uma amostra (m_i) dos

biofilmes, que em seguida, foi imersa em um volume de 50 ml de água destilada, sob condições controladas de agitação a 175 rpm, em uma mesa de agitação (modelo 3545-40-EA, Termo Fisher SciInc, EUA), mantida a uma temperatura de $(25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C})$ por um período de 24 horas. Após a imersão, o material foi removido da solução e, em seguida, submetido a um processo de secagem em estufa (modelo SL-100/A, Solab, Brasil) por um período de 24 horas a uma temperatura de $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a fim de obter a amostra seca final (m_f). A secagem a $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ foi escolhida para garantir a remoção completa da água, facilitando a quantificação da matéria solubilizada. A solubilidade em água foi calculada pela equação (2), que leva em consideração a perda de massa após imersão e secagem do material, ajustada pelo teor de umidade.

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

4.5.4 Espessura (δ)

Foi realizada empregando um micrômetro digital (Mitutoyo, modelo MDC-25S, com resolução de 0,001 mm, Japão), com o objetivo de efetuar medições da espessura de amostras de biofilmes em nove pontos distintos, selecionados de forma aleatória. A espessura final de cada amostra foi obtida por meio do cálculo da média aritmética das nove medidas individuais.

4.5.5 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A determinação gravimétrica da PVA foi realizada em um ambiente controlado a $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$), seguindo o método E96M-16 (2016). Para isso, empregou-se uma pequena célula de acrílico com tampa, com formato adequado para acondicionar o biofilme, com tampa e abertura central, conforme ilustrado na Figura 11. A fim de alcançar uma condição de umidade relativa (UR) de 0%, o fundo da célula foi preenchido com cloreto de cálcio granulado (Ecibra, Brasil). Essa disposição permite a criação de um ambiente desprovido de umidade excessiva.

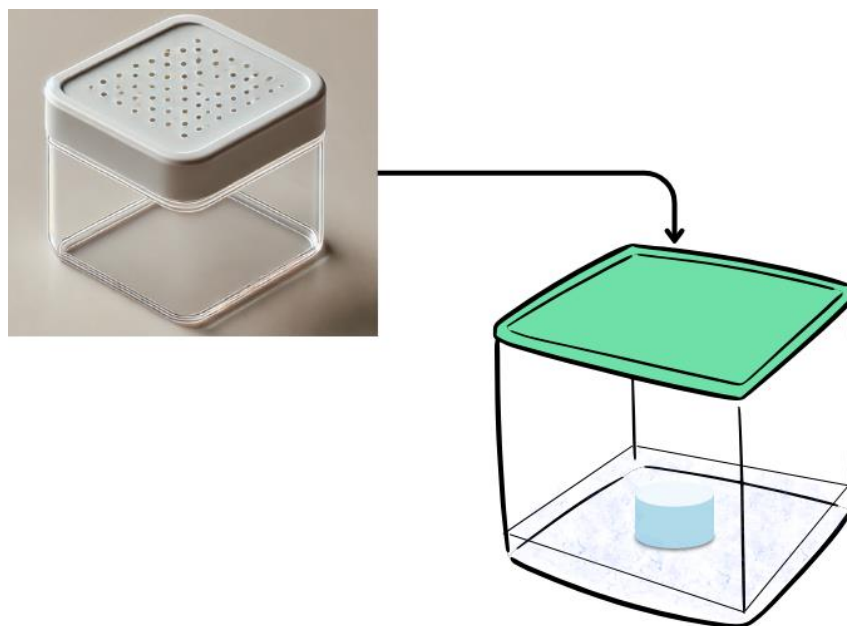
Figura 11 – Célula de acrílico projetada para acondicionar os biofilmes durante a determinação da PVA



Fonte: Próprio Autor (2024).

Além disso, a célula foi cuidadosamente acomodada em outro recipiente de acrílico, o qual será selado hermeticamente conforme mostra a Figura 12. A parte inferior deste segundo recipiente contém uma solução saturada de NaCl (Synth, Brasil), que assegurará uma umidade relativa constante de 75 %.

Figura 12 – Visualização esquemática do armazenamento da célula que contém o biofilme no recipiente que contém a solução de NaCl



Fonte: Próprio Autor (2024).

Com essa configuração, é possível estabelecer uma diferença contínua de pressão de vapor d'água, representada por $\Delta P\omega$. Ao longo de 72 horas, o aumento total de massa da célula

foi monitorado de forma contínua com intervalos de 12h. Esse acréscimo está diretamente associado à taxa de água que permeou pelo filme do bioplástico testado (G). Esse valor foi incorporado à Equação (3), permitindo calcular a Permeabilidade ao Vapor de Água (PVA).

$$PVA = \left[\frac{G\delta}{A_e \Delta P_\omega} \right] F \quad (3)$$

Onde: PVA é a permeabilidade de vapor de água do bioplástico $\left[\frac{g.mm}{m^2.dia.kpa} \right]$; (δ) é a espessura do biopolímero (mm); (A_e) é a área da superfície exposta do biofilme ($= 38,5 \times 10^{-4} m^2$); (ΔP_ω) é a diferença de pressão parcial através do bioplástico, em kPa; (G) é o coeficiente angular da reta de ajuste aos pontos experimentais em um gráfico da massa *versus* tempo (g/dia). (F) é um fator de correção que considera a resistência adicional à transferência de massa do vapor d'água entre a superfície da camada de cloreto de cálcio e o biopolímero, essencial para a precisão dos cálculos.

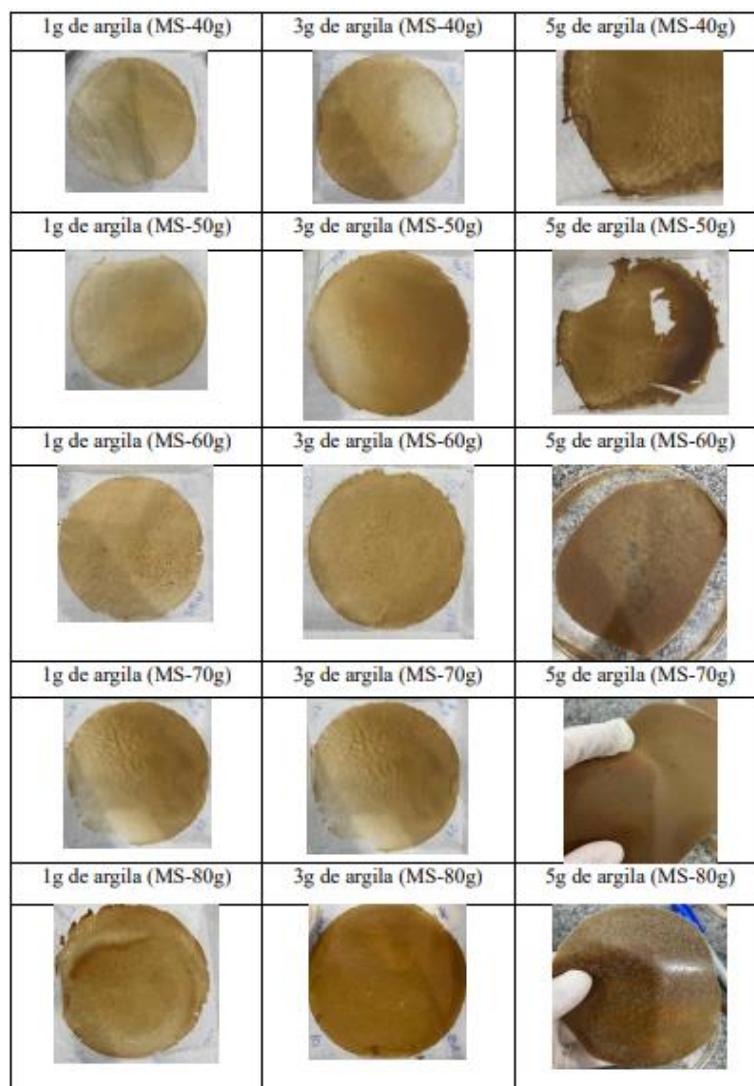
4.5.6 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos biofilmes foram avaliadas por meio de um ensaio de tração empregando o texturômetro TA.XT2, (Stable Microsystems SMD). Esse procedimento tem por objetivo aferir a elongação na ruptura (E), a tensão de ruptura (TR) e o módulo elástico (ME) desses materiais, em consonância com as diretrizes estabelecidas pelas normas D882-18 (2018).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 13 mostra o resultado de diferentes formulações de biofilmes após a secagem e retirada das placas.

Figura 13 - Filmes obtidos a partir da confecção dos biocompósitos nas diferentes concentrações de argila e massa na placa (MS)



Fonte: Próprio Autor (2024).

5.1 Aspecto Visual

A aparência dos filmes é diretamente afetada pela concentração de argila e pela massa na placa. Com o aumento da concentração de argila, os filmes tornam-se mais opacos, mais escuros e apresentam maior espessura visual. Porém, em concentrações de 5 g de argila e

valores de massa na placa mais baixos, a integridade estrutural é comprometida, levando à quebra e irregularidades. Assim, uma combinação da massa na placa e da argila balanceada é essencial para manter um aspecto visual homogêneo e evitar problemas de fragilidade.

5.2 Conteúdo de umidade e solubilidade em água

Os valores obtidos para o conteúdo de umidade (ω) e solubilidade em água (S) e espessura (δ) dos filmes são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Teor de umidade (ω), solubilidade em água (S) e espessura (δ) dos filmes em função da massa do material nas placas (MS) e da concentração de argila

MS (g)	ω (%)	S (%)	δ (mm)
1 g			
40	23,19±0,06 ^{aA}	37,47±0,04 ^{aB}	0,088±0,018 ^{aA}
50	24,95±0,02 ^{bC}	48,96±0,03 ^{bA}	0,094±0,005 ^{aA}
60	29,21±0,04 ^{cB}	65,02±0,03 ^{cB}	0,126±0,011 ^{bA}
70	32,15±0,04 ^{eB}	72,38±0,02 ^{dC}	0,166±0,029 ^{cB}
80	29,96±0,07 ^{dB}	79,76±0,01 ^{eC}	0,203±0,003 ^{cB}
3g			
40	32,80±0,04 ^{dC}	28,24±0,03 ^{aA}	0,203±0,003 ^{cC}
50	24,49±0,05 ^{aB}	52,15±0,08 ^{eC}	0,122±0,008 ^{bB}
60	26,63±0,03 ^{bC}	34,26±0,03 ^{cA}	0,130±0,026 ^{bA}
70	64,72±0,04 ^{eC}	36,01±0,14 ^{dA}	0,105±0,011 ^{aA}
80	31,60±0,02 ^{cC}	31,82±0,03 ^{bA}	0,166±0,009 ^{cA}
5g			
40	24,61±0,01 ^{eB}	56,86±0,02 ^{bC}	0,141±0,030 ^{aB}
50	23,91±0,01 ^{dA}	49,94±0,02 ^{aB}	0,137±0,007 ^{aC}
60	23,52±0,01 ^{cA}	65,86±0,03 ^{dB}	0,180±0,031 ^{bB}
70	21,95±0,03 ^{bA}	61,61±0,03 ^{cB}	0,306±0,025 ^{cC}
80	20,64±0,05 ^{aA}	76,61±0,01 ^{eB}	0,205±0,019 ^{bB}

Fonte: Próprio Autor (2024).

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna para diferentes concentrações de massa na placa (MS) indicam que não há diferença significativa ($p \leq 0,05$) de acordo com o teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada linha para as diferentes concentrações de 1g, 3g e 5g de argila nas mesmas concentrações de massa na placa (MS) indicam que não há diferença significativa ($p \leq 0,05$) de acordo com o teste de Tukey.

O teste de Tukey foi utilizado para verificar se as diferenças entre as médias de umidade e solubilidade para as diferentes massas na placa e diferentes concentrações de argila são estatisticamente significativas. Os resultados revelaram diferenças estatisticamente significativas na umidade e solubilidade em quase todas as comparações, indicando que tanto o aumento da massa na placa (MS) quanto a maior concentração de argila influenciam significativamente esses parâmetros.

De acordo com a Tabela 2, para as formulações com 1 g de argila, o teor de umidade apresentou um aumento gradual à medida que aumentou-se a quantidade de massa na placa, exceto pelo último ensaio de 80 g na placa. Esse aumento de umidade pode indicar que, em baixas concentrações de argila, há maior retenção de água devido ao aumento da pressão na placa. Com o aumento da pressão, a estrutura da amostra é compactada, reduzindo o espaço poroso entre as partículas. Em concentrações menores de argila como 1g, a estrutura é mais solta, então, o aumento da massa na placa ajuda a compactar as partículas, o que pode resultar em uma maior retenção de umidade. Esse comportamento é mais pronunciado quando a quantidade de argila é baixa (1g), onde a água consegue ocupar os espaços de forma mais eficaz com o aumento de pressão.

O mesmo comportamento é observado para o teor de solubilidade que apresenta um aumento consistente à medida que a massa na placa (MS) aumenta, variando de 37,47% em 40g para 79,76% em 80g. Esse padrão indica que, em concentrações baixas de argila, o aumento da pressão, através do aumento da massa, facilita a liberação de componentes solúveis, aumentando a solubilidade.

A umidade relativa do ambiente de armazenamento dos biopolímeros exerce uma influência significativa sobre o seu teor de umidade. Além disso, a presença de glicerol, um composto higroscópico, contribui consideravelmente para a retenção de umidade nos filmes, com seu efeito aumentando conforme a concentração (SILVA, 2022).

Os índices de umidade não apresentaram a redução esperada, como sugerem Lopes et al. (2020), que investigaram compósitos poliméricos naturais à base de mesocarpo de coco babaçu (BCM), alginato e glicerol e Bierhalz et al. (2014), que avaliaram os efeitos de um procedimento combinado de reticulação usando íons cálcio e bário nas propriedades físicas e morfológicas de filmes à base de alginato contendo natamicina. A argila vermiculita é conhecida pela sua capacidade de reter água em suas estruturas laminares, baixas quantidades de argila podem provocar o aumento do teor de umidade.

Para os ensaios contendo 3 g de argila, a umidade apresenta um padrão diferente, atingindo um valor mais alto em 70g (64,72%) e depois diminuindo para 31,60% em 80g. Essa

alta umidade em 70g pode estar associada a espessura do biofilme que apresentou um valor 0,105 mm que resulta numa capacidade de retenção de água máxima em torno desse valor.

A solubilidade nessa concentração de argila (3 g) apresenta um comportamento randômico, possivelmente relacionado a variabilidades intrínsecas do sistema ou fatores não controlados no experimento, sendo uma hipótese que exige investigação mais aprofundada. Esse parâmetro atinge seu pico em 50g (52,15%) e depois diminui em 60g e 70g, para aumentar levemente em 80g. De acordo com a Tabela 2 a espessura para essa amostra foi menor do que para as demais, o que pode explicar esse pico no valor de solubilidade.

Em geral, biofilmes mais espessos tendem a apresentar menor solubilidade em comparação com os biofilmes mais finos. Isso ocorre porque, em filmes espessos, há uma maior quantidade de material estrutural e uma rede mais densa que torna mais difícil para a água penetrar e dissolver o material. Em outras palavras, a espessura adicional cria uma barreira física que retarda a entrada de água, o que diminui a taxa de dissolução do material. Dessa forma, quanto menor a espessura maior tende a ser a solubilidade.

A concentração de 3 g de argila cria uma matriz intermediária, estável e compacta, mas ainda porosa o suficiente para reter compostos solúveis com eficiência. Essa configuração evita tanto a solubilidade excessiva quanto a baixa retenção, resultando em uma faixa de solubilidade menor. Em suma, a estrutura resultante com 3g pode estar equilibrada o suficiente para segurar os solutos sem permitir que eles sejam facilmente dissolvidos e liberados.

Para a concentração de 5 g de argila, os teores de umidade apresentaram uma diminuição linear e valores próximos aos encontrados na literatura (Lopes et al., 2020; Bierhalz et al., 2014) variando de 24,61 a 20,64%. Já a solubilidade segue a tendência de aumento, o que pode ser considerado devido a adição de plastificante que tende a aumentar a solubilidade nos biofilmes. Um filme com elevada solubilidade não é necessariamente inadequado, já que a solubilidade deve ser ajustada conforme a função específica para a qual o filme é destinado.

5.3 Espessura dos filmes

De acordo com a Tabela 2, o aumento da espessura com a massa aplicada é uma tendência geral, mas há momentos de inconsistência, especialmente nos ensaios com 3 g de argila, onde as variações de espessura apresentam aleatoriedades, o que pode indicar uma variabilidade no comportamento do material para essa massa específica.

Uma determinação precisa dos filmes é importante, visto que serve como base para o cálculo de várias propriedades funcionais sendo também fundamental para a análise da

repetibilidade. A espessura exerce grande influência nas propriedades de barreira de filmes, contudo, geralmente não tem sido considerada em vários estudos (LIMA, 2019). Por exemplo, em filmes multianolayer de polietileno/poliamida6 (PE/PA6), camadas com espessuras nanométricas apresentaram melhorias substanciais na permeabilidade ao oxigênio, devido ao efeito de confinamento e mudanças na morfologia cristalina. Essas alterações estruturais aumentam a tortuosidade para a difusão de gases, demonstrando a relevância de considerar a espessura em pesquisas sobre filmes de barreira (LOZAY *et al.*, 2021)

5.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

Os valores obtidos para a PVA são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Permeabilidade ao vapor de água dos filmes

MS (g)	PVA [(g.mm)/(m ² .dia.kPa)]
1 g	
40	4,40±2,40 ^{aA}
50	5,29±1,75 ^{aA}
60	6,77±0,96 ^{aB}
70	9,18±1,60 ^{bA}
80	14,70±4,44 ^{cB}
3 g	
40	8,64±2,06 ^{bB}
50	8,18±2,38 ^{bB}
60	4,46±0,90 ^{aA}
70	9,92±2,14 ^{bA}
80	4,89±2,61 ^{aA}
5 g	
40	6,06±1,19 ^{bB}
50	4,68±0,37 ^{aA}
60	8,89±2,29 ^{bC}
70	16,13±1,72 ^{dB}
80	13,76±0,56 ^{cB}

Fonte: Próprio Autor (2024).

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna para diferentes concentrações de massa na placa (MS) indicam que não há diferença significativa ($p \leq 0,05$) de acordo com o teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada linha para as diferentes concentrações de 1g, 3g e 5g de argila nas mesmas concentrações de massa na placa (MS) indicam que não há diferença significativa ($p \leq 0,05$) de acordo com o teste de Tukey.

A PVA variou de 4,40 a 14,70 [(g.mm)/(m².dia.kPa)] para a concentração de 1 g de argila. De 8,64 a 4,89 [(g.mm)/(m².dia.kPa)] para 3 g de argila. De 6,06 a 13,76 [(g.mm)/(m².dia.kPa)] para a concentração de 5 g.

A partir da tabela 3 percebeu-se que a PVA nos filmes apresentou, embora não completamente linear, um aumento à medida em que se aumenta a quantidade de massa na placa. Para a concentração de 1 g a alta permeabilidade sugere que uma concentração menor de argila gera uma estrutura menos densa e mais porosa, o que permite uma maior passagem de vapor de água. O aumento da massa na placa demonstra não melhorar significativamente a resistência da estrutura à passagem de vapor, indicando que a pressão exercida na formação do filme não é suficiente para reduzir a porosidade nesse nível de argila.

Enquanto para 3 g a PVA mostra variação menos pronunciada, tendo uma oscilação para os valores de 60 g com PVA de 4,46 [(g.mm)/(m².dia.kPa)] e 80 g de 4,89 [(g.mm)/(m².dia.kPa)]. Esse comportamento intermediário sugere que, com 3g de argila, há um equilíbrio entre a densidade da matriz do biofilme e sua resistência ao vapor de água. Esse equilíbrio está relacionado às interações químicas entre o amido e a argila, como pontes de hidrogênio entre grupos hidroxila do amido e superfícies reativas da argila. Essas interações aumentam a densidade do filme, reduzindo sua permeabilidade ao vapor, enquanto a distribuição homogênea de partículas reforça a estrutura sem comprometer a flexibilidade (TANG, ALAVI, HERALD, 2008).

A estrutura se torna ligeiramente menos permeável do que na concentração de 1g, mas não tanto quanto em 5g, o que indica que 3g de argila ajudam a limitar a passagem de vapor, ainda que sem um efeito de barreira tão forte. Na maior concentração de argila (5g), os valores de permeabilidade oscilaram apresentando diminuição nos primeiros ensaios, seguida de um aumento nas amostras de 60 g e 70 g. Os valores encontrados para os diferentes ensaios foram semelhantes aos encontrados por Lopes et al. (2017).

Segundo Viegás (2016) a espessura influencia diretamente a permeabilidade ao vapor de água. Quanto maior a espessura de um filme maior será a PVA. Esse comportamento foi verificado para os ensaios contendo 1g e 5 g de argila. Enquanto o mesmo não ocorre para a concentração de 3 g, isso pode acontecer pois em concentrações intermediárias a argila começa a se distribuir de forma mais densa e a interagir com a matriz de amido, mas essa interação não é completamente linear. Com o aumento da massa na placa (MS), a estrutura do biofilme é

compactada de maneira diferente em cada nível de concentração. Dessa forma, a quantidade de argila pode ser suficiente para criar um efeito de barreira inicial, mas a distribuição das partículas ainda deixa alguns espaços entre elas, o que permite um fluxo irregular de vapor. Isso causa uma permeabilidade que não segue um padrão estritamente crescente ou decrescente com o aumento de massa na placa.

Em filmes poliméricos homogêneos ideais, as constantes de permeabilidade são independentes da espessura. O transporte de água através de filmes hidrofílicos, entretanto, é extremamente complexo devido às isothermas de sorção de umidade não lineares e à difusividade dependente do conteúdo de água (LOPES et al., 2017).

Segundo Krochta e Mulder-Johnston (1997), a PVA é considerada pobre quando apresenta valores na faixa entre 10-100, moderada entre 0,10-10 e boa de 0,01-0,10 g.mm./(m².dia.kPa). Dessa forma, para as amostras estudadas a permeabilidade pode ser considerada moderada, exceto para os ensaios de 80 g na placa (1g de argila), 70 g e 80g (5 g de argila).

5.5 Propriedades mecânicas

A Tabela 4 apresenta as respostas obtidas para a tensão de ruptura, alongação e módulo de Young que representam as propriedades mecânicas analisadas nos filmes.

Tabela 4 - Tensão de ruptura (TR), Elongação (E) e Módulo de Young (MY) dos biofilmes confeccionados a partir de amido do mesocarpo do coco babaçu e alginato de sódio reticulados com cloreto de cálcio aditivados com argila vermiculita

MS	TR (MPa)	E (%)	MY (MPa)
1 g			
40	1,08±0,08 ^{aA}	14,27±0,41 ^{bA}	5,67±0,49 ^{aA}
50	2,78±0,36 ^{aA}	14,61±1,79 ^{bB}	19,20±1,15 ^{bA}
60	3,71±0,46 ^{bB}	17,84±1,35 ^{cB}	19,39±2,48 ^{bB}
70	5,85±0,27 ^{cB}	19,23±0,33 ^{dA}	28,49±1,34 ^{cB}
80	2,48±0,11 ^{aA}	10,90±0,32 ^{aA}	21,92±1,09 ^{bB}
3 g			
40	2,26±0,13 ^{aB}	15,26±2,01 ^{cA}	13,65±1,43 ^{aB}
50	3,05±0,05 ^{aA}	12,12±1,26 ^{bA}	21,96±1,85 ^{bA}

60	4,64±1,06 ^{abB}	9,27±1,75 ^{aA}	52,27±2,94 ^{dC}
70	4,83±0,47 ^{bA}	20,47±3,20 ^{dA}	27,06±2,44 ^{cB}
80	2,83±0,64 ^{aA}	20,47±1,95 ^{dB}	27,06±1,76 ^{cC}
5 g			
40	2,56±0,48 ^{aB}	20,97±3,35 ^{aB}	11,36±2,10 ^{aB}
50	3,77±0,38 ^{bB}	17,69±3,09 ^{aC}	19,74±1,67 ^{bA}
60	2,69±0,29 ^{aA}	29,81±3,86 ^{bC}	8,04±0,49 ^{aA}
70	4,56±0,60 ^{bA}	18,00±1,58 ^{aA}	23,45±2,85 ^{bA}
80	2,36±0,54 ^{aA}	21,55±4,17 ^{aB}	10,59±2,79 ^{aA}

Fonte: Próprio Autor (2024).

Médias com a mesma letra minúscula em cada coluna para diferentes concentrações de massa na placa (MS) indicam que não há diferença significativa ($p \leq 0,05$) de acordo com o teste de Tukey. Médias com a mesma letra maiúscula em cada linha para as diferentes concentrações de 1g, 3g e 5g de argila nas mesmas concentrações de massa na placa (MS) indicam que não há diferença significativa ($p \leq 0,05$) de acordo com o teste de Tukey.

A tensão de ruptura valores próximos para as diferentes concentrações de argila, variando de 1,08 a 2,48 MPa para 1 g de argila, de 2,26 a 4,83 MPa para os ensaios com 3 g de argila e de 2,36 a 4,56 MPa para as formulações contendo 5 g de argila, demonstrando uma tendência de aumento. Os resultados encontrados foram próximos aos apresentados por Nascimento et al. (2021) que encontraram valores entre 2,10 e 9,46 MPa. No entanto, diferem dos resultados encontrados por Kim, Ko e Park (2002).

A densidade de um biofilme impacta diretamente propriedades físico-químicas como a dispersão de argila e a interação polissacarídeo-partícula. Quando a massa é ajustada para compactar a estrutura sem torná-la excessivamente densa, o biofilme pode apresentar um aumento na tensão de ruptura. Isso ocorre porque a matriz polimérica se torna mais coesa, melhorando sua capacidade de suportar cargas aplicadas. No entanto, quando a massa é muito baixa, a estrutura pode não ter a densidade necessária para maximizar a resistência. Já com massas muito altas, o material pode perder flexibilidade, aumentando a chance de ruptura em cargas mais altas.

A elongação para 1 g de argila varia entre aproximadamente 10,90% e 19,23%, com valores intermediários entre esses extremos. Esses resultados podem indicar que, com uma quantidade baixa de argila, o biofilme mantém uma capacidade razoável de elongação. A menor quantidade de argila pode deixar o material mais flexível e permitir um maior alongamento, mas com alguma limitação devido à quantidade reduzida de reforço na estrutura.

Para 3 g de argila, os valores de elongação variam de cerca de 9,27% a 20,47%. Essa concentração intermediária parece mostrar uma boa combinação de resistência e flexibilidade,

sugerindo que 3 g de argila proporciona uma rede interna de partículas que possibilita alongamento sem comprometer totalmente a estrutura. Frangopoulos *et al.* (2023) em seu trabalho exploraram filmes com amido e montmorilonita e constataram que concentrações intermediárias (cerca de 10,5%) proporcionaram um bom equilíbrio entre resistência e flexibilidade, sugerindo que as interações amido-argila desempenham um papel crucial na formação de uma rede interna coesa. No entanto, valores como 9,27% indicam que, dependendo da configuração e distribuição de massa na placa (MS), a flexibilidade do biofilme pode reduzir.

Para a concentração de 5 g de argila, a elongação varia de aproximadamente 18,00% a 29,81%. Nessa concentração mais alta, os valores de elongação são, em média, mais altos do que em 1 g e 3 g, o que pode indicar que a maior quantidade de argila cria uma estrutura interna que resiste melhor à deformação sem romper. Esse aumento na capacidade de elongação sugere que o material se torna mais flexível, o que pode ser devido à distribuição de partículas de argila que promovem uma matriz mais coesa e resistente a forças externas.

A resposta a elongação foi próxima às apresentadas na literatura por autores como Cunha (2017) e Nascimento et al. (2021) para estudos realizados com filmes de amido e glicerol que é o agente plastificante. A ação do plastificante tem forte influência nessas propriedades, porque esses compostos são capazes de diminuir as interações intermoleculares aumentando a mobilidade da cadeia dos biopolímeros e consequentemente melhorando a flexibilidade e capacidade de alongamento das películas, através da formação de ligações de hidrogênio com o amido durante o processo de plastificação (CUNHA, 2017).

Com 1 g de argila, o módulo de Young (MY) apresenta valores de 5,67 a 21,92 MPa, indicando que o material tem uma rigidez menor quando contém uma baixa concentração de argila, tornando-o mais flexível e com menor resistência à deformação elástica. Com 3 g de argila, o MY varia de 13,65 MPa a 52,27 MPa, um aumento significativo em comparação a 1 g. Esse incremento reflete uma maior rigidez e resistência do biofilme, sugerindo que a quantidade intermediária de argila proporciona um reforço eficiente. Para a concentração de 5 g de argila, o MY varia de 8,04 MPa a 23,45 MPa. Apesar do aumento na concentração de argila, os valores de MY inferiores aos de 3 g. Isso pode ocorrer porque uma quantidade excessiva de argila tende a gerar aglomeração de partículas, o que cria áreas de menor resistência e compromete a rigidez do material.

Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram que o MY aumenta de 1 g para 3 g de argila, mas diminui em 5 g, indicando que 3 g pode ser a concentração ideal para alcançar uma boa rigidez sem prejudicar a homogeneidade do material. Esse comportamento sugere que existe um limite na quantidade de argila que pode ser adicionada antes que ocorra uma

saturação, onde o excesso de partículas compromete a estrutura em vez de reforçá-la. A hipótese é que, em concentrações mais altas, as partículas de argila, inicialmente dispersas e atuando como reforço, começam a se aglomerar devido à proximidade física e à interação interparticular. Esses aglomerados podem gerar zonas de tensão localizada dentro da matriz, aumentando a probabilidade de formação de microfissuras sob tensão.

Moraes (2009) obteve resultados diferentes dos encontrados neste estudo ao trabalhar com diversas argilas. Já Neto et al. (2020), que investigaram filmes de amido, PVA e argila bentonita, observaram um aumento do módulo de Young com a adição de argila às formulações. Assim, neste estudo, observa-se que o módulo de Young do biofilme é influenciado pela concentração de argila, atingindo um valor ideal em torno de 3 g, o que confere boa rigidez ao material. Concentrações superiores a 3 g, no entanto, podem não contribuir para o aumento da rigidez devido à aglomeração de partículas, que reduz a uniformidade estrutural do biofilme.

6 CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que a incorporação de argila melhora as propriedades mecânicas e físico-químicas dos biopolímeros, tornando-os adequados para materiais biodegradáveis. Os filmes com a maior concentração de argila apresentaram menor teor de umidade, variando entre 20,64% e 24,61%. Essa característica, aliada à maior consistência do material, sugere uma reticulação mais eficiente e uma matriz estruturalmente mais coesa. Observou-se que o aumento da argila contribui para uma matriz estrutural estável, enquanto o glicerol auxilia na flexibilidade dos filmes.

A PVA observada foi considerada moderada para a maioria das amostras, com exceção dos ensaios com valores mais elevados de massa na placa.

A concentração de argila e a quantidade de massa na placa influenciaram simultaneamente na solubilidade, umidade, espessura e permeabilidade ao vapor de água, além das propriedades mecânicas dos filmes. A resposta de tensão de ruptura e alongação foi impactada pelas diferentes concentrações de argila, sendo que a combinação de 3 g de argila se destacou com boa resistência e flexibilidade, apresentou filmes visualmente mais homogêneos e compactos, além de apresentar menores valores de solubilidade.

Analizando a variável massa na placa (MS), observou-se que as massas 40 g e 50 g foram as que proporcionaram os menores valores de umidade e solubilidade na faixa de concentração de argila indicada, além de apresentarem os melhores resultados para as propriedades mecânicas. Assim, a combinação de 3 g de argila com uma distribuição de material entre 40 e 50 g pode resultar no favorecimento de uma matriz coesa e com propriedades físicas e mecânicas ajustáveis para o controle de degradação e resistência em aplicações de embalagens biodegradáveis.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas para estudos futuros, sugere-se a realização de análises complementares de caracterização, como:

- Microscopia Eletrônica de varredura (MEV)
- Espectroscopia na região infravermelho (FTIR)
- Difração de Raio-X (DRX)

Tais análises podem revelar como a argila está distribuída na matriz polimérica e explicar a influência nas propriedades mecânicas e de barreira, auxiliando numa melhor compreensão da interação entre argila e biopolímeros.

Sugere-se testar concentrações intermediárias de argila, além de explorar diferentes tipos, como bentonita, caulim e montmorilonita, para avaliar possíveis relações de sinergia entre o tipo e a quantidade de argila e as propriedades desejadas dos biofilmes. Adicionalmente, recomenda-se fixar a quantidade de massa na placa enquanto se varia a concentração de amido, permitindo uma análise mais detalhada do efeito isolado do amido na matriz polimérica e sua interação com a argila.

Além disso, recomenda-se explorar técnicas que aprimorem a impermeabilidade dos biofilmes, como tratamentos de superfície com revestimentos hidrofóbicos. Exemplos específicos incluem a aplicação de camadas finas por plasma, que podem alterar a composição química da superfície para repelir água, e a técnica de deposição química em vapor (CVD), amplamente utilizada para criar revestimentos uniformes e resistentes. Essa abordagem pode expandir significativamente a aplicabilidade dos biofilmes, não apenas em embalagens de alimentos e produtos sensíveis à umidade, mas também em outras áreas, como coberturas para solos agrícolas, controle de liberação de fármacos, curativos para feridas e cosméticos.

REFERÊNCIAS

- AALIYA, B.; SUNOOJ, K. V.; LACNER, M. **Biopolymers composites: a review**. International Journal Of Biobased Plastics, vol 3, no 1, 40-84, 2021.
- ABANG, S. et al. **Bioplastic classifications and innovations in antibacterial, antifungal, and antioxidant applications**. Journal of Bioresources and Bioproducts, 8, 361-387, 2023.
- ABRAHÃO, M. F. C. **Desenvolvimento de Blendas reticuladas de gelatina e PVA para uso em *phantoms* para treinamento em procedimentos medicos guiados por ultrassom**. Dissertação de Mestrado (Química) – USP, Ribeirão Preto, 2017.
- Annual Book of ASTM Standards. “**Terminology relating to plastics**”, D883, vol. 08.01
- AOAC International. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 2007
- ARVANITOYANNIS, I.; BILIADERIA, C. G.; OGAWA, H.; KAWASAKI, N. **Biodegradable films made from low-density polyethylene (LDPE), rice starch and potato starch for food packaging applications: part. 1**. Carbohydrate Polymers, Barking, v. 36, n. 1, p. 89- 104, 1998.
- ASEVEDO, E. A. **ELABORAÇÃO DE COBERTURA FILMOGÊNICA À BASE DE PECTINA EXTRAÍDA DA CASCA DO CAJÁ PARA REVESTIMENTO EM FRUTAS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – UFRN, Natal, 2018.
- ASTM International. **ASTM E96-95**. Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, 2016.
- ASTM International. **ASTM D882-18**. Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, 2018.
- BARBOSA, R. S. **ESTUDO DE PILARIZAÇÃO DE ARGILA VERMICULITA COM O POLIOXICÁTION DE ALUMÍNIO**. Trabalho de Conclusão do Curso (Química Industrial) – UEPB, Campina Grande, 2017.
- BARROS, F. F. T. **DETERMINAÇÃO DA TAXA DE PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA E OXIGÊNIO: aplicação em embalagens plásticas flexíveis da Indústria Alimentícia**. Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharel em Química) – UFSCar, São Carlos, 2022.
- BEATRIZ, A.; ARAÚJO, Y. J. K.; LIMA, D. P. **GLICEROL: UM BREVE HISTÓRICO E APLICAÇÃO EM SÍNTESES ESTEREOSELETIVAS**. Quim. Nova, Vol. 34, No. 2, 306-319, 2011.
- BIERHALZ, A. C. K. **CONFECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOFILMES ATIVOS À BASE DE PECTINA BTM E DE PECTINA BTM/ALGINATO RETICULADOS COM CÁLCIO**. Dissertação (Engenharia Química) – UNICAMP, Campinas, 2010.
- BIERHALZ, A. C. K.; DA SILVA, M. A.; BRAGA, M. E. M.; SOUSA, H. J. C.; KIECKBUSCH, T. G. **Effect of calcium and/or barium crosslinking on the physical and**

antimicrobial properties of natamycin-loaded alginate films. *Food Science and Technology*, v. 57, p. 494-501, 2014.

BRANDELERO, R. P. H; GROSSMANN, M. V.; YAMASHITA, F. **Hidrofilicidade de Filmes de Amido/Poli(Butileno Adipato Co-Tereftalato) (Pbat) Adicionados de Tween 80 e Óleo de Soja.** *Polímeros*, vol. 23, n. 2, p. 270-275, 2013.

BRASIL. G. V. S. et al. **Incorporação de pólen de abelha Tubi (*Scaptotrigona* sp) em filmes biodegradáveis de alginato, pectina e amido.** *Research, Society and Development*, v. 11, n. 9, e11711931603, 2022.

BRASIL. Governo do Maranhão. **Quebradeiras de coco babaçu do Maranhão são destaque na I Feira Nordestina da Agricultura Familiar e Economia Solidária no RN.**

Disponível em: <<https://www.ma.gov.br/noticias/quebradeiras-de-coco-babacu-do-maranhao-sao-destaque-na-i-feira-nordestina-da-agricultura-familiar-e-economia-solidaria-no-rn>>.

Acesso em: 01 de set. 2024.

BRITO, et al. **MODIFICAÇÃO QUÍMICA DA ARGILA VERMICULITA PARA APLICAÇÃO EM NANOCOMPÓSITOS BIODEGRADÁVEIS.** Congresso Brasileiro de Cerâmica, Natal, 2013. Resumo dos trabalhos. Rio Grande do Norte: ABCERAM, 2013.

CASA FLOR. **O que é umidade?** Disponível em: <https://casaflor.art.br/glossario/o-que-e-umidade/?srsltid=AfmBOoqhRhDLMVz73xIZp3MAfEcJWAhXGrXn2Jk3FvS8bVeTbPt1tYQE>. Acesso em: 2 nov. 2024.

CRUZ, N. **HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO AMIDO DO MESOCARPO DE BABAÇU (*Attalea speciosa*) PARA PRODUÇÃO DE BEBIDA ALCOÓLICA DESTILADA.** Tese de Pós – Graduação (Biotecnologia Industrial) – UFMA, São Luís, 2021.

CUNHA, G. F. **BIOFILMES À BASE DE AMIDO INCORPORADOS COM EXTRATO ETANÓLICO DE PRÓPOLIS.** Dissertação (Tecnologia e Alimentos) – IF Goiano, Rio Verde, 2017.

DIAS, M. R. **Obtenção e processamento de microesferas de alginato/vidro bioativo.** Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais) – CEFET, Belo Horizonte, 2020.

DINIZ, et al. **Estudo comparativo entre agentes reticulantes para possível aplicação no tratamento do ceratocone.** *Revista Matéria*, vol. 24, n 3, 2019.

ELIZONDO, N. J. **Propriedades mecânicas e de barreira, solubilidade e microestrutura de filmes de farinha de amaranto modificada com epiclorigrina ou misturada com poli(vinil álcool).** Dissertação (Engenharia de Alimentos) – Unicamp, Campinas, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Agência de Informação Tecnológica: **Glicerol.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biodiesel/glicerol>. Acesso em: 13 out. 2024.

FARIAS et al. **BIOPOLÍMEROS: UMA ALTERNATIVA PARA PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**. Revista Geonorte, Edição Especial 5, V.7, N.26, p.61- 77, 2016.

FRANGOPOULOS, et al. **Optimizing the Functional Properties of Starch-Based Biodegradable Films**. Foods, vol 12, 2812, 2023.

FRENT et al. **Sodium Alginate—Natural Microencapsulation Material of Polymeric Microparticles**. International J. Molecular Sciences, 23, 12108, 2022.

GARRETT, D. E. Cloreto de Cálcio. **Manual de Lítio e cloreto de cálcio natural**. Academic Press, p. 237-457, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780122761522500384?via%3Dihub>>. Acesso em: 10 de out. 2023.

GINANI, et al. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA NATUREZA DE RETICULANTES E ADITIVOS ORGÂNICOS SOBRE O COMPORTAMENTO DE GÉIS DE QUITOSANA**. QUÍMICA NOVA, 22(6), 1999.

FARIAS, et al. **Efeito da permeabilidade ao vapor de água, atividade de água, molhabilidade e solubilidade em água em filmes de amido e polpa de acerola**. Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, 2012. Resumos dos trabalhos. Ceará: EMBRAPA, 2012.

HARAGUCH, K. **Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials**. Jan. 2015
Disponível em:
<https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-29648-2_316>. Acesso em: 06. nov. 2023.

HENRIQUE, C. M.; CEREDA, M. P.; SARMENTO, S. B. S. **Características físicas de filmes biodegradáveis produzidos a partir de amidos modificados de mandioca**. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 28(1): 231-240, jan.-mar. 2008.

HESSEL, et al. **Determinação do módulo de Young em sólidos a partir da medida da velocidade do som pelo método do tempo de voo**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, nº 2, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E PESQUISA – INBRAEP. Solubilidade. Disponível em: <https://inbraep.com.br/publicacoes/solubilidade/>. Acesso em: 13 out. 2024.

Irissin-Mangata, J.; Bauduin, G.; Boutevin, B.; Gontard, N. **New plasticizers for wheat gluten films**. European Polymer Journal, 37(8), 1533–1541, 2001.
Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(01\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(01)00039-8)> Acesso em: 20 de out. 2023.

JÚNIOR, A. F. A. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE BIOFILMES À BASE DE ALGINATO DE SÓDIO RETICULADO COM POLIACRILAMIDA CATIÔNICA**. Dissertação de Mestrado (Química), UFMA, São Luís, 2017.

KHAN, S.; KHAN M. **Nanomateriais à base de alginato de sódio para tratamento de águas**

residuais. p. 161-182, 2023. Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128235515000094?via%3Dihub>
 >. Acesso em: 10 de out. 2023.

KIM, K.W.; KO, C. J.; PARK, H. J. **Mechanical Properties, Water Vapor Permeabilities and Solubilities of Highly Carboxymethylated Starch-Based Edible Films.** JOURNAL OF FOOD SCIENCE, Vol. 67, Nr. 1, 2002.

KIM, M.; POMETTO, L. **Food packaging potential of some degradable starch – polyethylene plastics.** Journal of Food Protection, Des Moines, v. 57, n. 11, p. 1007- 1012, 1994.

KROCHTA, J.M.; MULDER-JOHNSTON, C. de. **Edible and biodegradable Polymer films: challenges and opportunities.** Food Technology, v 51, n 2, p. 61-74, 1997.

LEITE, I. S.; SILVA, L. A.; JÚNIOR, W. R. P. **Biofilme de gelatina e glicerol com propriedade antibacteriana.** Latin American Journal of Energy Research, v. 6, n. 2, p. 1 – 11, 2020.

LIMA, A. M. F.; ANDREANI, L.; SOLDI, V. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PLASTIFICANTE E DO PROCESSO DE RETICULAÇÃO NA MORFOLOGIA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FILMES DE ALGINATO DE SÓDIO.** Quim. Nova, Vol. 30, No. 4, 832-837, 2007.

LIMA, *et al.* **Influência da adição de plastificante do processo de reticulação na morfologia, absorção de água e propriedades mecânicas de filmes de alginato de sódio.** Quim. Nova, Vol. 30, No. 4, 832-837, 2007.

LIMA, M. F. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO MESOCARPO DE COCO BABAÇU NA FORMAÇÃO DE BIOFILMES ADITIVADOS COM COMPOSTOS OXIDANTES – CUPUAÇU (*Theobroma grandiflorum*).** Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Química) – UFMA, São Luís, 2019.

LOPES, *et al.* **Characterization of Pectin Biofilms with the Addition of Babassu Mesocarp and Whey Protein Concentrate.** American Journal of Materials Science, 7(3): 64-70, 2017.

LOPES, *et al.* **Elaboration and characterization of biopolymer films with alginate and babassu coconut mesocarp.** Carbohydrate Polymers, v. 234, 115747, 2021.

LOPES, C. A.; LAZARINI, R. G.; MARCONCINI, J. M. **Biocompósitos termoplásticos com fibras vegetais.** Anais da XV Jornada Científica, Embrapa de São Carlos, 2023.

LOZANO, K. P. C. **BIOCOMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS DE ÉSTERES DE AMIDO DO ÁCIDO ESTEÁRICO COM MODIFICAÇÃO DUPLA INCORPORADOS COM CELULOSE MICROFIBRILADA.** Tese de Pós-graduação (Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2022.

LOZAY, *et al.* **Structural and Barrier Properties of Compatibilized PE/PA6 Multinanolayer Films.** Membranes, 11, 75 p. 1-20, 2021.

MACHADO, M. L. Q. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE BIOFILME À BASE DE QUITOSANA E GLICEROL PARA APLICAÇÃO EM EMBALAGENS DE ALIMENTOS.** Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2021.

MANIGLIA, B. C. et al. **Filmes bioativos à base de farinha de mesocarpo de babaçu e amido.** Food Hydrocolloids, vol. 70, p. 383-391, 2017.

MANIGLIA, C.; BLÁCIO-TAPIA, D. R. **Isolamento e caracterização de amido do mesocarpo do coco babaçu.** Food Hydrocolloids, vol. 55, p. 47-55, 2016.

MARTINEZ, J. M. **Avaliação da edição de polióis em biofilmes de amido de diferentes origens botânicas.** Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia dos Materiais) – FATEC, São Paulo, 2020.

MARTINS, A. P. C. **PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIODEGRADÁVEIS PARA APLICAÇÃO EM EMBALAGENS DE ALIMENTOS.** Relatório de estágio (Departamento de Química) – UFSC, Florianópolis, 2010.

McHUGH, T. H.; AVENA-BUSTILLOS, R.; KROCHTA, J. M. **Hydrophilic Edible Films: Modified Procedure for Water Vapor Permeability and Explanation of Thickness Effects.** Journal of Food Science, 58(4), 899–903, 1993.

MELO, R. N. **PRODUÇÃO DE POLIHIDROXIBUTIRATO (P(3HB)) POR *Bacillus megaterium* ATCC 14581 EM BIORREATOR BATELADA ALIMENTADA.** Dissertação de Mes (Engenharia de Alimentos) – URI, Erechim, 2021.

MOGANY, T.; BHOLA, V.; BUX, F. **Algal-based bioplastics: global trends in applied research, technologies, and commercialization.** Environmental Science and Pollution Research, 31:38022–38044, 2024.

MORAES, J. O. **PROPRIEDADES DE FILMES DE AMIDO INCORPORADOS DE NANOARGILAS E FIBRAS DE CELULOSE.** Dissertação de Mestrado (Engenharia de Alimentos) – UFSC, Florianópolis, 2009.

MOREIRA, et al. **Efeito da reticulação do alginato de sódio na produção de rações para pescado.** Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal (v.14, n.3) p. 1 – 11, 2020.

NASCIMENTO, et al. **Obtenção e caracterização de biofilmes de amido nativo de batata doce e glicerol.** Engenharia de Produtos Naturais, cap 26, p. 399-407, 2021.

NETO, et al. **Avaliação das propriedades físicas, químicas e mecânicas de filmes de amido/PVA/argila bentonita modificados com metacrilato de glicidila.** Revista Matéria, v.25, n.3, 2020.

NICHEL, S. **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIODEGRADÁVEIS DE AMIDO DE PINHÃO E BATATA-DOCE.** Monografia (Engenharia Química) – Univates, Lajeado, 2020.

OLIVEIRA, F.S.A. **AMIDO DE MESOCARPO DE *Attalea speciosa* Mart. ex Spreng. (BABAÇU) NA FABRICAÇÃO DE FILMES CICATRIZANTES**. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, Renorbio. Universidade Federal do Maranhão. São Luís, p. 100, 2021.

PACHEKOSKI, W. M.; DALMOLIN, C.; AGNELLI, J. A. M. **Blendas Poliméricas Biodegradáveis de PHB e PLA para Fabricação de Filmes**. *Polímeros*, vol. 24, n. 4, p. 501-507, 2014.

PAIXÃO, et al. **APLICAÇÕES FARMACÊUTICAS E BIOPRODUTOS DO BABAÇU**. *Revista Ciências da Saúde*, v.21, no. 2, 2019.

POLETI, J. P. G. **Efeitos da mistura lidocaína/prilocaína em filmes de alginato de sódio/ácido hialurônico sobre queratinócitos humanos. Estudo in vitro**. Trabalho de Conclusão do Curso (Odontologia) – UNICAMP, Piracicaba, 2019.

PORRO, R. **ENGAJAMENTO DIFERENCIADO NO EXTRATIVISMO DO BABAÇU: UMA ANÁLISE PARA O INÍCIO DOS ANOS 2020**. Anais 59º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural – SOBER, Brasília, 2021.

RAPOSO, A. K. S. et al. **Characterization of Biodegradable Films Produced from Mixtures of Alginate, Starch and Babassu Fibers**. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 29, p.1212-1226, 2021.

RAMOS, R. R. **SORBITOL E BIOQUÍMICA ORAL**. Monografia de Investigação, Mestrado (Medicina Dentária) – FMDUP, Porto, 2014.

REIS, et al. **FILME BIODEGRADÁVEL INCORPORADO COM GLICEROL E ADITIVOS NATURAIS**. Congresso Brasileiro de Prospecção Tecnológica, vol.4, n.4, p.23-32, 2011. Resumo dos trabalhos. Bahia: ProspeCT&I, 2011.

REYES, et al. **Alginato de sodio en el desarrollo de películas comestibles**. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, Vol. 5, 2014.

SAMPAIO, R. M.; MOREIRA, D.; PEREZ, V. H.; MARCOS, S. K.; SILVA, L. R.; BOIZAN, M. A. **Osmo-dehydration and convective drying kinetic of italian tomato**. *Latin American Applied Research*, Bahia Blanca, v. 45, n. 4, p. 255-260, 2015.

SANTANA, A. A.; KIECKBUSCH, T. G. **Influência de plastificantes polióis na confecção e no comportamento de filmes de alginatos de cálcio**. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(4), 835–845, 2013.

SANTOS, et al. **Caracterização e usos de argilas bentonitas e vermiculitas para adsorção de cobre (II) em solução**. *Cerâmica* 48, Natal, 2002.

SANTOS, et al. **BABAÇU: EXPLORANDO SUAS CARACTERÍSTICAS E POTENCIALIDADES**. *Biotecnologia e Farmacologia: Abordagens Interdisciplinares na Terapêutica com Recursos Naturais*, cap 6, p 102, 2023.

SANTOS, L. C. G. S. **Desenvolvimento de biocompósitos à base de amido de mandioca e**

bambu em pó com potencial para a indústria de embalagens. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) – CEFET- MG, Belo Horizonte, 2014.

SANTOS, M. K. **Encapsulação de proteína em cápsulas de alginato, alginato-quitosana e estudos de estabilidade e liberação controlada em função do Ph.** Monografia (Química) – UFABC, Santo André, 2014.

SCHAEFFER, D. **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOPOLÍMEROS A PARTIR DE FÉCULA DE MANDIOCA E AMIDO DE MILHO.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – UNIVATES, Lajeado, 2020.

SHARMA, P. **Opportunity of Non-Wood Forest Products in Biocomposites.** Biocomposites, cap 2, p. 01-32, 2021.

SHIMAZU, A. A.; MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E. **Efeitos plastificante e antiplastificante do glicerol e do sorbitol em filmes biodegradáveis de amido de mandioca.** Semina: Ciências Agrárias, vol. 28, núm. 1, pp. 79-88, 2007.

SILVA, E. M. **Produção e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de pinhão.** Trabalho de diplomação (Engenharia Química) – UFRGS, Porto Alegre, 2011.

SILVA, J. G. M. **ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOPOLÍMEROS DE ALGINATO E MESOCARPO DE COCO BABAÇU CONTENDO *Cúrcuma longa* L.** Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Química), 2022.

SILVA, L. C.; DIAS, I. V. **COMPARAÇÃO VISUAL DE BIOPLÁSTICO DE AMIDO DE MILHO COM E SEM ADIÇÃO DE NANOCELULOSE DA PSEUDOCALULE DE BANANEIRA.** IfesCIÊNCIA, vol 10, nº 1, p. 01-08, 2024.

SILVA, Y. R. O.; LAPA, L. S. S.; SALES, P. F. **Efeitos das variáveis na análise de espessura e solubilidade de filmes biodegradáveis de baixo custo.** Planeta Inovação, IFMG, 2019.

SIQUEIRA, L. V., PAETZOLD, M. G., FARINA, L. O. **Desenvolvimento e caracterização de biofilmes à base de biomassa de banana verde.** Revista Brasileira de Revisão de Saúde, v. 1, pág. 2868–2886, 2021.

STRATVIEW RESEARCH. **Natural fibers market: growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2022-2027).** Disponível em: <<https://www.stratviewresearch.com/2841/natural-fibers-market.html>> Acesso em: 20 nov. 2024.

TANG, X.; ALAVI, S.; HERALD, T. J. **Barrier and Mechanical Properties of Starch-Clay Nanocomposite Films.** Vol. 85, No. 3, 2008.

TEODORO, L. **CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA VERMICULITA EXPANDIDA PARA POSSÍVEL APLICAÇÃO COMO ADSORVENTE.** Trabalho de Conclusão do Curso (Química) - UFTPR, Pato Branco, 2018.

UGARTE, J. F. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Vermiculita.** Cap 28, p. 865-886, 2013.

VAZ, J. M. PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOFILMES ATIVOS À BASE DE ALGINATO DE DIFERENTES ESTRUTURAS POLIMÉRICAS RETICULADOS COM CÁLCIO. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química) – UNICAMP, Campinas, 2012.

VIEGÁS, L. P. PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DE AMIDO COM QUITOSANA PARA APLICAÇÃO EM EMBALAGENS DE ALIMENTOS. Dissertação (Engenharia e Ciência dos Materiais) – UENF, Campos dos Goytacazes, 2016.