

OBTENÇÃO DE UM PLÁSTICO BIODEGRADÁVEL À BASE DE FÉCULA DE ARARUTA (*Maranta arundinacea*) E CASCA DE OVO

Rosanny C. da Silva^{a,*}, Cleyton B. Lopes^b, Fred A. R. Nogueira^a, Leonardo V. da Silva^a, Alessandra F. da Silva^a, Amanda V. S. Oliveira^a, Elisângela O. da Silva^a, Italo G. dos S. Silva^a, Jose C. dos S. Silva^a, Julia E. de C. Silva^a, Julie A. dos S. Quintela^a, Larissy A. da S. Ribeiro^b, Maria C. P. D. da C. Gomes^b, Marilian G. dos S. Bernardo^a e Walleska J. de A. Marques^a

^aInstituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, Campus-Maceió, 57020-600 Maceió – AL, Brasil

^bInstituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, 57120-000 Satuba – AL, Brasil

Recebido: 09/10/2024; aceito: 30/05/2025; publicado online: 26/06/2025

OBTAINING A BIODEGRADABLE PLASTIC BASED ON ARROWROOT STARCH (*Maranta arundinacea*) AND EGGSHELL. The development of sustainable packaging based on biodegradable polymers has gained prominence, driving the use of renewable raw materials for the production of eco-friendly plastics. Among the promising biopolymers, starches from various botanical sources stand out due to their wide availability, low cost, and environmentally favorable degradation. In this study, a biodegradable plastic was produced from arrowroot starch (*Maranta arundinacea*), reinforced with calcium carbonate extracted from eggshells. The samples were characterized by thermal analysis (TGA/DTG and DSC), infrared spectroscopy (FTIR), and scanning electron microscopy (SEM). Additionally, a food preservation test was conducted using a single apple sliced into three equal parts, which were subjected to the following conditions: no coating (control), coated with arrowroot film, and coated with arrowroot film containing CaCO₃. The samples were stored at room temperature (~25 °C) under controlled relative humidity and were visually assessed after 24 and 48 h for browning and signs of degradation. The results indicated that the film with added CaCO₃ reduced oxidation and extended the shelf life of the food. The resulting hybrid material demonstrated promising properties for use in ready-to-eat food packaging.

Keywords: sustainability; packaging; biodegradable polymers; calcium carbonate; arrowroot.

INTRODUÇÃO

As embalagens plásticas descartáveis são amplamente utilizadas na indústria alimentícia por preservarem alimentos perecíveis por um maior período de tempo, diminuindo o desperdício causado pela deterioração bacteriana, oxidação ou eventuais choques mecânicos durante o transporte da mercadoria.¹ No entanto, o uso extensivo de produtos plásticos pela indústria alimentícia e seu descarte inadequado no meio ambiente têm exacerbado os problemas ecológicos, causando danos ao meio ambiente e, consequentemente, à saúde humana.² Uma alternativa promissora para resolver os desafios relacionados ao acúmulo de plástico tem sido o uso de bioplásticos ecologicamente amigáveis e naturalmente degradáveis,³⁻⁵ principalmente para o desenvolvimento de novos materiais para a conservação de alimentos *in natura*, como frutas e sementes.^{6,7}

Apesar de toda demanda atual por plásticos biodegradáveis, nos últimos anos a produção e o uso de materiais plásticos (polímeros convencionais) para fabricação de embalagens vem crescendo aceleradamente, principalmente devido à segurança e conveniência de sua utilização, aliado ao baixo custo de produção e às suas boas qualidades estéticas. Entretanto, esse aumento significativo causa um impacto enorme em relação à quantidade de material descartado no meio ambiente, pois geralmente estas embalagens plásticas são produzidas a partir de poliolefinas (polietileno, polipropileno etc.) resultando em resíduos não degradáveis.^{8,9}

Uma forma de mitigar os impactos causados pelos subprodutos do petróleo é investir na produção de embalagens plásticas utilizando biopolímeros como matéria-prima. Ao contrário dos plásticos convencionais, os biopolímeros degradam-se facilmente na natureza e derivam de fontes renováveis.^{10,11}

Assim, a substituição de materiais oriundos exclusivamente de derivados de petróleo é uma tendência mundial em resposta à grande interferência humana na natureza. Esse movimento incentiva pesquisas nacionais e internacionais no sentido de incrementar e/ou desenvolver materiais biodegradáveis com características que permitam sua utilização de forma sustentável.⁹

Os plásticos biodegradáveis podem ser uma alternativa interessante para aplicações onde a biodegradabilidade e/ou a utilização de recursos naturais possam agregar valor ao produto final, particularmente, onde materiais plásticos baseados em derivados de petróleo são usados para aplicações com um tempo de vida curto. Desta forma, percebe-se que há uma grande necessidade de materiais poliméricos ambientalmente corretos, que não envolvam a utilização de materiais tóxicos ou nocivos na sua fabricação e que possam se degradar no meio ambiente (conforme a Figura 1), reduzindo os danos ambientais causados pelas tecnologias atuais. Por estas razões, o desenvolvimento de materiais biodegradáveis com propriedades diferenciadas tem se tornado um grande desafio para pesquisadores e engenheiros na área de desenvolvimento de novos materiais.¹²

Diversas matrizes renováveis de biopolímeros estão atualmente sendo estudadas para a produção de plásticos biodegradáveis, incluindo quitosana,¹³ celulose¹⁴ e uma fonte bastante promissora, o amido ou fécula. A diferença entre amido e fécula está relacionada apenas à sua origem: o amido pode ser obtido de diversas fontes vegetais, como cereais, enquanto as féculas são extraídas de raízes e tubérculos.

Tanto os amidos quanto as féculas são polissacarídeos de reserva dos vegetais, armazenados sob a forma de grânulos que apresentam um certo grau de organização molecular. Essa organização confere a esses materiais um caráter parcialmente cristalino ou semicristalino, com grau de cristalinidade variando de 20 a 45%.^{9,15}

Dentre as diversas fontes de amido, o milho se destaca em escala global, com produção anual estimada em mais de um bilhão

*e-mail: rosanny.silva@ifal.edu.br

Editor Associado responsável pelo artigo: Cassiana C. Montagner

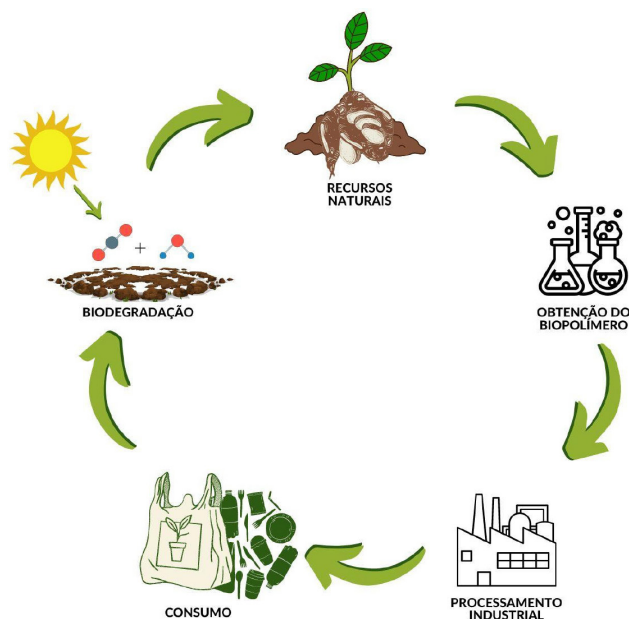


Figura 1. Ciclo de vida ideal do plástico biodegradável

de toneladas. Sua abundância favorece o amplo uso na indústria alimentícia. Contudo, o aproveitamento do amido de milho para a fabricação de bioplásticos em larga escala pode gerar riscos de escassez e impacto socioeconômico. Por esse motivo, há um crescente interesse na busca por fontes alternativas de amido, mais sustentáveis e com menor competição com a cadeia alimentar.¹⁶

Nesse contexto, a raiz de araruta (*Maranta arundinacea*), originária da América do Sul,¹⁷ surge como uma opção viável devido ao seu baixo custo, menor impacto econômico e à composição rica em polissacarídeos, como amilose e amilopectina, que conferem propriedades estruturais favoráveis à fabricação de filmes biodegradáveis. A proporção entre amilose e amilopectina no amido influencia as propriedades dos filmes produzidos a partir desse biopolímero. Filmes com maior teor de amilose tendem a exibir maior rigidez, menor elasticidade, reduzida permeabilidade ao oxigênio, maior capacidade de retenção de água e propriedades de barreira mais eficientes. Essas características podem ser atribuídas à estrutura linear e compacta da amilose, que em contraste com a amilopectina altamente ramificada, favorece a formação de regiões cristalinas durante o processo de secagem do filme.^{18,19} Além do potencial para reduzir a dependência de polímeros sintéticos, a utilização da araruta na produção de bioplásticos pode estimular seu cultivo, promovendo a diversificação agrícola e impulsionando a economia do setor. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária,²⁰ essa cultura representa uma alternativa promissora para pequenos e médios produtores, especialmente quando integrada a sistemas de cultivo consorciado, como com o milho, permitindo o uso mais eficiente do solo e contribuindo para a sustentabilidade da produção agrícola.

As féculas possuem características únicas atribuídas à sua estrutura em pequenos conglomerados individuais conhecidos como grânulos, compostos pelas macromoléculas de amilose e amilopectina (Figura 2), configuradas de maneira alternada.

Os grânulos de fécula, pouco solúveis em água à temperatura ambiente, absorvem água e incham irreversivelmente quando aquecidos e agitados. Esse processo, conhecido como gelatinização, ocorre com a dispersão das moléculas de amilose e amilopectina, rompendo as estruturas cristalinas dos grânulos e formando um gel cuja viscosidade depende do tempo e da quantidade de água. Na etapa de resfriamento, ocorre a retrogradação, onde as moléculas se

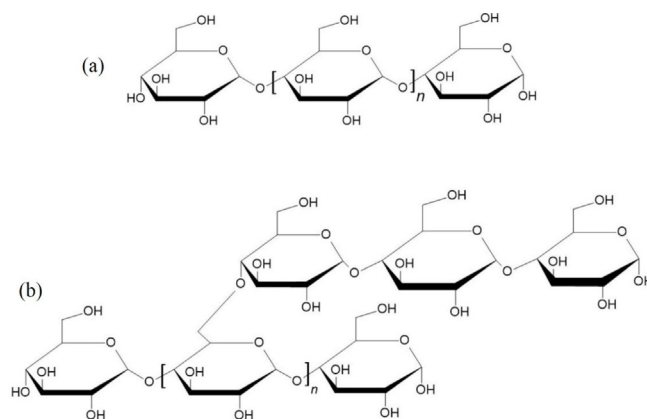


Figura 2. Estrutura química da amilose (a) e da amilopectina (b) (adaptado de Mali et al.)⁹

reaproximam. A amilose linear favorece a formação de estruturas cristalinas, enquanto a amilopectina ramificada forma regiões amorfas. Este processo também resulta na expulsão de água do gel, reduzindo seu volume.^{21,22}

A araruta, uma planta herbácea com rizomas que crescem horizontalmente sob o solo, é conhecida por conter aproximadamente 20% de fécula em seus rizomas, dos quais 20 a 30% são compostos por amilose.²³ Este alto teor de amilose torna a araruta promissora para o desenvolvimento de embalagens resistentes.²⁴

Entretanto, os filmes feitos apenas com fécula de araruta e água apresentam limitações mecânicas e de alongamento, necessitando da adição de reforços à matriz polimérica (compósitos) para melhorar sua qualidade e torná-los adequados para embalagens e outros usos. Isso confere potencial tecnológico significativo na produção de biofilmes poliméricos, tais como a melhoria das propriedades mecânicas, aumentando a resistência à tração e a flexibilidade; maior barreira contra umidade e gases, prolongando a vida útil dos alimentos embalados; biodegradabilidade aprimorada, garantindo uma degradação ambientalmente favorável; compatibilidade com aditivos funcionais, possibilitando a incorporação de compostos antimicrobianos e antioxidantes; viabilidade para impressão e personalização, permitindo adaptação a diferentes processos industriais; e aplicações diversas, incluindo revestimentos comestíveis, filmes agrícolas e produtos descartáveis sustentáveis.²⁵

Os compósitos são materiais altamente eficientes para aplicação em diversas áreas. Eles são produzidos a partir de dois ou mais materiais com propriedades distintas, cuja combinação resulta em um material de desempenho superior. Esse material multifásico normalmente é formado por duas fases: o reforço (fase dispersa), que fornece a resistência ao esforço, e a matriz (fase contínua), que é o meio de transferência desse esforço. Com relação a matriz, podem ser classificadas em poliméricas, cerâmicas ou metálicas.²⁶

Em comparação com os polímeros puros, esses materiais apresentam propriedades de barreira aprimoradas, aumento do módulo de elasticidade, maior resistência à tração e corrosão, retardância à chama, entre outros benefícios.²⁷ Os nanocompósitos poliméricos são obtidos pela incorporação em pequena escala de um material não polimérico na sua matriz. Para isto é essencial que pelo menos uma das três dimensões desse material esteja em escala nanométrica, como nanopartículas de sílica, dióxido de titânio, carbonato de cálcio, nanofibras, nanotubos de carbono, entre outros.^{28,29}

O carbonato de cálcio (CaCO_3) tem sido alvo de vários estudos devido às suas características principais, como opacidade, alta dureza e baixo custo.³⁰ Esse composto está presente em uma variedade de materiais naturais, como calcário, mármore, conchas, corais e até mesmo em cascas de ovos de galinha.³¹

Com o aumento do consumo de ovos nas últimas décadas, impulsionado pelo seu alto valor nutricional e baixo custo, as cascas frequentemente são desvalorizadas e destinadas aos aterros sanitários. No entanto, considerando que as cascas de ovos contêm cerca de 96 a 99% de carbonato de cálcio, há um interesse crescente na recuperação desse composto a partir desses resíduos.²⁶

A possibilidade de preparação de materiais compósitos contendo polissacarídeos (amilose e amilopectina) oriundos da araruta e carbonato de cálcio, presente na casca do ovo, pode conferir aos plásticos biodegradáveis propriedades mecânicas, térmicas e de barreira otimizadas. Neste contexto, o objetivo deste estudo é desenvolver e caracterizar um plástico biodegradável à base de amido de araruta e carbonato de cálcio, visando aprimorar suas propriedades para aplicação em embalagens sustentáveis. O plástico biodegradável desenvolvido neste trabalho abre uma alternativa de gerenciamento, em que a compostagem ocupa o papel principal. A degradabilidade deste material, após o uso, permite que ele permaneça no ciclo natural do carbono, sem afetar o meio ambiente após seu descarte.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiais

Fécula de araruta, cultivada e cedida pelo Instituto Federal Baiano campus Santa Inês, cascas de ovos de galinha, cedidas pelo refeitório do Instituto Federal de Alagoas campus Satuba e glicerina bidestilada ($C_3H_8O_3$) da marca Synth.

Obtenção do carbonato de cálcio a partir da casca do ovo de galinha

A metodologia desenvolvida para a obtenção do carbonato de cálcio foi adaptada de Moreira.²⁶ Inicialmente, as cascas foram lavadas em água corrente, colocadas em um béquer contendo água destilada e levadas ao agitador magnético para potencializar a limpeza. Em seguida, o béquer foi transferido para uma estufa a 150 °C, com o intuito de degradar toda a matéria orgânica presente. Posteriormente, as cascas foram trituradas em um almofariz, com o auxílio de um pistilo. O pó resultante foi então passado por uma peneira de análise granulométrica de 5" x 2", com abertura de malha de 53 µm, 270 ASTM.²⁶

Obtenção dos filmes poliméricos biodegradáveis

Nesta pesquisa, foram produzidos um total de 45 filmes poliméricos, distribuídos da seguinte forma: 14 filmes contendo apenas fécula de araruta e glicerol (controle), 26 filmes com adição de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) como reforço mecânico, e 5 géis de araruta sem glicerol nem aditivos, utilizados como controle comparativo.

O gel-base de araruta foi preparado com base no método descrito por Nascimento,¹⁶ por meio da dispersão de 1 g de fécula de araruta (*Maranta arundinacea*), 1 mL de glicerina (plastificante) e 20 mL de água destilada. A mistura foi aquecida em banho-maria a aproximadamente 80 °C sob agitação manual contínua até a formação de um gel homogêneo. Em seguida, o gel foi vertido por *casting* em placas de Petri com 9 cm de diâmetro, sendo então levado à estufa a 70 °C até a secagem completa. Os filmes obtidos foram posteriormente armazenados em dessecador a vácuo, com o objetivo de evitar a absorção de umidade e garantir estabilidade das amostras.

Para a formulação dos filmes com carga inorgânica, foi utilizado carbonato de cálcio obtido a partir de cascas de ovos secas e trituradas,

na proporção de 1,0, 2,5 e 5,0% (m/m) em relação à fécula de araruta. O $CaCO_3$ foi inicialmente disperso em água destilada sob agitação magnética constante por um período de 24 h. Posteriormente, foram adicionados os demais componentes (fécula de araruta e glicerina), seguindo-se o mesmo procedimento de aquecimento, gelificação e secagem adotado na produção dos filmes puros.

Dentre os 26 filmes elaborados com adição de $CaCO_3$, verificou-se que a formulação com 5,0% do reforço apresentou desempenho superior em termos de características visuais, coesão e integridade do filme, sendo, portanto, selecionada para as análises posteriores.

Caracterizações

Para o carbonato de cálcio obtido a partir da casca do ovo, foram realizadas análises de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e análise termogravimétrica (TGA) para a confirmação dos grupos funcionais presentes e do comportamento térmico. Os filmes poliméricos obtidos foram submetidos a análises térmicas de FTIR, TGA e calorimetria diferencial exploratória (DSC).

Os espectros de FTIR foram obtidos a partir de um espectrômetro IR AFFINITY-1 (Shimadzu), registrados na faixa de 4.000 a 600 cm^{-1} , utilizando uma resolução de 4 cm^{-1} e 64 varreduras. As análises térmicas de TGA e DSC foram realizadas no equipamento TGA-51 (Shimadzu) sob atmosfera de gás nitrogênio, com fluxo de 20 $mL\ min^{-1}$ e razão de aquecimento de 10 °C min^{-1} , em um intervalo de temperatura entre 0 e 600 °C. As análises morfológicas foram conduzidas no microscópio eletrônico TESCAN Vega3, com feixe de elétrons operando a 5,0 kV e ampliação de 20, 50, 100 e 200 µm.

Teste de conservação de alimentos

Para avaliar a capacidade dos filmes em retardar a degradação oxidativa de alimentos, utilizou-se a maçã como modelo experimental. Uma maçã fresca foi cortada em três partes iguais e submetida às seguintes condições experimentais:

- Controle: amostra sem qualquer revestimento (Figura 3a).
- Filme de araruta: amostra revestida com filme biodegradável contendo apenas fécula de araruta (Figura 3b).
- Filme de araruta com $CaCO_3$: amostra revestida com filme biodegradável contendo amido de araruta e carbonato de cálcio (Figura 3c).

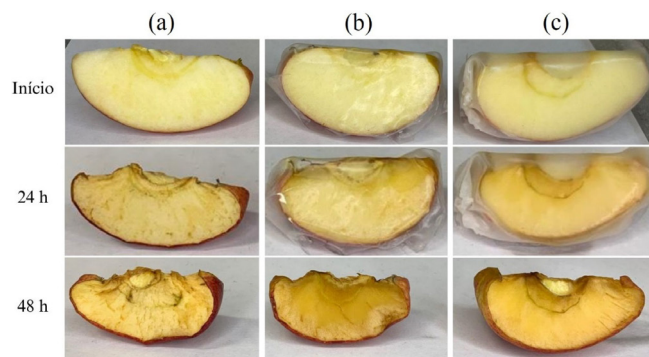


Figura 3. Estudo comparativo de conservação de uma maçã. (a) Sem revestimento; (b) revestida com filme de araruta; (c) revestida com filme de araruta com $CaCO_3$.

As amostras foram mantidas em temperatura ambiente (ca. 25 °C) e umidade relativa controlada. A aparência visual das maçãs foi registrada logo após a aplicação dos filmes, bem como após 24 e 48 h, para avaliar a eficiência das embalagens em retardar o escurecimento e a degradação oxidativa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

FTIR do carbonato de cálcio (CaCO_3)

A técnica de FTIR é utilizada para identificar substâncias químicas e determinar a estrutura molecular de uma amostra, reconhecendo os grupos funcionais e tipos de ligações químicas presentes.³² No presente trabalho, a espectroscopia de infravermelho foi empregada para confirmar a identidade da amostra de CaCO_3 obtida a partir das cascas de ovos de galinha, fornecendo informações estruturais sobre as bandas dos agrupamentos do material em análise. As bandas localizadas na região do comprimento de onda indicaram o tipo de ligação presente na estrutura, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Atribuições prováveis para a amostra de carbonato de cálcio obtida a partir da casca de ovo de galinha

Atribuições	Literatura / cm^{-1}	Amostra / cm^{-1}
δ_d (OCO)	712 ^{31,33}	711
γ (CO_3)	873 ^{31,33}	873
ν_{as} (CO)	1400 ³¹ e 1420 ³³	1415

O FTIR da amostra de CaCO_3 está ilustrado na Figura 4. Podem ser observadas três atribuições vibracionais do CaCO_3 referentes à fração calcita: deformação angular no plano δ_d (OCO) em 711 cm^{-1} ; deformações angulares fora do plano γ (CO_3) em 873 cm^{-1} e estiramento antissimétrico ν_{as} (CO) em 1415 cm^{-1} .

Os espectros de FTIR também tiveram o objetivo de auxiliar a identificar possíveis interações entre os constituintes do material, em especial o CaCO_3 (reforço) e a fécula de araruta (matriz polimérica). A análise comparativa foi realizada entre três amostras: CaCO_3 , filme de araruta e filme de araruta com adição de CaCO_3 . Os espectros obtidos são apresentados na Figura 4.

Os resultados revelaram algumas variações e deslocamentos discretos. A banda atribuída ao estiramento axial das ligações O–H, presente na região de 3300 cm^{-1} no filme de araruta sem CaCO_3 , deslocou-se para 3302 cm^{-1} com a adição do CaCO_3 , indicando uma possível interação física entre os grupos hidroxilas do amido e o enchimento. Além disso, a banda associada ao grupo C–H apresentou uma leve variação, passando de 2935 cm^{-1} no filme sem CaCO_3 para 2933 cm^{-1} na formulação com CaCO_3 . Para o grupo C–O, também se observou um deslocamento de 1028 cm^{-1} para 1024 cm^{-1} , respectivamente. Essas variações podem indicar alterações no ambiente químico local dessas ligações.³⁴

A comparação dos espectros FTIR demonstrou que os filmes à base de fécula de araruta e CaCO_3 apresentam bandas características similares às de suas matérias-primas, sem surgimento de novos grupos

funcionais. Esse comportamento sugere que as interações entre a fécula de araruta e o CaCO_3 são predominantemente físicas, não envolvendo reações químicas que levem à formação de novas ligações covalentes. A ausência de bandas adicionais ou deslocamentos significativos reforça a hipótese de compatibilização física entre os constituintes, sendo o CaCO_3 incorporado ao sistema sem modificar quimicamente a estrutura da matriz polimérica.

Estabilidade térmica

A estabilidade térmica de um material pode ser aferida mediante análises TGA e DTG, nas quais a massa da amostra em uma atmosfera controlada é registrada continuamente como uma função do tempo, à medida que a temperatura aumenta. Isso permite estudar em detalhes as alterações que o aquecimento pode provocar nas substâncias.³³ Os termogramas apresentados nas Figuras 5a e 5b mostram o comportamento térmico do carbonato de cálcio obtido, assim como dos filmes biodegradáveis à base de araruta, com e sem carbonato de cálcio.

O termograma presente na Figura 5a mostra que o CaCO_3 até 500°C demonstrou um comportamento linear no decorrer de toda a análise, apresentando uma perda de massa de aproximadamente 0,5%. A curva de DTG na Figura 5b confirma esse comportamento. Esta baixa perda de massa encontrada pode estar associada a total remoção da membrana aderida à casca de ovo, por ela ser constituída de carboidratos e proteínas, ou seja, rica em matéria orgânica.

As curvas TGA e DTG das amostras de filmes de araruta, com e sem CaCO_3 , revelaram a existência de três eventos térmicos, correspondentes à eliminação da água, decomposição do glicerol e decomposição do amido, respectivamente (Tabela 2).³⁵ Em geral, verificou-se que os componentes do filme não interferem no mecanismo de degradação térmica dos componentes puros. O primeiro evento ocorreu entre 65 e 75°C , com uma perda média de massa de 13 e 6%, respectivamente, representando a evaporação da água presente na matriz do filme. O segundo evento, entre 200 e 205°C , correspondeu à decomposição do glicerol, com uma perda média de massa de 38 e 32%. O terceiro evento, ocorrido entre 340 e 345°C , foi atribuído à degradação da molécula de amido.

Com isso, foi possível observar o efeito do CaCO_3 no filme de araruta, proporcionando maior estabilidade térmica e melhor conservação da quantidade de plastificante na matriz polimérica.

Em um termograma de DSC, picos exotérmicos e endotérmicos caracterizam transições ou reações que tenham ocorrido durante a análise, como transição vítrea (T_g), gelatinização, fusão (T_f), oxidação e decomposição, entre outras.³⁶ A Figura 6 ilustra o gráfico com as curvas de DSC para os filmes de araruta com e sem CaCO_3 , onde foi possível observar apenas um evento endotérmico para as

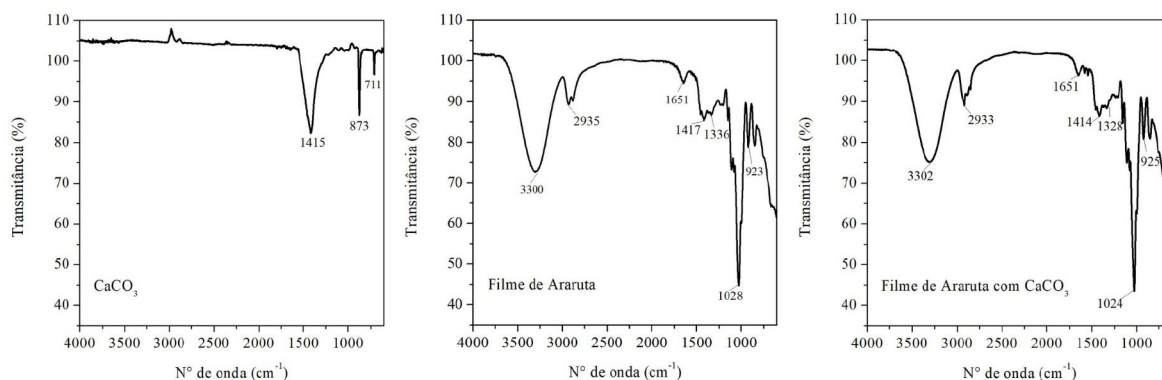


Figura 4. Espectro de FTIR das amostras de carbonato de cálcio obtidas a partir da casca do ovo de galinha e dos filmes biopoliméricos de araruta sem e com CaCO_3

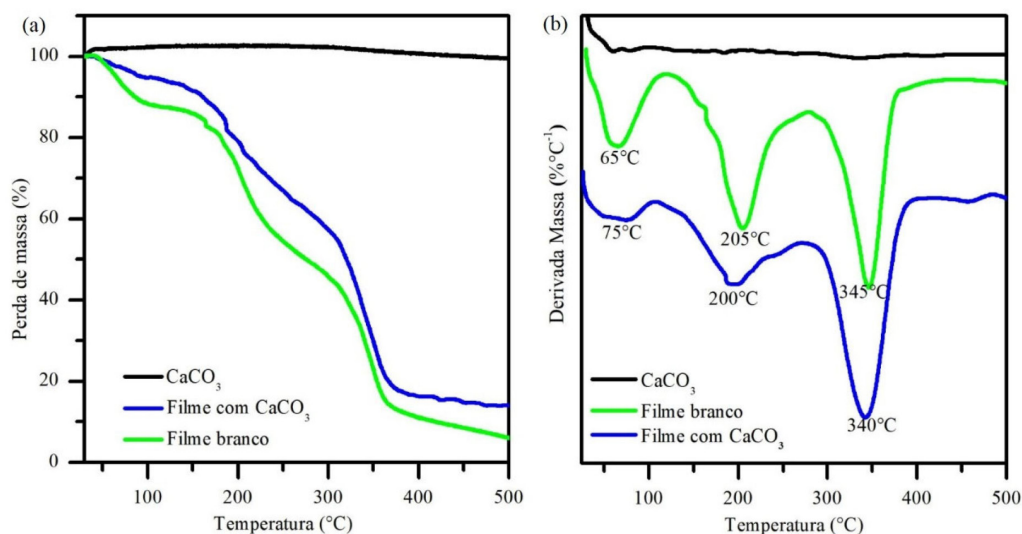


Figura 5. (a) Termogramas e (b) derivadas de massa do CaCO_3 e dos filmes de araruta com e sem CaCO_3

Tabela 2. Dados extraídos das análises térmicas presentes nas Figuras 5a e 5b

Amostra	Perda de massa		
	Evento 1	Evento 2	Evento 3
CaCO_3	—	—	—
Filme branco	65 °C 13%	205 °C 38%	345 °C 29%
Filme com CaCO_3	75 °C 6%	200 °C 32%	340 °C 46%

duas amostras em 90 e 112 °C, respectivamente. Não foi possível observar a T_g dos filmes formulados (que é caracterizado por um desvio na linha de base no sentido exotérmico). Alguns trabalhos na literatura³⁷ apresentam a T_g de filmes à base de amido em regiões de temperatura negativa, faixa de temperatura que não pode ser obtida no equipamento de DSC utilizado para a análise nesse trabalho.

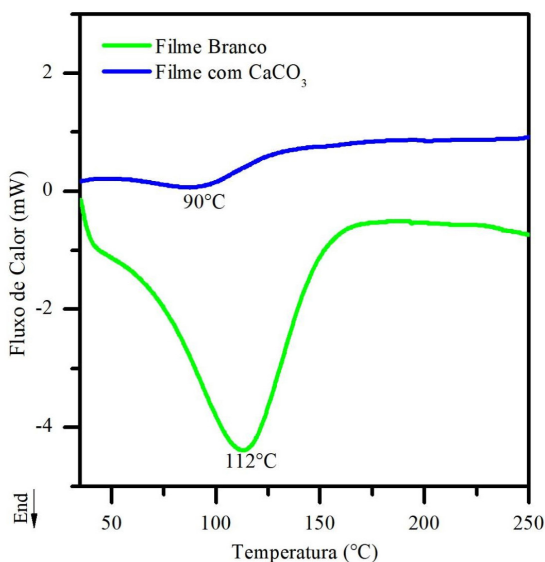


Figura 6. Gráficos de DSC dos filmes de araruta puro e de araruta com CaCO_3

Baixos valores de T_g sugerem uma estabilidade relativamente baixa do material, por causa da alta mobilidade molecular dos seus componentes. Por outro lado, também mostra uma boa flexibilidade do filme em temperaturas de refrigeração e/ou congelamento, o que

pode ser uma vantagem quando se considera o potencial de aplicação como material de embalagem de alimentos.³⁸

O pico endotérmico presente nas duas amostras é referente a T_f , onde é possível observar um leve deslocamento para valores menor quando adicionado o CaCO_3 , ao mesmo tempo que ocorre a diminuição da intensidade do pico, implicando em menos energia necessária para esta transição de fase, devido a menor proporção de fase cristalina no composto e consequentemente maior fase amorfa,³⁹ o que pode contribuir para uma maior permeabilidade de gases.⁴⁰

Análise morfológica dos filmes

As características da estrutura morfológica de biofilmes poliméricos são fatores que podem e devem ser estudados na confecção desse tipo de material. Uma das maneiras viáveis de realizar essa análise é o uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV), que, por meio de um feixe focalizado de elétrons, permite a visualização de uma imagem ampliada em até 300.000 vezes da superfície de uma amostra de bioplástico.^{41,42}

A análise morfológica dos filmes revelou características superficiais semelhantes entre as amostras, destacando-se a presença de rachaduras e grânulos de fécula parcialmente ou não gelatinizados (Figura 7). As rachaduras visíveis podem ter origem no manuseio dos filmes durante as etapas anteriores à caracterização, além de possivelmente estarem associadas à liberação de bolhas de ar durante o processo de secagem. Observou-se, ainda, uma incidência mais acentuada dessas rachaduras no filme contendo carbonato de cálcio (CaCO_3), o que pode estar relacionado aos resultados do ensaio de DSC (Figura 6), em que a maior presença de defeitos estruturais está associada a uma fase amorfa predominante.

Por outro lado, as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicam que os filmes contendo CaCO_3 apresentaram uma menor quantidade de grânulos de fécula visíveis, sugerindo que a adição do carbonato contribuiu para uma maior solubilidade e dispersão dos grânulos na matriz polimérica. Esse comportamento pode favorecer uma melhor integração do amido à estrutura do filme, apesar da presença de discontinuidades.

Aparência dos filmes e teste de conservação de alimentos

Análises visuais e táteis foram realizadas para selecionar os filmes mais homogêneos e flexíveis para manuseio. Filmes que não exibiam tais características foram rejeitados.

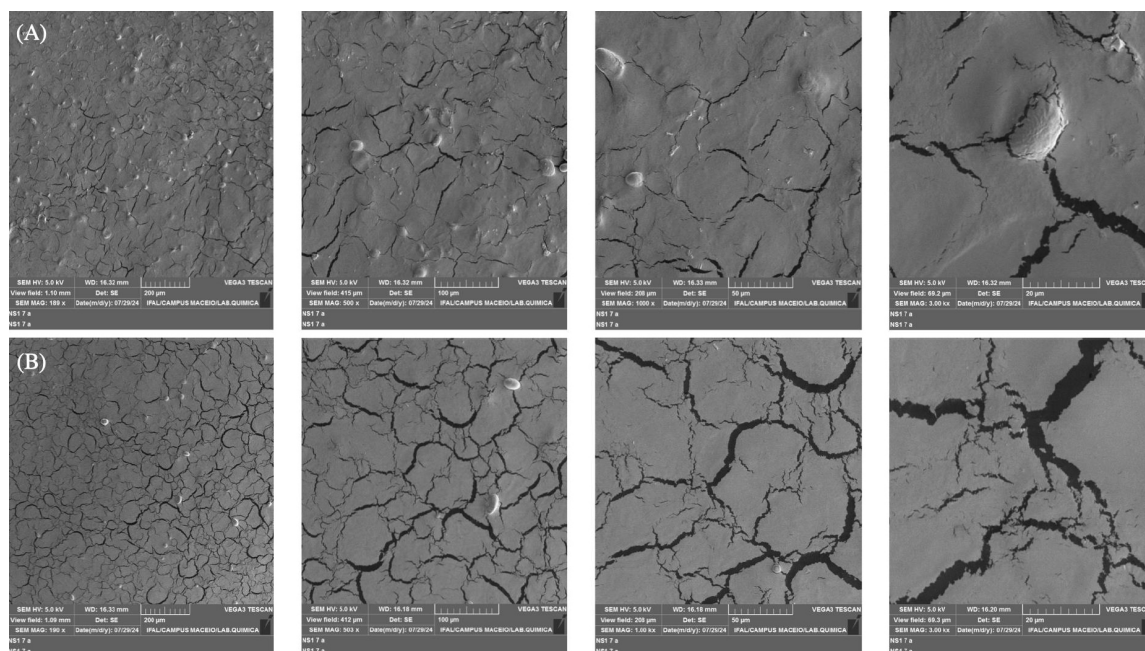


Figura 7. Microscopia eletrônica de varredura dos filmes de fécula de araruta (A) sem CaCO_3 e (B) com CaCO_3 . Ambos com ampliação de 20, 50, 100 e 200 μm

Os filmes obtidos mostraram homogeneidade, sem a presença de partículas insolúveis ou bolhas de ar, e nenhuma ruptura após a secagem. Diferentemente dos filmes feitos apenas com araruta (Figura 8A), o filme com CaCO_3 (Figura 8B) apresentou uma leve opacidade. No entanto, exibiu melhor flexibilidade e manuseio, sendo facilmente removido das placas. Além disso, a superfície em contato com a placa era relativamente mais suave, com maior brilho e melhor aderência.

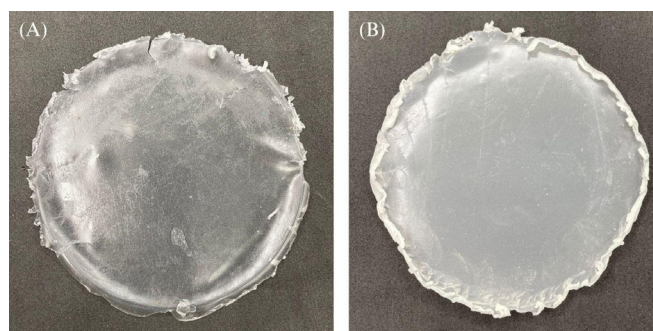


Figura 8. Aparência dos filmes plásticos biodegradáveis obtidos a partir de araruta (A) e araruta com CaCO_3 (B)

Após a obtenção dos filmes poliméricos, foi realizado um teste para avaliar a capacidade de conservação de alimentos. O teste consistiu em utilizar uma maçã, cortada em três partes, e comparar o envelhecimento nas seguintes condições: sem nenhum revestimento (Figura 3a), revestida com filme plástico de araruta (Figura 3b) e revestida com filme plástico de araruta com CaCO_3 (Figura 3c). Observamos a aparência inicial e comparamos após 24 e 48 h.

Pode-se dizer que o filme com adição de CaCO_3 em condições ambientes apresentou melhor desempenho quanto à permeação a gases e ao vapor d'água, quando comparado com o filme contendo apenas araruta, possibilitando, desta maneira, prolongar a vida de prateleira de alimentos suscetíveis à degradação por O_2 (oxidação).

CONCLUSÕES

A caracterização estrutural, química e térmica do carbonato de

cálcio (CaCO_3) obtido demonstrou que as cascas de ovos de galinha representam uma fonte alternativa promissora para a produção desse material. Proveniente de um precursor sustentável e com excelente custo-benefício, o CaCO_3 extraído mostrou-se viável para aplicação em matrizes biopoliméricas. Os biofilmes desenvolvidos com esse aditivo, aliados aos resultados de suas respectivas caracterizações, revelaram que o carbonato de cálcio apresenta boa compatibilidade com o gel de araruta e com o plastificante utilizado, contribuindo significativamente para o reforço das propriedades térmicas, calorimétricas e de barreira do composto biopolimérico. Esses efeitos, por sua vez, indicam um potencial aumento na vida útil de alimentos embalados com esse material, em comparação ao filme sem adição de CaCO_3 .

A análise por espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) ofereceu evidências importantes sobre o tipo de interação entre os constituintes da matriz. Os espectros obtidos sugerem que as interações entre a fécula de araruta e o CaCO_3 são predominantemente físicas, sem indícios de reações químicas que resultem na formação de novas ligações covalentes. A ausência de bandas adicionais ou de deslocamentos significativos nos espectros reforça essa hipótese, indicando que o CaCO_3 é incorporado ao sistema polimérico de forma compatível, porém sem modificar quimicamente sua estrutura. Essa compatibilização física é vantajosa, pois preserva as características fundamentais da matriz, ao mesmo tempo em que contribui para o aprimoramento de suas propriedades.

Além disso, a análise termogravimétrica (TGA), juntamente com sua derivada (DTG), permitiu avaliar os impactos da incorporação do CaCO_3 na estabilidade térmica dos filmes à base de araruta. Os resultados evidenciaram uma melhora na resistência térmica dos filmes com a adição do carbonato, aspecto fundamental para o uso em embalagens alimentícias. Especificamente, observou-se uma menor perda de massa nas faixas de temperatura associadas à evaporação da água e à decomposição do glicerol, em relação aos filmes controle, sugerindo que o CaCO_3 favorece a retenção do plastificante na matriz e reduz sua volatilização. Essa retenção resulta em maior estabilidade estrutural do material sob aquecimento.

Adicionalmente, o terceiro evento térmico – relacionado à degradação do amido entre 340 e 345 $^{\circ}\text{C}$ – apresentou uma leve antecipação ou atenuação nos filmes com CaCO_3 . Esse comportamento pode estar associado às interações físicas mencionadas, que

contribuem para a coesão da matriz sem comprometer sua estrutura original.⁸ Tais resultados são especialmente relevantes para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis, pois reforçam a ideia de que a formulação contendo CaCO₃ não apenas aprimora a estabilidade térmica, mas também prolonga a durabilidade e o desempenho do material em diferentes condições ambientais.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS

Todos os dados estão disponíveis no texto.

AGRADECIMENTOS

Este estudo teve apoio da FAPEAL (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas), Programa de Iniciação Científica Júnior (PIBIC Jr.) – Chamada pública FAPEAL No. 01/2023; SECTI Alagoas (Secretaria de Estado da Ciência, da Tecnologia e da Inovação de Alagoas); IFAL (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas); LEQFor (Laboratório de Eletroquímica e Química Forense).

CONTRIBUIÇÕES DO AUTOR

Conceituação: Rosanny C. da Silva; Alessandra F. da Silva; Amanda V. S. Oliveira; Elisângela O. da Silva; Italo G. dos S. Silva; Julia E. de C. Silva; curadoria de dados: Rosanny C. da Silva; Jose C. dos S. Silva; Julie A. dos S. Quintela; Larissy A. da S. Ribeiro; Maria C. P. D. da C. Gomes; Marilian G. dos S. Bernardo; análise formal: Rosanny C. da Silva; Italo G. dos S. Silva; aquisição de financiamento: Rosanny C. da Silva; investigação: Rosanny C. da Silva; Italo G. dos S. Silva; Walleska J. de A. Marques; administração de projetos: Rosanny C. da Silva; Cleyton B. Lopes; Fred A. R. Nogueira; Leonardo V. da Silva; recursos: Rosanny C. da Silva; validação: Rosanny C. da Silva; redação de rascunho original: Rosanny C. da Silva; Walleska J. de A. Marques; redação-revisão: Rosanny C. da Silva; Walleska J. de A. Marques.

REFERÊNCIAS

1. Shaikh, S.; Yaqoob, M.; Aggarwal, P.; *Curr. Res. Food Sci.* **2021**, *4*, 503. [Crossref]
2. Vicentino, S. L.; Floriano, P. A.; Dragunski, D. C.; Caetano, J.; *Quim. Nova* **2011**, *34*, 1309. [Crossref]
3. Hadimani, S.; Supriya, D.; Roopa, K.; Soujanya, S. K.; Rakshata, V.; Netravati, A.; Akshayakumar, V.; De Britto, S.; Jogaiah, S.; *Int. J. Biol. Macromol.* **2023**, *237*, 124076. [Crossref]
4. Dino, A. A.; Kishore, G.; Rokhum, S. L.; Baskar, G.; *J. Environ. Chem. Eng.* **2025**, *13*, 116108. [Crossref]
5. Poulse, S.; Jönkkäri, I.; Hedenqvist, M. S.; Kuusipalo, J.; *RSC Adv.* **2021**, *11*, 12543. [Crossref]
6. Agustiany, E. A.; Nawawi, D. S.; Di Martino, A.; Sari, F. P.; Fatriasari, W.; *Biocatal. Agric. Biotechnol.* **2024**, *62*, 103435. [Crossref]
7. Du, Y.; Shi, B.; Luan, X.; Wang, Y.; Song, H.; *Ind. Crops Prod.* **2023**, *205*, 117543. [Crossref]
8. Ray, S. S.; Bousmina, M.; *Prog. Mater. Sci.* **2005**, *50*, 962. [Crossref]
9. Mali, S.; Grossmann, M. V. E.; Yamashita, F.; *Semina: Cienc. Agrar.* **2010**, *31*, 137. [Crossref]
10. Lahimer, M. C.; Ayed, N.; Horriche, J.; Belgaid, S.; *Arabian J. Chem.* **2017**, *10*, S1938. [Crossref]
11. Williams, H.; Wikström, F.; Löfgren, M.; *J. Cleaner Prod.* **2008**, *16*, 853. [Crossref]
12. Fiori, A. P. S. M.; Gabiraba, V. P.; Praxedes, A. P. P.; Nunes, M. R. S.; Balliano, T. L.; da Silva, R. C.; Tonholo, J.; Ribeiro, A. S.; *Polímeros* **2014**, *24*, 628. [Crossref]
13. Wrońska, N.; Katir, N.; Nowak-Lange, M.; El Kadib, A.; Lisowska, K.; *Foods* **2023**, *12*, 3519. [Crossref]
14. Cifriadi, A.; Panji, T.; Wibowo, N. A.; Syamsu, K.; *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **2017**, *65*, 012011. [Crossref]
15. Bertolini, A. C.; *Avaliação de Fécula e Farelo de Mandioca como Substratos para Produção de Ciclodextrinas*; Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil, 1995. [Link] acessado em junho 2025
16. do Nascimento, N. M.; *Desenvolvimento e Caracterização de Filmes Biodegradáveis de Araruta com Própolis Vermelha de Alagoas*; Tese de Doutorado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, 2021. [Link] acessado em junho 2025
17. Araújo, M. S.; da Silva, L. C. G.; Andrade, V. Q. L.; Carneiro, A. P. G.; Costa, E. A.; Fernandes, L. E. S.; *Research, Society and Development* **2021**, *10*, e387101522776. [Crossref]
18. Fu, L.; Zhu, J.; Zhang, S.; Li, X.; Zhang, B.; Pu, H.; Li, L.; Wang, Q.; *Carbohydr. Polym.* **2018**, *181*, 528. [Crossref]
19. Cano, A.; Jiménez, A.; Cháfer, M.; González, C.; Chiralt, A.; *Carbohydr. Polym.* **2014**, *111*, 543. [Crossref]
20. Coelho, I. S.; Santos, M. C. F.; Almeida, D. L.; Silva, E. M. R.; Neves, M. C. P.; *Como Plantar e Usar a Araruta*, 1ª ed.; Embrapa Informação Tecnológica: Brasília, 2005.
21. Fredriksson, H.; Silverio, J.; Andersson, R.; Eliasson, A.-C.; Åman, P. J. C. P.; *Carbohydr. Polym.* **1998**, *35*, 119. [Crossref]
22. Miles, M. J.; Morris, V. J.; Orford, P. D.; Ring, S. G.; *Carbohydr. Res.* **1985**, *135*, 271. [Crossref]
23. Leonel, M.; Cereda, M. P.; *Food Sci. Technol.* **2002**, *22*, 65. [Crossref]
24. Hornung, P. S.; Cordoba, L. P.; Lazzarotto, S. R. S.; Schnitzler, E.; Lazzarotto, M.; Ribani, R. H.; *J. Therm. Anal. Calorim.* **2017**, *127*, 1869. [Crossref]
25. Anugrahwidya, R.; Armynah, B.; Tahir, D.; *J. Polym. Environ.* **2021**, *29*, 3459. [Crossref]
26. Moreira, M. N. L.; *Valorização da Casca de Ovo como Partícula de Reforço Mecânico e de Barreira em Filme Biodegradável a Base de Pectina e Amido de Mandioca*; Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2023. [Link] acessado em junho 2025
27. Hu, H.; Pan, M.; Li, X.; Shi, X.; Zhang, L.; *Polym. Int.* **2004**, *53*, 225. [Crossref]
28. Alexandre, M.; Dubois, P.; *Mater. Sci. Eng., R* **2000**, *28*, 1. [Crossref]
29. Cerqueira, J. C.; Penha, J. D. S.; Oliveira, R. S.; Guarieiro, L. L. N.; Melo, P. D. S.; Viana, J. D.; Machado, B. A. S.; *Polímeros* **2017**, *27*, 320. [Crossref]
30. Júnior, E. A. O.; Bastos, J. S. B.; Silva, R. C. S.; Macêdo, H. R. A.; Macêdo, M. O. C.; Brandim, A. S.; *22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*; Natal, Brasil, 2016. [Link] acessado em junho 2025
31. de Alencar, A. O.; de Moura, T. E.; Fernandes, P. C. R.; Leal, E.; Dantas, J.; *Research, Society and Development* **2022**, *11*, e45311830807. [Crossref]
32. Barbosa, L. C. A.; *Espectroscopia no Infravermelho na Caracterização de Compostos Orgânicos*, 1ª ed.; UFV: Viçosa, 2007.
33. Maslahah, N. U.; Alisaputra, D.; Sedyadi, E.; *J. Phys.: Conf. Ser.* **2021**, *1788*, 012007. [Crossref]
34. Silva, D.; Debacher, N. A.; de Castilhos Junior, A. B.; Rohers, F.; *Quim. Nova* **2010**, *33*, 1053. [Crossref]
35. Badi, N. S. A.; Makmud, M. Z. H.; Mun, C. S.; Jamain, Z.; Asik, J.; Amin, K. N. M.; *Mater. Today: Proc.* **2024**, *97*, 69. [Crossref]
36. Schlemmer, D.; Sales, M. J. A.; Resck, I. S.; *Polímeros* **2010**, *20*, 6. [Crossref]
37. Silva, F. T. S.; *Desenvolvimento e Caracterização de Biofilmes Ativos de Amido de Araruta Aditivados com Óleo Essencial de Thymus vulgaris*; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2018. [Link] acessado em junho 2025

38. de Souza, C. O.; Silva, L. T.; Druzian, J. I.; *Quim. Nova* **2012**, 35, 262. [Crossref]
39. Canevarolo Jr., S. V.; *Técnicas de Caracterização de Polímeros*, 1ª ed.; Artliber Editora: São Paulo, 2017.
40. de Carvalho, A. P. A.; Silva, V. D. M.; Souza, P. T. F.; Garcia, C. F.; Queiroz, V. A. V.; Junqueira, R. G.; Garcia, M. A. V. T.; *Mater. Today Commun.* **2024**, 39, 109020. [Crossref]
41. Raphael, E.: *Eletrólitos Sólidos Poliméricos a Base de Amidos de Mandioca: Nativo, Acetilado e Oxidado – Acetilado*; Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2006. [Crossref]
42. Lomeli Ramírez, M. G.: *Desenvolvimento de Biocompósitos de Amido Termoplástico Reforçados por Fibra de Coco Verde*; Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2011. [Link] acessado em junho 2025