




C A P Í T U L O 2

FORMULAÇÕES DE FILMES BIOATIVOS À BASE DE AMIDO DE COCO BABAÇU ADITIVADOS COM NANOFIBRAS DE CELULOSE E ÓLEO ESSENCIAL DE *Curcuma longa* L.

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.073112616012>

Guilherme Pinesso

LBDM - Laboratório de Bioprospecção e Desenvolvimento de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Araguaína, Araguaína, TO, Brasil

Rennzo Rodrigues Diedrichs

LBDM - Laboratório de Bioprospecção e Desenvolvimento de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Araguaína, Araguaína, TO, Brasil

Carla Cristina da Silva

LBDM - Laboratório de Bioprospecção e Desenvolvimento de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Araguaína, Araguaína, TO, Brasil

Luana Priscilla Rodrigues Macedo

LBDM - Laboratório de Bioprospecção e Desenvolvimento de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Araguaína, Araguaína, TO, Brasil

André Luiz Carneiro Simões

Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil (CETIQT), SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Tássio Rômulo Silva Araújo Luz

LBDM - Laboratório de Bioprospecção e Desenvolvimento de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Araguaína, Araguaína, TO, Brasil

Ricardo Barbosa de Sousa

LBDM - Laboratório de Bioprospecção e Desenvolvimento de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Araguaína, Araguaína, TO, Brasil

RESUMO: A pesquisa propõe o desenvolvimento de filmes bioativos à base de amido de coco babaçu, aditivados com nanofibras de celulose e óleo essencial de *Curcuma longa* L, como alternativa sustentável aos plásticos convencionais. O amido do mesocarpo do babaçu, abundante na região Norte do Brasil, foi combinado a nanofibras de celulose e ao óleo essencial de cúrcuma, reconhecido por suas

propriedades antioxidantes e antimicrobianas, para aprimorar as propriedades mecânicas e funcionais dos filmes. O processo de produção segue o método de *casting*, enquanto as formulações foram inicialmente otimizadas por um delineamento composto central rotacional (DCCR). Foram realizados testes de solubilidade em água, permeabilidade ao vapor, espessura, degradação em solo. Os resultados mostraram que a adição de óleo essencial de cúrcuma e nanocelulose impactou significativamente as propriedades dos biofilmes. A formulação F1 apresentou o melhor equilíbrio entre durabilidade, resistência e capacidade de degradação, destacando-se como a mais promissora para aplicações em embalagens sustentáveis. Além disso, o projeto promove a valorização dos recursos naturais da região e fortalece comunidades extrativistas locais, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental. Com esse estudo, buscamos não apenas criar uma alternativa ecologicamente viável, mas também contribuir para a conscientização sobre a importância do uso de materiais biodegradáveis e valorização do cerrado e outros biomas brasileiros, ampliando as possibilidades de aplicação de biopolímeros em escala industrial.

PALAVRAS-CHAVE: Biodegradabilidade, Economia circular, Embalagens sustentáveis, Sustentabilidade ambiental

INTRODUÇÃO

A poluição causada pelo uso excessivo de plásticos é um dos problemas ambientais mais graves da atualidade, impactando profundamente tanto os ecossistemas terrestres quanto os aquáticos. Por se tratar de um material não biodegradável — ou seja, incapaz de ser decomposto por microrganismos como ocorre com resíduos orgânicos —, o plástico descartado torna-se um desafio ambiental significativo e de longa duração. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), a humanidade gera cerca de 2,24 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, dos quais aproximadamente 14 milhões de toneladas são lançadas em ambientes aquáticos, causando severos danos aos ecossistemas (Kurniawan et al., 2021; Brasil, 2023).

Nesse sentido, pensando na diminuição dos impactos causados pelo plástico, como polietileno e polipropileno, ao meio ambiente, surgiu a necessidade de estudos da produção de filmes e revestimentos à base de polímeros naturais como alternativa para a criação de embalagens menos prejudiciais para os diversos setores industriais (Landim et al., 2016; Ramos et al., 2016).

O coco babaçu, amplamente explorado por comunidades extrativistas no Tocantins, possui alto teor de amido em seu mesocarpo, tornando-se um recurso valioso para a produção de bioplásticos. Por sua vez, a cúrcuma (*Curcuma longa*

L.) ou açafrão da terra é conhecida como um corante e condimento natural na indústria alimentícia, possuindo de diversos ativos pela presença dos curcuminoides em seus rizomas, sendo o principal a curcumina que atua com propriedades anti-inflamatórias, anticancerígenas, antifúngicos e antioxidantes. O óleo essencial é extraído do rizoma da cúrcuma, retratando também as propriedades existentes na planta, além de ter grande potencial antifúngico na preservação de alimentos em tempo de prateleira (Singh et al., 2010; Naghetini, 2006).

A nanocelulose, outro aditivo empregado, é extraída de fibras naturais, constituída por celulose, hemicelulose e lignina, bases poliméricas naturais responsáveis pelo fortalecimento das matrizes na construção do revestimento biodegradável. O seu uso é viável graças a sua disponibilidade e a capacidade de força de adesão, que torna a produção de filmes mais resistentes ao contato com a água e/ou umidade (Lengowski, 2016).

Ao alinhar a valorização de recursos naturais regionais com soluções tecnológicas inovadoras, o estudo busca contribuir para a redução de resíduos plásticos e para a promoção da sustentabilidade, beneficiando tanto o meio ambiente quanto as comunidades locais. Assim, os biofilmes que desenvolvemos representam não apenas um avanço científico, mas também uma oportunidade de impacto social e econômico na região Norte do Tocantins.

OBJETIVO E QUESTÃO PROBLEMA

Objetivo

A pesquisa tem como objetivo principal desenvolver filmes biodegradáveis e bioativos utilizando amido de coco babaçu como matriz polimérica, associado às propriedades mecânicas das nanofibras de celulose e às propriedades funcionais do óleo essencial de *Curcuma longa* L. Esse desenvolvimento inclui a avaliação das diferentes formulações sobre as propriedades mecânicas, químicas e de biodegradabilidade dos filmes, com o objetivo de propor uma alternativa sustentável para a substituição de plásticos convencionais em aplicações como embalagens alimentícias. Além disso, o projeto busca valorizar os recursos naturais renováveis da região Norte do Brasil, promovendo o fortalecimento das comunidades extrativistas do Tocantins, e demonstrar a viabilidade ambiental, social e econômica do uso de compósitos biodegradáveis em escala industrial.

Questão Problema

Como desenvolver materiais biodegradáveis e funcionalmente eficazes que possam substituir os plásticos convencionais, aproveitando recursos naturais renováveis como o amido de coco babaçu, as nanofibras de celulose e o óleo essencial de *Curcuma longa* L, de forma a promover soluções sustentáveis para a conservação ambiental, fortalecer comunidades locais e assegurar a viabilidade econômica para aplicações em escala industrial?

DESCRIÇÕES DE MATERIAIS E MÉTODOS

A farinha de babaçu, subproduto das atividades de extrativismo e beneficiamento do óleo de babaçu, foi adquirida a partir da Associação Regional das Mulheres Trabalhadoras Rurais do Bico do Papagaio, cooperativa de São Miguel - TO. A farinha foi peneirada utilizando peneira comum e reservada para a elaboração dos biofilmes. Foi empregado o óleo essencial de *Curcuma longa* L (NL Terapias Naturais). Nanofibras de celulose vegetal foram adquiridas a partir de parceria firmada com a Suzano (empresa brasileira de papel e celulose). Os demais reagentes foram utilizados sem tratamentos prévios.

A elaboração dos filmes utilizou o método de *casting*, com preparação de solução filmogênica e evaporação do solvente, conforme metodologias de Rocha et al. (2022), Maniglia et al. (2017) e Lopes et al. (2020), com adaptações. Diferentes concentrações de óleo essencial de cúrcuma e Tween 80 foram usadas, enquanto as concentrações de amido de babaçu, nanofibras de celulose e glicerol foram constantes.

Foram feitas três formulações de acordo com a tabela 1: branco, sem a presença de óleo de cúrcuma e Tween 80 (BR), formulação 1 (F1) e formulação 2 (F2), oriundas de planejamento experimental prévio e realizados ensaios de solubilidade em água (%), permeabilidade ao vapor de água (PVA), espessura (δ) e degradação em terra vegetal (Silva, 2022). Os testes foram realizados em triplicata para maior precisão.

Formulação	BR	F1	F2
Óleo de <i>Curcuma longa</i> L. (% m/m)	0	4,9	14,1
Tween 80 (% m/m)	0	0,76	0,76
Amido de babaçu (% m/V)	3,0	3,0	3,0
Glicerol (% m/m)	45,0	45,0	45,0
Nanofibras de celulose (% m/V)	1,0	1,0	1,0

Tabela 1 - Planejamento fatorial das formulações dos filmes de amido de babaçu aditivados com nanofibras de celulose e óleo essencial de cúrcuma.

Fonte: Autor (2024).

Após o preparo das soluções filmogênicas, a solução foi levada para placas de acrílico para realização da metodologia de casting, conforme figura 1. As amostras foram solidificadas à temperatura ambient.

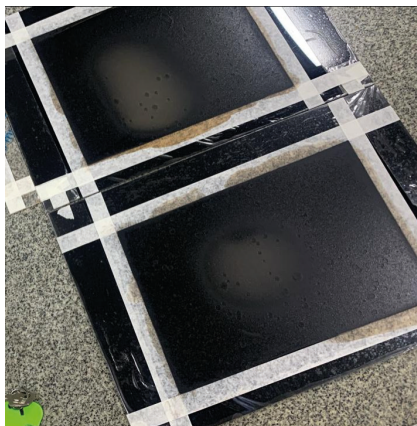


Figura 1 - Formulações BR, F1 E F2 espalhadas nas placas de acrílico

Fonte: Autor (2024)

Os ensaios de solubilidade foram realizados a partir da metodologia aplicada por Oluwasina e Awonyemi (2021). Tal método propõe utilizar amostras de (2 x 2 cm) e secar durante 3 horas a 105°C para determinar a massa inicial (m_i). A seguir os filmes são imersos em 40 mL de água deionizada por 24 h em um béquer coberto em incubadora *shaker* a 30 °C. Após esse período, o bioplástico é removido e seco por 3 h a 105 °C em uma estufa, para determinação da massa final (m_f). Como mencionado anteriormente os ensaios foram feitos em triplicata, e para determinar o grau de solubilidade é utilizada a seguinte equação:

Equação (1)

$$\text{Solubilidade}(\%) = (m_i - m_f) / m_i \times 100$$

Por outro lado, para realizar o ensaio de permeabilidade ao vapor de água (PVA) foi adotado o procedimento proposto pela norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) E96M-16 (ASTM, 2016), no qual, os ensaios são realizados à temperatura ambiente (25 ± 1 °C), utilizando uma célula de acrílico com tampa e uma abertura central, a fim de se fixar o material. O fundo da célula é preenchido por CaCl_2 para garantir 0% de UR. A seguir essa célula é depositada, por sua vez, em outro recipiente de acrílico hermeticamente fechado, contendo NaCl, com o intuito de manter

75% de UR e assegurar um gradiente de pressão de vapor de água, ΔP_a , entre as superfícies do filme, conforme Figura 2. A taxa de aumento de massa total da célula será monitorada por cerca de 120 h e a PVA será determinada conforme a seguinte equação 2:

Equação (2)

$$PVA = \frac{TPVA \cdot \delta}{A \cdot P_s \cdot \left(\frac{UR1 - UR2}{100} \right)}$$

onde: TPVA é a taxa de permeabilidade ao vapor de água (g água/dia), δ é a espessura média dos filmes (m), A é a área de permeação da cápsula ($28,26 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), P_s é a pressão de saturação do vapor de água a 25 °C (163.678,8 Pa) e a UR é a umidade relativa no interior do dessecador (sub-índice 1). interior da cápsula (sub-índice 2)

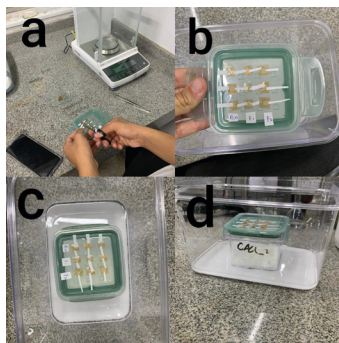


Figura 2 - Preparo da caixa hermética para realização do ensaio

Fonte: Autor (2024)

A espessura dos filmes foi determinada utilizando um micrômetro com resolução de 0,001 mm. Foram realizadas dez medidas em diferentes pontos simétricos do filme e a espessura foi calculada como a média aritmética das medidas de espessura (Lopes et al., 2020).

A fim de avaliar o grau de degradação em terra vegetal do biofilme, foi optado um período de 0-100 dias. Béqueres de 1 L foram preenchidos por terra adubada utilizada em compostagem de jardins. As amostras foram enterradas separadamente nos béqueres em triplicatas, envoltas em gaze, para facilitar o manejo. Após cada pesagem, as amostras foram reenterradas nos seus respectivos béqueres, com adição pequenas quantidades de água destilada no meio para favorecer a atividade dos microrganismos presentes no solo. As reduções de massa (R) observadas é medida em percentual (%), conforme a seguinte equação 3:

Equação (3)

$$R(\%) = (m_i - m_f)/m_i \times 100$$

onde, R é o valor para a redução de massa, em percentual, m_i é a massa inicial e m_f é a massa final. Com os resultados obtidos desta equação, foram calculadas as taxas de biodegradação para as amostras (Bezerra; Andrade, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Formulação	BR	F1	F2
Solubilidade (%)	15,47 ± 4,38	21,58 ± 2,48	24,04 ± 15,54
Degradação 100 dias (%)	76,9 ± 5,2	57,1 ± 11,2	56,2 ± 7,9
PVA x 10 ⁷ (g.dia ⁻¹ .m ⁻¹ .Pa ⁻¹)	0,72 ± 0,60	1,07 ± 0,45	1,27 ± 0,73
Espessura (µm)	121 ± 14	131 ± 17	130 ± 17

Tabela 2 - Resultados obtidos por meio das análises físico-químicas

Fonte: Autoria própria (2024)

As formulações BR, F1 e F2 apresentaram características distintas nas propriedades físico-químicas avaliadas. A formulação F2 obteve uma maior permeabilidade ao vapor de água (PVA) e solubilidade, consequentemente indicando uma menor resistência à umidade e apresentou a menor taxa de degradação em solo em 100 dias de ensaio. Por outro lado, a F1 destacou-se pelo equilíbrio entre propriedades mecânicas e biodegradabilidade, com uma taxa de degradação controlada, de 57,1%. Portanto, no cenário de embalagens biodegradáveis o uso dessa formulação é mais promissora, pois oferece uma resistência suficiente aliada à eficiência ambiental. Ademais, dando ênfase para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água, foi possível analisar que a formulação F2 teve maior fluxo de passagem de água, conforme, tal resultado é congruente, visto que os coeficientes de solubilidade e PVA são diretamente proporcionais, isto é, quanto maior a solubilidade maior será a permeabilidade. A formulação BR, por sua vez, teve desempenho intermediário, com boa durabilidade, porém menor permeabilidade ao vapor de água, o que pode limitar sua aplicação em contextos que exigem maior trocas gasosas. Notou-se também que quanto maior a quantidade de óleo essencial de cúrcuma, menor a taxa de degradação. Desse modo, infere-se que o óleo essencial pode formar uma camada antimicrobiana que impede parcialmente que os microrganismos presentes no solo degradem o filme.

CONCLUSÃO

O projeto produziu e analisou parâmetros essenciais para a aplicação e a biodegradabilidade de biofilmes, incluindo a solubilidade em água, permeabilidade ao vapor de água (PVA), espessura e degradação em terra vegetal. A solubilidade em água foi mensurada com base na variação de massa após imersão, permitindo inferir a durabilidade dos biofilmes em ambientes úmidos. A PVA foi determinada pela taxa de transmissão de vapor de água através do filme, conforme normas ASTM, o que indica a resistência do material à umidade. A espessura foi calculada como média de medições feitas em diferentes pontos, e a degradação em terra vegetal foi analisada por meio da redução de massa em contato com microrganismos do solo. Estes testes, realizados em triplicata, proporcionam dados relevantes para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis eficientes, que podem ser aplicados em diversas condições ambientais, e outras formulações e ensaios serão formuladas futuramente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. ASTM E 96-16. Nova York. 2016.

BEZERRA, E. L.; ANDRADE, P. S. Desenvolvimento de bioplásticos à base de cascas de bananas e de ovos. In: ANDRADE, P. L.; RIBEIRO, I. M. (org.) *Ciência e engenharia de materiais: conceitos, fundamentos e aplicação*. 1. ed. Guarujá-SP: Científica Digital, p. 216-219, 2021.

LENGOWSKI, E. C. Formação e caracterização de filmes com nanocelulose. Curitiba, 2016, 232 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, 2016.

LOPES, I. A.; PAIXÃO, L. C.; SILVA, L. J. S.; ROCHA, A. A.; BARROS FILHO, A. K. D.; SANTANA, A. A. Elaboration and characterization of biopolymer films with alginate and babassu coconut mesocarp. *Carbohydrate Polymers*, v. 234, 115747, 2020.

MANIGLIA, B. C.; TESSARO, L.; LUCAS, A. A.; TAPIA-BLACIDO, D. R. Bioactive films based on babassu mesocarp flour and starch. *Food Hydrocolloids*, v. 70, p. 383-391, 2017.

OLUWASINA, O. O.; AWONYEMI, I. O. Citrus peel extract starch-based bioplastic: effect of extract concentration on packed fish and bioplastic properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 2021.

ROCHA, A. A.; MACÊDO, E. B. V.; ALMEIDA, M. F.; SANTOS, L. S.; VELOSO, C. M. Edible films based on arrowroot (*Maranta arundinaceae* L.) starch incorporated with licuri oil (*Syagrus coronata*) and tween 80. **Journal of Polymers & Environment**, v. 30, p. 4821–4834, 2022.

SILVA, J. G. M. Elaboração e caracterização de biopolímeros de alginato e mesocarpo de coco babaçu contendo *Curcuma longa* L. São Luís, 2022, 75 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) - Coordenação de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, 2022.

SINGH, G.; KAPOOR, I. P. S.; SINGH, P.; HELUANI, C. S.; LAMPASONA, M. P.; CATALAN, C. A. N. Comparative study of chemical composition and antioxidant activity of fresh and dry rhizomes of turmeric (*Curcuma longa* Linn.). **Food and Chemical Toxicology**, v. 48, n. 4, p. 1026-1031, 201

KURNIAWAN, S.; ABDULLAH, S. R. S.; IMRON, M. F.; ISMAIL, N. I. Current state of marine plastic pollution and its technology for more eminent evidence: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123537, 2021.

LANDIM, A. P. M.; BERNARDO, C. O.; MARTINS, I. B. A.; FRANCISCO, M. R.; SANTOS, M. B.; MELO, N. R. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros**, v. 26, p. 82-92, 2016.

NAGHETINI, C. C. Caracterização físico-química e atividade antifúngica dos óleos essenciais da cúrcuma. Belo Horizonte, 2006, 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) Faculdade de Farmácia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.