

ÚLTIMAS DESCOBERTAS E DESENVOLVIMENTO DE FILMES POLIMÉRICOS NATURAIS: UMA REVISÃO

Wanderley de Oliveira Bezerra¹, Dennys Correia da Silva²,
Meyrelle Figueiredo Lima³, Janiele Alves Eugênio Ribeiro
Galvão⁴ Alcides de Oliveira Wanderley Neto⁵.

1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte- wanderley.bezerra.705@ufrn.edu.br

2 Universidade Federal do Rio Grande do Norte- dennys.correia.024@ufrn.edu.br

3 Universidade Federal do Rio Grande do Norte- meyrelle.lima.059@ufrn.edu.br

4 Universidade Federal do Rio Grande do Norte- janiele.ribeiro.093@ufrn.edu.br

5 Universidade Federal do Rio Grande do Norte- alcides.wanderley@ufrn.br

Palavras-Chave: biopolímeros; alginato; pectina; frutas naturais.

Introdução

A preocupação com o meio ambiente e a sustentabilidade tem impulsionado o desenvolvimento de biopolímeros na indústria. Nesse contexto, os biopolímeros emergem como uma solução promissora, oferecendo uma abordagem renovável para a fabricação de diversos produtos (A. Vinod et al., 2020).

Os biopolímeros são macromoléculas de origem biológica que apresentam propriedades semelhantes ou superiores aos polímeros tradicionais derivados do petróleo (David L. Kaplan, 1998). Sua produção baseia-se em fontes renováveis, como biomassa vegetal, microrganismos e resíduos agroindustriais, contribuindo para reduzir a dependência de recursos não renováveis e mitigar os impactos ambientais (David L. Kaplan, 1998. Karthik, T. & Rathinamoorthy, R., 2018).

A confecção de biopolímeros envolve uma variedade de processos, como fermentação microbiana, extração de biomassa e síntese química a partir de matéria-prima renovável (Mohanty et Al., 2005). Cada método tem suas vantagens e desafios, influenciando as propriedades finais do biopolímero e sua viabilidade econômica em diferentes aplicações industriais.

Os biopolímeros exibem uma diversidade impressionante de propriedades, adaptáveis às necessidades específicas de cada aplicação (Niaounakis & Gkelis, 2019). Desde embalagens biodegradáveis e filmes comestíveis até materiais para a indústria automotiva e biomateriais para uso médico, os biopolímeros estão transformando diversos setores industriais (Auras et Al., 2010).

Apesar de seu potencial, a adoção generalizada de biopolímeros enfrenta desafios significativos, como custos de produção elevados e questões de desempenho (Waqas Ali et Al. 2024.). No entanto, esses desafios também representam oportunidades para a inovação e o avanço tecnológico (Waqas Ali et Al. 2024).

Uma das principais vantagens dos biopolímeros é sua contribuição para a sustentabilidade ambiental (Nadka Tz Dintcheva, 2024). Ao contrário dos plásticos convencionais, os biopolímeros são biodegradáveis e compostáveis, reduzindo o acúmulo de resíduos e os impactos negativos nos ecossistemas terrestres e aquáticos (Niaounakis & Gkelis, 2019).

À medida que a demanda por soluções sustentáveis continua a crescer, espera-se que os biopolímeros desempenhem um papel cada vez mais importante na indústria (Pacheco Torgal et al., 2018). Avanços na pesquisa e no desenvolvimento de novos materiais, combinados com políticas governamentais favoráveis e mudanças nas preferências dos consumidores, têm o potencial de impulsionar a adoção generalizada de biopolímeros e promover uma economia mais circular e sustentável (Auras et al., 2010.; R. Sharma et al., 2024). Esta revisão abrangente visa contribuir para o entendimento e o avanço desse campo promissor, fornecendo insights valiosos para pesquisadores, profissionais da indústria e formuladores de políticas.

Material e Métodos

O estudo adotou uma abordagem metodológica dividida em duas etapas principais. De início, realizou-se uma revisão da literatura utilizando várias bases de dados acadêmicas, como PubMed, ScienceDirect e Google Scholar. Foram empregadas palavras-chave relevantes, como "biopolímeros", "biofilmes", "aplicações industriais" e "sustentabilidade", para identificar artigos científicos, revisões e relatórios técnicos pertinentes ao tema.

A seleção dos artigos foi baseada em critérios de relevância, incluindo informações sobre a produção, propriedades e aplicações dos biofilmes de biopolímeros. Essa revisão proporcionou uma visão abrangente sobre o estado atual da pesquisa nesse campo, permitindo a identificação de tendências e padrões comuns. Em seguida, foram analisados estudos específicos relacionados à confecção de biofilmes de biopolímeros, com foco em materiais como alginato, pectina e compostos de frutas naturais. Essa análise envolveu a avaliação dos métodos de preparação dos biofilmes, incluindo a extração dos biopolímeros, formulação das misturas, processos de reticulação e caracterização das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais resultantes. Os dados obtidos foram submetidos a uma análise qualitativa, destacando aspectos relevantes como eficiência de produção, estabilidade, resistência mecânica, permeabilidade e potenciais aplicações industriais dos biopolímeros.

Essa abordagem proporcionou uma compreensão abrangente e sistemática do papel dos biopolímeros na indústria sustentável, fornecendo insights valiosos para o avanço e desenvolvimento desse campo promissor.

Resultados e Discussão

Biopolímeros de alginato

Segundo Dogyeong Kim et al. (2023), foi desenvolvido um biofilme artificial de *Rhodospirillum rubrum* imobilizado em uma matriz de alginato usando deposição eletroforética (EPD). Este biofilme demonstrou alta eficiência na imobilização de bactérias, resultando em uma produção estável e eficiente de hidrogênio por longos períodos. A EPD mostrou-se eficaz na produção econômica e rápida de filmes mecanicamente estáveis em larga escala, superando limitações operacionais, oferecendo uma abordagem eficiente para a fabricação de hidrogéis com propriedades personalizadas.

Nahid Pourreza et al. (2021) desenvolveram um filme de biopolímero de alginato com nanopartículas de ouro (AuNPs) funcionalizadas com tiourea para a detecção de paládio (II). As AuNPs foram sintetizadas em meio alcalino e incorporadas à matriz de alginato, que posteriormente foi funcionalizada com tiourea. O filme resultante foi transparente e mostrou boa estabilidade ao longo do tempo. O sistema de sensoriamento demonstrou um limite de detecção de $0,038 \mu\text{g mL}^{-1}$ para o paládio (II) e foi aplicado com sucesso em diversas amostras, como folhas de noqueira, águas residuárias, amálgama dental e amostras de capacitores cerâmicos.

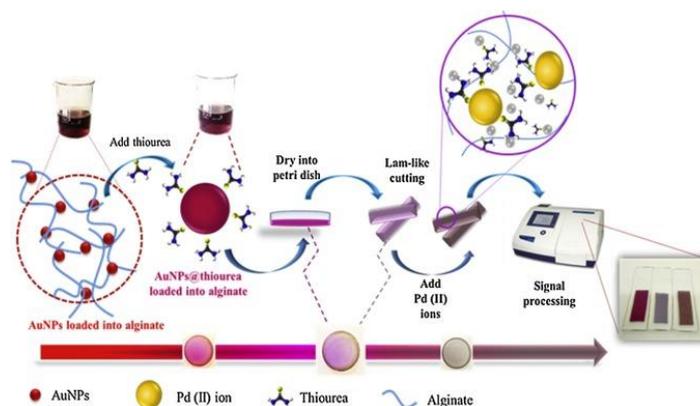


Figura 1. Ilustração esquemática da detecção de paládio (II) usando filme de alginato de tiourea/AuNPs. Fonte (NAHID POURREZA et al. (2021)

Rachidid Oukhirib et al. (2020) investigaram o comportamento inibitório do biopolímero alginato com diferentes comprimentos de cadeia na corrosão das superfícies de Fe, Al e Sn em meio ácido, usando cálculos de química quântica, com base na teoria HSAB, e métodos de mecânica molecular. Os resultados mostraram que o comprimento da cadeia do alginato e a natureza do metal afetaram significativamente as interações alginato/metal, com aumento da energia de ligação conforme o comprimento da cadeia aumentou.

A adesão de microrganismos no ambiente marinho é crucial para o início da bioincrustação. Xiaoyan et al. (2018) investigou o efeito do alginato e da albumina na adesão e colonização de microrganismos em wafers de silício em água do mar artificial estéril. A presença dessas moléculas na solução modificou as propriedades superficiais dos microrganismos e influenciou a formação do biofilme.

Biopolímeros de pectina

Pin Chen et al. (2024) investigaram a encapsulação de probióticos em pectina rica em RG-I, com uma eficiência de incorporação de cerca de 65%. As microcápsulas proporcionaram proteção aos probióticos contra diferentes estresses ambientais, especialmente o estresse por H₂O₂, onde a taxa de sobrevivência dobrou em comparação aos probióticos livres. Durante o armazenamento a 25 °C, a contagem de probióticos permaneceu estável por 45 dias. Além disso, a formação de biofilme dentro das microcápsulas melhorou significativamente a atividade dos probióticos.

De acordo com Oscar A.N. Santisteban (2022), agentes hemostáticos tópicos à base de biopolímero de pectina foram sintetizados e caracterizados usando difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia infravermelha. Os filmes de pectina foram reticulados com CaCl₂ em diferentes concentrações de solução de Ca²⁺, resultando em estruturas semelhantes a caixas de ovos. A capacidade anti-hemorrágica dos biofilmes foi observada pela interação das hemácias com a interface dos biofilmes, visualizada por microscopia de contraste de fase. Concentrações mais altas de Ca²⁺ favoreceram a coagulação sanguínea, facilitando a migração e o empilhamento ordenado das hemácias nos biofilmes de pectina. Isso sugere que os biofilmes de pectina têm potencial como hemostáticos tópicos seguros.

Thuy Thi Thanh et al (2024) prepararam filmes reticulados iônicos usando pectina de resíduos agrícolas, como cascas de ambarela (AFP) e bainha viscosa de semente de jaca (JFS). As propriedades físico-químicas das pectinas foram analisadas, incluindo teor de umidade, peso molecular (Mw), grau de esterificação (DE) e ácido galacturônico (GA). Os filmes reticulados com diferentes íons metálicos (Ca²⁺, Cu²⁺, Fe³⁺ ou Zn²⁺) apresentaram maior resistência mecânica e menor solubilidade em água e permeabilidade ao vapor de água. Os íons metálicos foram efetivamente reticulados com grupos carboxila da pectina. Os filmes de pectina mostram potencial para serem usados como embalagens de alimentos ecologicamente corretas.

Sai Zhang et al. (2023) investigaram as propriedades físico-químicas da pectina extraída das cascas de manga e dos filmes à base de pectina preparados por reticulação com cátions. A pectina da casca de manga possui alto teor de metoxi e é composta por agregados de homogalacturonanas lineares. Os filmes feitos com essa pectina reticulada com Ca^{2+} , Zn^{2+} e Cu^{2+} apresentaram melhorias em suas propriedades, como resistência à tração, hidrofobicidade e estabilidade térmica. Análises revelaram as interações intermoleculares entre os íons e a pectina nos filmes, enquanto a microscopia eletrônica de varredura evidenciou diferenças na microestrutura. Esses resultados indicam que a reticulação da pectina com cátions pode ser uma abordagem promissora para desenvolver filmes de pectina com propriedades aprimoradas.

Biopolímero de frutas naturais

Zhian Cai et al. (2024) desenvolveram um biofilme compósito de gelatina/pullulan/quitosana carregado com metil jasmonato (MeJA) para inibir a lignificação por frio da nêspera durante o armazenamento a 0 °C. A firmeza e o teor de lignina foram reduzidos em 89% e 81,77%, respectivamente, após o tratamento com o biofilme carregado com MeJA. A produção de malondialdeído (MDA) foi praticamente suprimida, resultando em uma redução significativa da lesão por frio na nêspera. Os resultados da atividade enzimática mostraram que o biofilme aliviou a lignificação do frio principalmente pela inibição da atividade da peroxidase (POD) na via dos fenilpropanóides. Além disso, o tratamento convencional com vapor de MeJA aliviou a lignificação apenas até o terceiro dia, enquanto o tratamento com biofilme proporcionou um efeito melhor e mais duradouro durante todo o período de armazenamento, graças à sua capacidade de liberação sustentada.

Rodrigo D. Silva et al. (2024) desenvolveram um método simples para transformar completamente cascas de banana em pó (BPP) em filmes bioplásticos, utilizando pré-tratamentos suaves. Foram analisadas variáveis que afetam o desempenho dos filmes, incluindo o tipo de BPP (não branqueado versus branqueado), o solvente de pré-tratamento (água, pré-tratamento hidrotérmico - HTP, ou solução de ácido sulfúrico, pré-tratamento com ácido diluído - DAP), e a adição de carboximetilcelulose (CMC) aos filmes. A presença de CMC impactou as propriedades de tração dos bioplásticos, com filmes contendo 20% de peso desse biopolímero apresentando resistência à tração de até 16 MPa. A permeabilidade ao vapor d'água não foi afetada, mas o pré-tratamento influenciou o ângulo de contato com a água, com filmes HTP mostrando superfície hidrofóbica. Esses filmes são promissores para embalagens ativas de alimentos.

Yennam Rajesh et al. (2024) investigaram o desenvolvimento de bioplásticos a partir de recursos agrícolas, como cascas de banana, cascas de batata e amido de milho, como alternativa ecológica aos plásticos convencionais. O objetivo é explorar a fabricação de plásticos biodegradáveis, com foco na formação a partir do amido de milho. O impacto do glicerol na resistência à tração foi estudado, e as propriedades físico-químicas foram comparadas com a literatura. Testes de solubilidade e biodegradabilidade foram realizados para determinar os recursos agrícolas mais adequados para a produção de plásticos biodegradáveis.



Figura 2 . Síntese de bioplástico a partir de amido de milho (recursos agrícolas). Fonte Yennam Rajesh et al. (2024)

Conclusões

Os biopolímeros têm emergido como uma alternativa promissora e sustentável na indústria, impulsionados pela crescente preocupação com o meio ambiente e a busca por soluções renováveis. Nesta revisão bibliográfica, explorou-se diversas fontes de biopolímeros, como alginato, pectina e biofilmes de frutas naturais, e investigou-se suas aplicações em diferentes contextos industriais. Através de uma revisão abrangente, observou-se a diversidade de propriedades e aplicações dos biopolímeros.

Os estudos sobre biofilmes de alginato revelaram sua eficácia na produção de hidrogênio, detecção de paládio (II), inibição da corrosão e controle da bioincrustação. Da mesma forma, os biofilmes de pectina demonstraram sua utilidade na proteção de probióticos, síntese de filmes bioplásticos e como agentes hemostáticos. Além disso, os biofilmes compostos de gelatina/pullulan/quitosana e carregados com metil jasmonato mostraram promissoras aplicações na inibição da lignificação por frio em frutas.

A investigação sobre bioplásticos derivados de recursos agrícolas, como cascas de banana, cascas de batata e amido de milho, destaca a importância de explorar materiais sustentáveis para reduzir a dependência de plásticos convencionais. Em suma, esta pesquisa evidencia o potencial dos biopolímeros como uma solução viável para os desafios enfrentados pela indústria moderna. À medida que avançamos em direção a uma economia mais circular e

sustentável, os biopolímeros desempenharão um papel fundamental na transformação dos processos industriais e na mitigação dos impactos ambientais.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Tecnologia de Tensoativos e Processos de Separação pela estrutura e suporte e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento pelo apoio financeiro.

Referências

[Journal of Molecular Liquids](#), 2020.

A. VINOD, M.R. SANJAY, SIENGCHIN SUCHART, PARAMESWARANPILLAI JYOTISHKUMAR, AKBAR ALI WAQAS, RAHIM UR HAFEEZ, FLORA RUTIGLIANO ANGELA, Microbial- and seaweed-based biopolymers: Sources, extractions and implications for soil quality improvement and environmental sustainability - A review, **Journal of Environmental Management**, Volume 359, 2024, 120964.

AURAS, R., LIM, L.-T., & SELKE, S.E.M. Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications. John Wiley & Sons, 2010.

CAI, Z.; ZHONG, J.; JIN, J.; WU, D.; CHEN, K. Methyl jasmonate-loaded composite biofilm sustainably alleviates chilling lignification of loquat fruit during postharvest storage, **Food Chemistry**, 444, 138602, 2024.

CHEN, P.; TIAN, J.; REN, Y. CHENG, H.; PAN, H.; CHEN, S.; YE, X.; CHEN, J. Enhance the resistance of probiotics by microencapsulation and biofilm construction based on Rhamnogalacturonan I-Rich Pectin, **International Journal of Biological Macromolecules**, 258, 128777, 2024.

D.L. KAPLAN Introduction to Biopolymers from Renewable Resources Biopoly. from. *Renew. Resour.*, 1 (1998), pp. 1-29,

GROSS, R.A., & KALRA, B. Biodegradable Polymers for the Environment. **Science**, 297(5582), 803–807, 2002.

HE, X.; LIU, Y.; BAI, X.; YUAN, C.; LI, H. Alginate/Albumin in incubation solution mediates the adhesion and biofilm formation of typical marine bacteria and algae, **Biochemical Engineering Journal**, 139, 25-32, 2018.

KARTHIK, T.; RATHINAMOORTHY, R. Sustainable biopolymers in textiles: An overview. **Handbook of ecomaterials**, p. 1-27, 2018.

KIM, Dogyeong & SOO JOUNG, Young. Sodium alginate based artificial biofilms polymerized by electrophoretic deposition for microbial hydrogen generation. [International Journal of Biological Macromolecules](#), v. 248, 125887, 2023.

MOHANTY, A.K., MISRA, M., & DRZAL, L.T. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites, **CRC Press**, 2005.

NADKA TZ DINTCHEVA, Overview of polymers and biopolymers degradation and stabilization towards sustainability and materials circularity, *Polymer*, Volume 306, 2024, 127136

NGUYEN, T. T. T.; TAN HO, H.; HOANG, D.; NGUYEN, Q. A. P.; TRAN, T. V., Novel films of pectin extracted from ambarella fruit peel and jackfruit seed slimy sheath: Effect of ionic crosslinking on the properties of pectin film, **Carbohydrate Polymers**, 334, 122043, 2024.

NIAOUNAKIS, M., & GKELIS, S. Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials, **Woodhead Publishing**, 2019.

OSCAR A.N. SANTISTEBAN, GUILHERME M. SACCO, GUILHERME DE PAULA GUARNIERI, MOACIR FERNANDES DE GODOY, EDUARDO RIBEIRO DE AZEVEDO, JOSÉ GERALDO NERY, Syntheses of novel topical hemostatic agents based on pectin biopolymer aiming hemorrhage control: **Thromboelastographic studies and non-homogeneous swelling effect**, **Materials Today Communications**, Volume 33, 2022.

OUKHIRIB, Rachid et al. In silico investigations of alginate biopolymer on the Fe (110), Cu (111), Al (111) and Sn (001) surfaces in acidic media: Quantum chemical and molecular mechanic calculations

PACHECO-TORGAL, F., LABRINCHA, J.A., DIAMANTI, M.V., DE BRITO, J., & YU, C.-P. Handbook of Bio-Based Materials and Bioenergy Production. **CRC Press**, 2018.

POURREZA, Nahid; ABASIPANAH, Parichehr; GHOMI, Maatineh, Fabrication of AuNPs into alginate biopolymer and functionalized by thiourea as a film shape probe for palladium (II) sensing, **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 100, 194-203, 2021.

RAJESH, Y.; GAUTAM, N.; SALONI, P.; DEORE, V.; SHIVDE, P.; DABHADE, G. Agricultural resources in focus: Eco-friendly bioplastic synthesis from corn starch, **Materials Today: Proceedings**, 2024.

Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites, **Journal of Cleaner Production**, Volume 258, 2020,

SHARMA, Ramesh et al. Avanços recentes em materiais sustentáveis à base de celulose para tratamento de águas residuais: uma visão geral. **Revista Internacional de Macromoléculas Biológicas**, p. 128517, 2023.



63º Congresso Brasileiro de Química
05 a 08 de novembro de 2024
Salvador - BA

SILVA, R. D.; PACHECO, T. F.; SANTI, A. D.; MANARELLI, F.; BOZZO, B. R.; BRIENZO, M.; OTONI, C. G.; AZEREDO, H. M. C. From bulk banana peels to active materials: Slipping into bioplastic films with high UV-blocking and antioxidant properties, **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, 438, 140709, 2024.

ZHANG, S.; PAN, X.; ZHAO, J.; LI, J.; YU, X.; PENG, Y.; WU, J., Characterization of ionically crosslinked mango peel pectin based-films: Effect of different cations on the improved properties of film, **Food Packaging and shelf-life**, 38, 101131, 2023.