

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Substituição parcial de poli(ácido láctico) por microalgas para produção de filmes plásticos: uma abordagem sinérgica entre sustentabilidade e desempenho

Gabriela de Oliveira Machado
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

GABRIELA DE OLIVEIRA MACHADO

Substituição parcial de poli(ácido láctico) por microalgas para produção de filmes plásticos: uma abordagem sinérgica entre sustentabilidade e desempenho

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Nilda de F. F. Soares

Coorientadora: Taila Veloso de Oliveira

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M149s
2025 Machado, Gabriela de Oliveira, 1999-
Substituição parcial de poli(ácido láctico) por microalgas
para produção de filmes plásticos: uma abordagem sinérgica
entre sustentabilidade e desempenho / Gabriela de Oliveira
Machado. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (100 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Nilda de Fátima Ferreira Soares.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Tecnologia de Alimentos, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.824>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Alimentos - Embalagens. 2. Filmes plásticos. 3. Ácido
láctico. 4. Microalgas. 5. Águas residuais. 6. Biodegradação
ambiental. 7. Economia circular. I. Soares, Nilda de Fátima
Ferreira, 1960-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Tecnologia de Alimentos. Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos.
III. Título.

CDD 22. ed. 664.09

GABRIELA DE OLIVEIRA MACHADO

Substituição parcial de poli(ácido láctico) por microalgas para produção de filmes plásticos: uma abordagem sinérgica entre sustentabilidade e desempenho

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 21 de julho de 2025.

Assentimento:

Gabriela de Oliveira Machado
Autora

Nilda de Fatima Ferreira Soares
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 19/12/2025 às 10:19:49 e pela orientadora em 16/01/2026 às 09:57:58. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **8KL1.FR5I.UL5F** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a mim mesma, pela resiliência em lidar com meus medos e pela ousadia de persistir e ir atrás dos meus sonhos, mesmo diante dos desafios. Aos meus pais, Nonato e Kariny, pelo suporte fundamental e apoio financeiro que me permitiram trilhar este caminho. Aos meus irmãos, Vinícius e Camila, por serem meu porto seguro e por simplesmente existirem na minha vida. À minha tia Elizane, pelo apoio que me ofereceu durante esta caminhada.

À Taíla, que transcendeu o papel de coorientadora para se tornar uma amiga preciosa que levarei por toda a vida. À minha orientadora, Professora Nilda, que, mesmo iniciando seu processo de aposentadoria, me acolheu com generosidade e me fez apaixonar pela área de embalagens.

Ao Matheus, meu parceiro de laboratório, e ao técnico Fernando, que sempre foram ouvidos e apoio nos momentos em que mais precisei. Aos professores José Maria e Cassinha, pelo incentivo e suporte desde o início desta pesquisa.

À minha estagiária Marília, que aceitou se aventurar comigo neste projeto, demonstrando competência e parceria constante. A toda a equipe do Laboratório de Embalagens — Laís, Samuel, Renata, Jairo, Bruna e Maria — pelo convívio e aprendizado compartilhado.

Aos meus amigos mineiros, que se tornaram minha família de coração e me acolheram com tanto carinho.

À Universidade Federal de Viçosa, instituição que me inspirou a dar o meu melhor através da excelência de seus profissionais, e ao Programa de Pós-Graduação de Ciência e Tecnologia de Alimentos, pela oportunidade de crescimento acadêmico. Como bem disse Marie Curie: “Devemos ter perseverança e, acima de tudo, confiança em nós mesmos. Devemos acreditar que somos dotados de algo e que isso deve ser alcançado.” Com este sentimento, finalizo este mestrado com o coração transbordando gratidão por tudo o que vivi. Esta jornada não foi apenas sobre ciência e pesquisa, mas sobre autodescoberta e superação. Encerro este ciclo levando comigo as memórias de cada desafio vencido, a alegria das amizades cultivadas e a certeza de que a dedicação transforma sonhos em realidade. Sigo para os próximos passos com a alma leve, fortalecida pelas experiências vividas e pronta para novos horizontes.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível

Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

MACHADO, Gabriela de Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **Substituição parcial de poli(ácido láctico) por microalgas para produção de filmes plásticos: uma abordagem sinérgica entre sustentabilidade e desempenho.** Orientadora: Nilda de Fatima Ferreira Soares. Coorientadora: Taila Veloso de Oliveira.

A transição para uma economia circular exige o desenvolvimento de materiais inovadores que possam substituir os plásticos de origem fóssil. Nesse contexto, o poli(ácido láctico) (PLA) consolidou-se como uma alternativa promissora devido à sua biodegradabilidade e origem renovável, embora suas limitações de barreira e fragilidade exijam a incorporação de aditivos. Simultaneamente, o cultivo de microalgas em águas residuais apresenta-se como uma estratégia sustentável de "custo-zero", capaz de tratar efluentes e gerar biomassa rica em compostos orgânicos. No capítulo 1, foi realizada uma revisão sistemática (PRISMA) para mapear a incorporação dessa biomassa residual em filmes poliméricos. O estudo revelou uma escassez crítica de literatura, evidenciando que esta interseção tecnológica é um campo incipiente, mas com potencial demonstrado para induzir biodegradabilidade e melhorar propriedades de barreira ao oxigênio em matrizes convencionais. No capítulo 2, analisou-se o estado da arte da incorporação de microalgas em matrizes de PLA. A revisão demonstrou que a biomassa atua como um aditivo multifuncional, capaz de modular propriedades mecânicas e conferir propriedades de embalagem ativa, como proteção UV e atividade antioxidante. No entanto, o estudo identificou desafios persistentes relacionados à compatibilidade interfacial entre a biomassa hidrofílica e a matriz hidrofóbica, além da necessidade de padronização metodológica para a transição comercial desses materiais. No capítulo 3, foi realizada a investigação experimental através do desenvolvimento e caracterização de filmes de PLA incorporados com biomassa de microalgas de águas residuais em concentrações de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. As análises estruturais e morfológicas sugeriram boa compatibilidade em baixas cargas, enquanto teores elevados (>20%) resultaram em maior hidrofiliidade do material. Os resultados mostraram que a substituição parcial do PLA modulou as propriedades físicas e ópticas, com destaque para o ensaio de biodegradabilidade, no qual o filme com 50% de biomassa atingiu 89% de degradação em 120 dias. Adicionalmente, testes antimicrobianos confirmaram a segurança biológica da biomassa residual. No geral, os estudos apresentados nesta dissertação confirmam a viabilidade técnica da biomassa de microalgas como carga funcional para o desenvolvimento de biocompósitos sustentáveis de ciclo de vida curto.

Palavras-chave: poli(ácido láctico); microalgas; águas residuais; biocompósitos; biodegradabilidade; economia circular

ABSTRACT

MACHADO, Gabriela de Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025.
Partial replacement of poly(lactic acid) with microalgae for the production of plastic films: a synergistic approach between sustainability and performance.
Adviser: Nilda de Fatima Ferreira Soares. Co-adviser: Taila Veloso de Oliveira.

The transition to a circular economy requires the development of innovative materials that can replace fossil-based plastics. In this context, poly(lactic acid) (PLA) has established itself as a promising alternative due to its biodegradability and renewable origin, although its barrier limitations and fragility require the incorporation of additives. Simultaneously, the cultivation of microalgae in wastewater presents itself as a sustainable “zero-cost” strategy, capable of treating effluents and generating biomass rich in organic compounds. In Chapter 1, a systematic review (PRISMA) was conducted to map the incorporation of this residual biomass into polymeric films. The study revealed a critical shortage of literature, highlighting that this technological intersection is an emerging field, but with demonstrated potential to induce biodegradability and improve oxygen barrier properties in conventional matrices. In Chapter 2, the state of the art of incorporating microalgae into PLA matrices was analyzed. The review demonstrated that biomass acts as a multifunctional additive, capable of modulating mechanical properties and conferring active packaging properties, such as UV protection and antioxidant activity. However, the study identified persistent challenges related to interfacial compatibility between hydrophilic biomass and hydrophobic matrix, as well as the need for methodological standardization for the commercial transition of these materials. In Chapter 3, experimental research was conducted through the development and characterization of PLA films incorporated with microalgae biomass from wastewater at concentrations of 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%. Structural and morphological analyses suggested good compatibility at low loads, while high contents (>20%) resulted in greater hydrophilicity of the material. The results showed that partial replacement of PLA modulated the physical and optical properties, with emphasis on the biodegradability test, in which the film with 50% biomass achieved 89% degradation in 120 days. Additionally, antimicrobial tests confirmed the biological safety of the residual biomass. Overall, the studies presented in this dissertation confirm the technical feasibility of microalgae biomass as a functional filler for the development of sustainable short-life-cycle biocomposites.

Keywords: poly(lactic acid) ; microalgae; wastewater; biocomposites;

biodegradability; circular economy

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	11
Referências	14
2. CAPÍTULO 1: MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUAS RESIDUAIS NO DESENVOLVIMENTO DE FILMES POLIMÉRICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	16
2.1. Introdução	17
2.2. Metodologia.....	19
2.3. Resultados	20
2.4. Discussão.....	23
2.5. Conclusão	26
Referências	27
3. CAPÍTULO 2: BIOCOMPÓSITOS À BASE DE POLI(ÁCIDO LÁCTICO) E MICROALGAS: O ESTADO DA ARTE SOBRE PROPRIEDADES, DESAFIOS DE PROCESSAMENTO E APLICAÇÕES	33
3.1. Introdução	34
3.2. Estratégia de Revisão e Escopo de Análise	36
3.3. Microalgas: Características e Potencial para Aplicações em Materiais Poliméricos.....	37
3.4. Filmes Poliméricos Incorporados com Microalgas: Polímeros Usados e Métodos de Produção.....	39
3.5. Efeitos da Incorporação de Microalgas nas Propriedades dos Filmes ...	44
3.5.1. Propriedades Mecânicas.....	44
3.5.2. Propriedades de Barreira	47
3.5.3. Propriedades Térmicas	48
3.5.4. Propriedades Ópticas	49
3.5.5. Propriedades Biodegradáveis.....	51
3.6. Soluções e Estratégias para Superar Desafios	53
3.7. Comparação Crítica entre Filmes de Microalgas e Plásticos Tradicionais	54
3.8. Análise Crítica e Limitações da Literatura Atual	55
3.9. Conclusão	57
Referências	58
4. CAPÍTULO 3: BIOPOLÍMERO À BASE DE MICROALGAS: UMA ESTRATÉGIA ECOLÓGICA PARA REDUZIR A DEPENDÊNCIA DO POLI(ÁCIDO LÁCTICO).....	67
4.1. Introdução	68
4.2. Materiais e métodos	70

4.2.1. Materiais	70
4.2.2. Preparação do filme	71
4.2.3. Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	71
4.2.4. Gramatura.....	71
4.2.5. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	72
4.2.6. Espessura e propriedades mecânicas	72
4.2.7. Análise de cor	73
4.2.8. Análise termogravimétrica (TGA).....	73
4.2.9. Permeabilidade ao vapor de água (PVA)	74
4.2.10. Índice de inchaço (II) e solubilidade do filme (SF)	74
4.2.11. Análise microbiológica.....	75
4.2.12. Biodegradabilidade	76
4.2.13. Análise estatística.....	76
4.3. Resultados e discussão.....	77
4.4. Conclusão	93
Referências	94
5. CONCLUSÃO GERAL	99

1. INTRODUÇÃO GERAL

A produção acumulada global de plásticos virgens (resinas, fibras e aditivos) atingiu aproximadamente 8.300 milhões de toneladas métricas até 2015. Desse volume, cerca de 42% dos plásticos não fibrosos foram utilizados para embalagens. O setor de embalagens é o que possui a menor vida útil de produto entre todos os setores, com a maior parte dos plásticos de embalagem deixando de ser usados no mesmo ano em que são produzidos (Geyer *et al.*, 2017). Este cenário tem gerado uma crise ambiental sem precedentes, caracterizada pelo acúmulo de resíduos plásticos persistentes nos oceanos, solos e aterros sanitários (Fulke; Bhanushali; Jadhav, 2025; Rangel-Buitrago; Gracia C., 2026). A urgência em substituir polímeros convencionais derivados de fontes fósseis não-renováveis por alternativas biodegradáveis e de origem renovável tornou-se, portanto, uma prioridade científica e industrial global.

Neste contexto, o PLA emerge como um dos biopolímeros mais promissores disponíveis comercialmente. Produzido através da fermentação bacteriana de carboidratos seguida de polimerização do ácido láctico, o PLA apresenta propriedades mecânicas comparáveis às do polipropileno e poliestireno, além de ser compostável sob condições controladas (Balla *et al.*, 2021). Sua transparência, processabilidade em equipamentos convencionais, e aprovação para contato alimentar o tornam particularmente atrativo para a indústria de embalagens. Entretanto, o PLA apresenta limitações que restringem sua aplicação em larga escala, incluindo fragilidade excessiva, baixa resistência ao impacto, propriedades de barreira inferiores ao vapor de água e oxigênio quando comparado a polímeros sintéticos, além de temperatura de distorção térmica relativamente baixa que limita seu uso em aplicações que exigem resistência ao calor (da Silva Pens *et al.*, 2024; Swetha *et al.*, 2023).

Simultaneamente, o crescimento populacional e a intensificação das atividades industriais têm gerado volumes crescentes de águas residuais urbanas e industriais, ricas em nutrientes como nitrogênio e fósforo, que quando descartadas inadequadamente causam eutrofização de corpos hídricos, proliferação de algas nocivas e degradação da qualidade da água (Brenckman

et al., 2025). Os sistemas convencionais de tratamento de efluentes, embora eficazes na remoção de carga orgânica e patógenos, frequentemente apresentam elevado consumo energético, produção de lodo residual problemático e remoção incompleta de nutrientes (Cardoso *et al.*, 2021; De Vrieze *et al.*, 2016). O cultivo de microalgas em águas residuais representa uma biotecnologia emergente que oferece solução integrada para esta problemática, realizando simultaneamente a fitorremediação através da assimilação de nutrientes em sua biomassa e a fixação fotossintética de dióxido de carbono atmosférico (Shahid *et al.*, 2020).

As microalgas são organismos fotossintetizantes unicelulares ou coloniais de crescimento rápido, capazes de duplicar sua biomassa em períodos de 24 a 48 horas sob condições adequadas de luz, temperatura e disponibilidade de nutrientes (Metsoviti *et al.*, 2019; Sánchez-Bayo *et al.*, 2020). Dependendo da espécie e das condições de cultivo, a biomassa algal pode conter entre 40-70% de proteínas, 20-50% de carboidratos, 10-40% de lipídios, além de pigmentos bioativos como clorofilas, carotenoides, ficobilinas e compostos fenólicos com propriedades antioxidantes reconhecidas (Andriopoulos *et al.*, 2022). Esta composição nutricional excepcional posiciona as microalgas não apenas como agentes de biorremediação, mas como fonte sustentável de biomoléculas de alto valor agregado.

Tradicionalmente, após o cultivo em águas residuais e posterior colheita por floculação, centrifugação ou filtração, a biomassa algal seca tem sido direcionada para aplicações como suplemento alimentar humano e animal, produção de biocombustíveis, fertilizantes orgânicos ou simplesmente descartada (Ezhumalai *et al.*, 2024; Mathimani; Pugazhendhi, 2019). No entanto, a incorporação desta biomassa como aditivo funcional em matrizes poliméricas biodegradáveis representa uma estratégia inovadora de valorização que permanece pouco explorada na literatura científica.

O desenvolvimento de filmes poliméricos de PLA incorporados com microalgas de águas residuais apresenta desafios técnicos e científicos que demandam investigação sistemática. A compatibilidade interfacial entre a matriz polimérica hidrofóbica do PLA e os componentes predominantemente hidrofílicos da biomassa algal constitui obstáculo fundamental que pode resultar em

aglomeração de partículas, formação de vazios e comprometimento das propriedades mecânicas (Melo *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2023). A heterogeneidade composicional das microalgas, que varia conforme a espécie utilizada e as condições de cultivo em efluentes, dificulta a padronização e reprodutibilidade das propriedades dos filmes (Buratti *et al.*, 2020; Weng *et al.*, 2025). A coloração naturalmente intensa conferida pelos pigmentos algais, embora potencialmente desejável em aplicações específicas, pode limitar a aceitação do material em mercados que demandam transparência ou cores específicas (Sun *et al.*, 2023). Adicionalmente, a possível presença de contaminantes microbiológicos ou metais pesados acumulados durante o processo de biorremediação requer avaliação rigorosa de segurança, particularmente se os filmes forem destinados a aplicações em contato com alimentos (Álvarez-González *et al.*, 2023).

Apesar destes desafios, a convergência entre a necessidade urgente de materiais de embalagem sustentáveis, a disponibilidade crescente de biomassa algal proveniente de sistemas de tratamento de águas residuais implementados globalmente e o avanço das tecnologias de processamento de biopolímeros cria uma janela de oportunidade única para o desenvolvimento desta inovação tecnológica. Neste contexto, o presente estudo propõe-se a investigar de forma abrangente a viabilidade do desenvolvimento de filmes poliméricos de PLA incorporados com biomassa de microalgas oriundas de águas residuais, avaliando as modificações nas propriedades físico-químicas, mecânicas, térmicas e de barreira do material resultante, bem como seu potencial de aplicação como material biodegradável.

Referências

ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, A. *et al.* The potential of wastewater grown microalgae for agricultural purposes: Contaminants of emerging concern, heavy metals and pathogens assessment. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 324, p. 121399, 2023.

ANDRIOPOULOS, V. *et al.* Total Phenolic Content, Biomass Composition, and Antioxidant Activity of Selected Marine Microalgal Species with Potential as Aquaculture Feed. **Antioxidants**, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 1320, 2022.

BALLA, E. *et al.* Poly(lactic Acid): A Versatile Biobased Polymer for the Future with Multifunctional Properties—From Monomer Synthesis, Polymerization Techniques and Molecular Weight Increase to PLA Applications. **Polymers**, [s. l.], v. 13, n. 11, p. 1822, 2021.

BRECKMAN, C. M. *et al.* A Review of Harmful Algal Blooms: Causes, Effects, Monitoring, and Prevention Methods. **Water**, [s. l.], v. 17, n. 13, p. 1980, 2025.

BURATTI, E. *et al.* Formation and Stability of Smooth Thin Films with Soft Microgels Made of Poly(N-Isopropylacrylamide) and Poly(Acrylic Acid). **Polymers**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 2638, 2020.

CARDOSO, B. J. *et al.* Energy performance factors in wastewater treatment plants: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 322, p. 129107, 2021.

DASILVAPENS, C. J. *et al.* Poly (lactic acid) and its improved properties by some modifications for food packaging applications: A review. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 41, p. 101230, 2024.

DE VRIEZE, J. *et al.* Thermophilic sludge digestion improves energy balance and nutrient recovery potential in full-scale municipal wastewater treatment plants. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 218, p. 1237–1245, 2016.

EZHUMALAI, G. *et al.* A Holistic Approach to Circular Bioeconomy Through the Sustainable Utilization of Microalgal Biomass for Biofuel and Other Value-Added Products. **Microbial Ecology**, [s. l.], v. 87, n. 1, p. 61, 2024.

FULKE, A. B.; BHANUSHALI, S.; JADHAV, H. Global Marine Plastic Pollution: Sources, Distribution, Implications on human health and mitigation strategies. **Continental Shelf Research**, [s. l.], p. 105578, 2025.

GEYER, R. *et al.* Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, [s. l.], v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.

MATHIMANI, T.; PUGAZHENDHI, A. Utilization of algae for biofuel, bio-products and bio-remediation. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 17, p. 326–330, 2019.

MELO, P. M. A. *et al.* High-density polyethylene/mollusk shell-waste composites: effects of particle size and coupling agent on morphology, mechanical and

thermal properties. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 1915–1925, 2019.

METSOVITI, M. N. *et al.* Comparison of Growth Rate and Nutrient Content of Five Microalgae Species Cultivated in Greenhouses. **Plants**, [s. l.], v. 8, n. 8, p. 279, 2019.

RANGEL-BUITRAGO, N.; GRACIA C., A. Remote beaches as plastic hotspots: Pollution patterns and management implications. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 223, p. 119017, 2026.

SÁNCHEZ-BAYO, A. *et al.* Cultivation of Microalgae and Cyanobacteria: Effect of Operating Conditions on Growth and Biomass Composition. **Molecules**, [s. l.], v. 25, n. 12, p. 2834, 2020.

SHAHID, A. *et al.* Cultivating microalgae in wastewater for biomass production, pollutant removal, and atmospheric carbon mitigation; a review. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 704, p. 135303, 2020.

SUN, H. *et al.* Microalgae-Derived Pigments for the Food Industry. **Marine Drugs**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 82, 2023.

SWETHA, T. A. *et al.* A comprehensive review on polylactic acid (PLA) – Synthesis, processing and application in food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 234, p. 123715, 2023.

WENG, Q.-H. *et al.* Enhancing the Flexibility and Hydrophilicity of PLA via Polymer Blends: Electrospinning vs. Solvent Casting. **Polymers**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 800, 2025.

YANG, J. H. *et al.* Dispersion of unfractionated microalgae in various polymers and its influence on rheological and mechanical properties. **Korea-Australia Rheology Journal**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 19–29, 2023.

2. CAPÍTULO 1: MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUAS RESIDUAIS NO DESENVOLVIMENTO DE FILMES POLIMÉRICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

RESUMO

A transição para uma economia circular exige materiais inovadores para substituir os plásticos derivados de fontes fósseis. Os biocompósitos de microalgas representam uma fronteira promissora, e seu cultivo em águas residuais oferece uma rota de produção de "custo-zero" que simultaneamente trata efluentes e gera biomassa. Contudo, a aplicação desta biomassa específica em filmes poliméricos permanece largamente inexplorada, particularmente quanto ao seu impacto em propriedades críticas para embalagens de alimentos. Esta revisão sistemática teve como objetivo mapear e sintetizar as evidências científicas sobre a incorporação de microalgas cultivadas em águas residuais no desenvolvimento de filmes poliméricos, avaliando seus efeitos nas propriedades mecânicas, de barreira e de biodegradabilidade. Seguindo as diretrizes PRISMA 2020, foi realizada uma busca sistemática nas bases de dados Scopus e Web of Science (2022-2025). Critérios de elegibilidade rigorosos foram aplicados, exigindo estudos que produzissem filmes, utilizassem biomassa derivada de águas residuais, avaliassem as propriedades-alvo e incluíssem um grupo controle de polímero puro. O processo de triagem de 31 registros identificados resultou na inclusão de um único estudo elegível. Onde foi investigado compósitos de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e biomassa de algas (AB). Seus achados indicaram que a AB, embora tenha aumentado drasticamente a taxa de transmissão de vapor de água (TPVA), também melhorou de forma sem precedentes a barreira ao oxigênio. Mais criticamente, a biomassa induziu a biodegradabilidade (8% de perda de massa em 30 dias) no PEBD, que de outra forma não seria biodegradável, um fenômeno ausente no controle puro. O principal achado desta revisão é a extrema escassez de evidências, demonstrando que a interseção da fitorremediação com o desenvolvimento de filmes poliméricos é um campo de pesquisa

comprovadamente incipiente. O único artigo incluído atua como um estudo de caso fundamental, revelando *trade-offs* de engenharia complexos e confirmando o potencial desta biomassa residual para quebrar a inércia biológica de polímeros convencionais.

Palavras-chave: Águas residuais; Biocompósitos; Microalgas.

2.1. Introdução

A atual matriz produtiva global, baseada em um modelo linear de "extrair-produzir-descartar", gerou desafios ambientais críticos, sendo a poluição por plásticos um dos mais visíveis. A vasta maioria dos plásticos convencionais deriva de fontes fósseis, não é biodegradável e persiste no ambiente por centenas de anos, fragmentando-se em microplásticos que contaminam ecossistemas aquáticos e terrestres e entram na cadeia alimentar (Fulke; Bhanushali; Jadhav, 2026). Em resposta, há uma pressão científica e social por uma transição urgente para a economia circular, um sistema regenerativo que visa eliminar resíduos e manter materiais em ciclos de uso de alto valor (Velenturf; Purnell, 2021).

Nesta transição, os materiais de base biológica, como biocompósitos, representam pilares fundamentais. Os biocompósitos, especificamente, são materiais híbridos formados pela incorporação de uma carga ou reforço de origem natural, como fibras ou biomassa, em uma matriz polimérica. Esta abordagem não só reduz a dependência de polímeros petroquímicos, mas também pode conferir aos materiais propriedades desejáveis, como menor densidade, custo reduzido e, crucialmente, a capacidade de se biodegradar ao final da vida útil (Costa *et al.*, 2024; Kumar; Jyske; Möttönen, 2020; Pokharel *et al.*, 2022; Shanmugam *et al.*, 2021).

A busca por cargas sustentáveis e de baixo custo para esses biocompósitos tem se voltado para as microalgas. Estes microrganismos fotossintéticos são considerados uma das fontes de biomassa mais promissoras do planeta. Sua produtividade supera em ordens de grandeza a das culturas

terrestres, possuem taxas de crescimento exponenciais, não requerem terras aráveis (podendo ser cultivadas em fotobiorreatores ou lagoas abertas) e atuam como eficientes sequestradoras de CO₂ atmosférico (Fabris *et al.*, 2020; Ighalo *et al.*, 2022; Prasad *et al.*, 2021). Além disso, sua biomassa é uma rica plataforma bioquímica, contendo altas frações de proteínas, carboidratos e lipídios, que podem interagir de diferentes formas com as matrizes poliméricas (Panchal; Heimann; Brown, 2024).

O diferencial central desta pesquisa reside na origem dessa biomassa: o cultivo de microalgas em águas residuais (efluentes industriais ou domésticos). Esta abordagem é uma solução de dupla vantagem que alinha produção e saneamento (Abdelfattah *et al.*, 2023; Chai *et al.*, 2021). As microalgas utilizam os poluentes presentes nos efluentes, notadamente compostos de nitrogênio e fósforo, como nutrientes para seu crescimento (Song *et al.*, 2022). Ao fazer isso, elas simultaneamente tratam a água, reduzindo a carga poluente e prevenindo a eutrofização dos corpos d'água receptores, enquanto geram uma biomassa de custo virtualmente nulo, pois dispensa o uso de fertilizantes químicos e água potável (Singh *et al.*, 2021). Este processo transforma um passivo ambiental (efluente) em um ativo valorizado (biomassa).

A aplicação desta biomassa específica em filmes e revestimentos poliméricos é uma fronteira de grande interesse. Filmes são essenciais em embalagens de alimentos, onde as propriedades de barreira ao oxigênio e ao vapor de água são críticas para a conservação do produto, e em aplicações agrícolas, como filmes *mulching* biodegradáveis que auxilia na conservação da umidade, no controle da temperatura e do crescimento de ervas daninhas (Nguyen *et al.*, 2021; Somanathan *et al.*, 2022). A incorporação da biomassa de microalgas pode atuar como um reforço (Kim, J. H. *et al.*, 2023).

Apesar deste enorme potencial, a literatura científica que converge todos esses elementos ainda é incipiente. Embora existam estudos sobre biocompósitos e sobre o cultivo de microalgas em águas residuais, a conexão entre o uso desta biomassa específica (de efluentes) para o desenvolvimento de filmes e a avaliação de suas propriedades (mecânicas, de barreira e biodegradabilidade) ainda não foi consolidada. A compreensão de como os

resíduos de cultivo e a composição celular única dessas microalgas afetam o desempenho do material final é uma lacuna que precisa ser preenchida.

Diante desse contexto, esta revisão sistemática tem como objetivo sintetizar as evidências científicas sobre a incorporação de microalgas cultivadas em águas residuais no desenvolvimento de filmes poliméricos. A questão da pesquisa central, estruturada segundo o *framework* PICO, questiona se a adição de biomassa microalgal proveniente de efluentes (intervenção) em matrizes poliméricas formadoras de filmes (população) altera as propriedades mecânicas, de barreira, térmicas e a biodegradabilidade (desfechos) quando comparada a polímeros puros ou a filmes contendo microalgas de cultivos convencionais (comparação), e se os materiais resultantes apresentam viabilidade técnica para aplicações em embalagens ou agricultura. Esta abordagem permite avaliar simultaneamente dois aspectos críticos da sustentabilidade: a valorização de águas residuais como meio de cultivo para produção de biomassa, contribuindo para biorremediação de efluentes; e o desenvolvimento de materiais poliméricos com propriedades adequadas ou funcionalizadas, potencialmente substituindo plásticos convencionais em aplicações específicas.

2.2. Metodologia

Esta revisão sistemática foi conduzida de acordo com as diretrizes PRISMA 2020. O protocolo da revisão não foi registrado previamente.

Foram definidos critérios de elegibilidade claros para selecionar os estudos. Buscamos artigos (publicados entre 2022 e 2025, em inglês ou português) que investigaram filmes ou revestimentos poliméricos contendo biomassa de microalgas cultivadas em águas residuais. Para ser incluído, era obrigatório que o estudo comparasse o material com um grupo controle (o polímero puro). Os artigos precisavam avaliar ao menos uma destas três propriedades: mecânicas, de barreira ou biodegradabilidade. Foram excluídos estudos que usaram apenas extratos de algas (sem a biomassa), materiais que não formavam filmes, estudos sem grupo controle, além de teses, patentes e resumos de conferência.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Scopus (Elsevier) e Web of Science (Clarivate Analytics), com a última busca realizada em 26 de outubro de 2025. A estratégia de busca foi desenvolvida e executada por um autor, combinando termos-chave para os conceitos centrais: "polímeros", "microalgas", "águas residuais" e "filmes".

Todo o processo de seleção e extração foi feito por um único autor. Primeiro, os registros identificados foram importados para o Zotero para a remoção automática de duplicatas. Em seguida, o autor avaliou os artigos em duas fases: (1) triagem por título e resumo e (2) análise do texto completo dos artigos potencialmente elegíveis. Os motivos de exclusão de cada artigo foram documentados. Para a extração dos dados, foi utilizado um formulário padronizado em planilha, focado em coletar informações sobre a identificação do estudo, características do cultivo, processamento do filme, propriedades avaliadas e resultados principais.

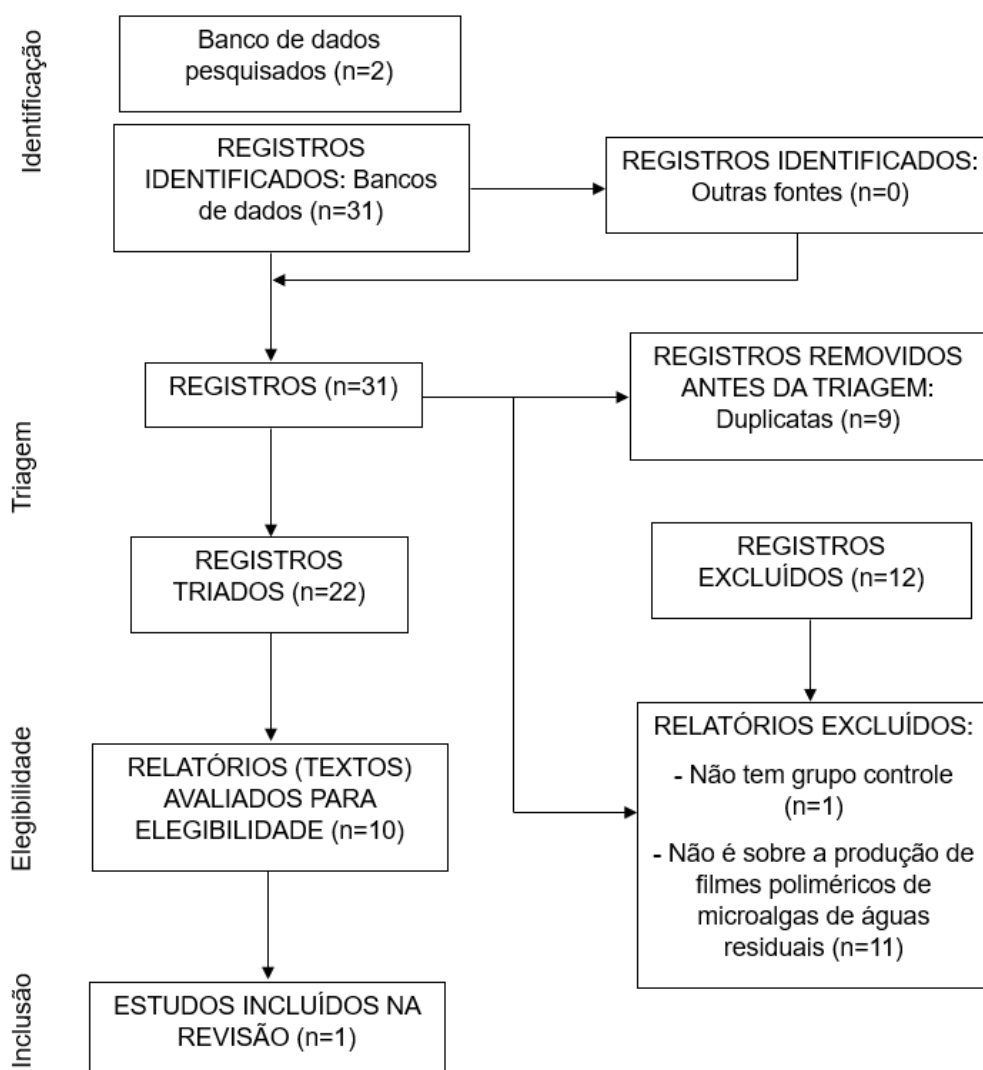
O autor também avaliou o risco de viés dos estudos incluídos. Como os estudos são de natureza laboratorial, foi usada uma ferramenta adaptada para verificar a qualidade de domínios críticos, como a padronização dos métodos, a correta utilização do grupo controle e a reprodutibilidade dos materiais.

Os resultados foram organizados em tabelas e apresentados em uma síntese narrativa. Não foi realizada uma meta-análise (cálculo estatístico combinado) devido à alta heterogeneidade encontrada entre os estudos (diferenças grandes nos tipos de polímeros, espécies de algas e métodos de teste), o que tornaria uma média estatística inadequada. A síntese narrativa focou em descrever as características gerais dos estudos, mapear os efeitos da incorporação das microalgas nas propriedades dos filmes, comparar diferentes abordagens e identificar as principais lacunas de conhecimento no campo. A certeza da evidência não foi avaliada formalmente.

2.3. Resultados

Com base na metodologia PRISMA 2020 e nos critérios de elegibilidade definidos, o fluxograma (Figura 1) ilustra um processo de seleção de estudos altamente focado e rigoroso. O processo iniciou-se com a identificação de 31 registros em duas bases de dados (Scopus e Web of Science, conforme a metodologia). Após a remoção de 9 duplicatas, 22 artigos únicos foram triados. Nesta fase de triagem (análise de título e resumo), 12 registros foram excluídos. Os 10 artigos restantes avançaram para a avaliação do texto completo. Foi nesta fase de elegibilidade que o rigor dos critérios teve maior impacto: a exigência de que os estudos usassem biomassa de microalgas cultivadas em águas residuais e incluíssem um grupo controle de polímero puro levou à exclusão de 9 desses 10 artigos. Ao final do processo, apenas um único estudo foi considerado elegível e, portanto, incluído na síntese narrativa da revisão.

Figura 1. Fluxograma do processo de seleção de estudos da revisão sistemática.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O único estudo incluído foi "*Innovative Bioplastics: Harnessing Microalgae and Low-Density Polyethylene for Sustainable Production*", publicado por Abdo *et al.* (2025). Este artigo alinhou-se perfeitamente aos critérios da revisão, pois investigou a fabricação de filmes bioplásticos misturando Polietileno de Baixa Densidade (LDPE) com biomassa de microalgas (AB) em concentrações variando de 12,5% a 50%. Crucialmente, a biomassa de microalgas foi cultivada em um lago de algas de alta taxa usado especificamente para o tratamento de águas residuais, e os compósitos foram comparados com um controle de LDPE puro (0% AB). O estudo também abordou as três categorias de propriedades exigidas pela revisão: mecânicas, de barreira e de biodegradabilidade.

Em relação aos resultados detalhados, Abdo *et al.* (2025) reportaram uma relação complexa para as propriedades mecânicas. A adição de 12,5% de biomassa de algas reduziu a resistência à tração para 4,63 MPa, em comparação com os 15,5 MPa do LDPE puro. No entanto, um aumento na concentração de biomassa para 25% e 37,5% resultaram em uma melhoria nas propriedades mecânicas em relação à amostra de 12,5%, atingindo a resistência a tração de 6,75 MPa e 7 MPa, respectivamente. Os autores atribuíram isso a uma melhor miscibilidade e interação entre a biomassa e a matriz de LDPE nessas concentrações intermediárias. Nas propriedades de barreira, observou-se um *trade-off* claro: a taxa de transmissão de vapor de água (TPVA) aumentou drasticamente com a adição de biomassa, indicando uma barreira à umidade inferior. Por outro lado, a barreira ao oxigênio melhorou: enquanto o LDPE puro teve uma taxa de 232,68 cc/m².dia, todas as amostras contendo biomassa de algas registraram uma taxa de 0,0 cc/m².dia.

No que tange à biodegradabilidade, o estudo confirmou o impacto positivo da biomassa. Utilizando um teste de enterramento no solo, os autores observaram que, enquanto o LDPE puro não mostrou degradação, os compósitos LDPE/AB apresentaram uma taxa de biodegradação mensurável que aumentou com a concentração de biomassa. Após 30 dias, o filme com 50% de biomassa atingiu uma taxa de degradação de 8%. Embora os autores classifiquem essa taxa como "fraca", ela representa uma melhoria fundamental em comparação com o PEBD convencional, que é inerentemente resistente à degradação. O estudo também destacou a não toxicidade da biomassa de algas proveniente das águas residuais e apresentou uma análise de viabilidade econômica que sugeriu um promissor retorno sobre o investimento de 46,0% para a produção, reforçando o potencial da abordagem.

2.4. Discussão

O principal achado desta revisão sistemática não reside nos resultados de um único artigo, mas no fato de que apenas um estudo atendeu aos critérios de elegibilidade. Isso demonstra que o campo de filmes poliméricos com biomassa

de microalgas cultivadas em águas residuais é profundamente incipiente. O estudo de Abdo *et al.* (2025) serve, portanto, não como uma resposta definitiva, mas como um estudo de caso fundamental que expõe os desafios complexos e as oportunidades inesperadas desta abordagem. A interpretação dos resultados deste estudo revela uma série de *trade-offs* críticos para o desenvolvimento de futuros materiais.

O significado mais impactante da incorporação da biomassa de microalgas refere-se à biodegradabilidade. O PEBD é um polímero sintético notoriamente resistente à degradação (Merchant; Mande; Sar, 2025). Portanto, o fato de a adição de 50% de biomassa ter induzido uma perda de massa de 8% em 30 dias, embora classificada pelos próprios autores como "fraca", é um resultado conceitualmente significativo. Isso sugere que a biomassa atua como um "iniciador" biológico; ela provavelmente serve como um substrato nutritivo para os microrganismos do solo, que então começam a colonizar e a decompor a matriz do compósito (Bumbac *et al.*, 2024; Zaharescu; Bumbac; Nicolescu, 2024b). O valor não está no percentual de 8%, mas na demonstração de que esta biomassa específica, proveniente de águas residuais, pode efetivamente quebrar a inércia biológica do PEBD.

Da mesma forma, as propriedades mecânicas indicam uma relação não linear complexa. A queda na resistência à tração com 12,5% de AB sugere que, em baixas concentrações, a biomassa atua como um contaminante, criando falhas na matriz de PEBD. Contudo, a melhoria observada em concentrações de 25% e 37,5% é contraintuitiva e promissora. Isso implica que existe um "ponto ideal" de formulação onde a biomassa deixa de ser um defeito e passa a atuar como um enchimento, possivelmente melhorando a interação interfacial e a compatibilidade (Moharir; Kumar, 2021).

Talvez o *trade-off* mais claro para aplicações práticas esteja nas propriedades de barreira. O estudo revelou que os filmes são, simultaneamente, uma péssima barreira à umidade e uma barreira perfeita ao oxigênio. A interpretação prática disso para a indústria de embalagens é crucial: este material seria totalmente inadequado para produtos líquidos ou úmidos, que perderiam água rapidamente. No entanto, ele seria um candidato ideal para embalar produtos secos e altamente sensíveis à oxidação, como café, *snacks*

ou componentes eletrônicos, onde a prevenção da entrada de oxigênio é o requisito crítico (Cainglet *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2018).

Apesar desses resultados promissores, é fundamental contextualizá-los dentro das limitações significativas desta revisão. A limitação mais crítica é a da própria evidência disponível: a aplicação rigorosa dos critérios de elegibilidade resultou na inclusão de apenas um único estudo. Isso significa que quaisquer generalizações devem ser feitas com extrema cautela. Os achados de Abdo *et al.* (2025) são específicos para um compósito de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) misturado com uma biomassa de algas cultivada em águas residuais. Não há evidências que permitam afirmar se esses efeitos, como a drástica melhoria na barreira de oxigênio, seriam replicáveis com outros polímeros ou com biomassas de algas de composições distintas. O campo de "filmes poliméricos com biomassa de microalgas de águas residuais" é, portanto, comprovadamente incipiente.

Além das limitações da evidência, esta revisão sistemática possui limitações em seu próprio processo, que devem ser declaradas com transparência. Conforme a metodologia, o protocolo da revisão não foi registrado previamente em uma plataforma como a PROSPERO. Adicionalmente, todo o processo de seleção dos estudos, extração de dados e avaliação do risco de viés foi realizado por um único autor. Embora isso seja comum em trabalhos acadêmicos com recursos limitados, a ausência de um segundo revisor para validação cruzada aumenta o risco potencial de erros ou vieses na seleção e interpretação dos artigos.

As lacunas identificadas por estas limitações apontam diretamente para as implicações de pesquisas futuras, que são vastas. A primeira necessidade imediata é a replicação; o estudo de Abdo *et al.* (2025) precisa ser replicado por outros grupos de pesquisa para validar seus achados sobre PEBD. A segunda grande lacuna é a exploração de novos polímeros: como essa biomassa de águas residuais, que é um resíduo de baixo custo, se comportaria ao ser incorporada em matrizes poliméricas que já são biodegradáveis? Ela atuaria como um acelerador de biodegradação ou prejudicaria suas propriedades mecânicas e de barreira?

Adicionalmente, o tipo de biomassa é um fator crítico. O estudo incluído utilizou um consórcio dominado por *Microcystis*. São necessários estudos que investiguem o uso de outras espécies de algas comumente encontradas em águas residuais, cujas diferentes composições bioquímicas (teor de proteína, lipídios e carboidratos) certamente impactarão de forma diferente as propriedades finais do filme. Por fim, o horizonte temporal da biodegradação precisa ser expandido. O teste de enterramento no solo de 30 dias, que resultou em 8% de degradação, é insuficiente para entender o destino do material. São cruciais testes de longo prazo (6 meses a 1 ano) para determinar se a degradação continua até a mineralização completa ou se ela se estabiliza após a decomposição da fração orgânica.

2.5. Conclusão

Esta revisão sistemática buscou consolidar o conhecimento sobre uma solução de economia circular de via dupla: a valorização da biomassa de microalgas, cultivada no tratamento de águas residuais, como um aditivo funcional em filmes poliméricos. A pergunta de pesquisa central questionava como essa biomassa específica impactaria as propriedades críticas (mecânicas, de barreira, biodegradabilidade) dos filmes resultantes.

A resposta mais direta a esta pergunta, após uma investigação metodológica rigorosa, é que o conhecimento científico consolidado sobre este tópico ainda não existe.

O principal resultado deste trabalho não foi uma síntese de múltiplos estudos, mas a constatação de que o campo é novo. A aplicação dos critérios de elegibilidade resultou em um estudo relevante. Este achado, em si, é a contribuição central da revisão, pois expõe uma lacuna profunda entre o vasto potencial teórico da abordagem e sua execução prática documentada.

O estudo de caso com PEBD, embora isolado, serve como um farol para futuras investigações. Ele demonstra que a biomassa de águas residuais não é um mero enchimento passivo, mas um agente complexo. Ele prova que essa

biomassa é capaz de induzir *trade-offs* de engenharia inesperados e, mais importante, de iniciar a biodegradação em um polímero sintético.

As implicações para pesquisas futuras são vastas e claras. A necessidade mais urgente é a expansão para além do PEBD, investigando como esta biomassa de baixo custo interage com matrizes poliméricas já biodegradáveis, onde poderia atuar como um acelerador de degradação. Além disso, é crucial explorar diferentes espécies de microalgas, validar os achados do estudo pioneiro e conduzir avaliações de biodegradabilidade de longo prazo que determinem o destino do material.

Esta revisão, portanto, conclui que esta abordagem representa uma interseção crítica e vasta. Ela une a ciência e tecnologia, através da sua busca urgente por embalagens sustentáveis, com a engenharia de fitorremediação e a ciência dos materiais poliméricos, formando um território científico promissor e ainda largamente inexplorado.

Referências

ABDELFATTAH, A. *et al.* Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. **Environmental Science and Ecotechnology**, [s. l.], v. 13, p. 100205, 2023.

ABDO, S. M. *et al.* Processing and characterization of antimicrobial bioplastic films based on green microalgae *Scenedesmus obliquus* extract-loaded polyurethane. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 257, p. 128711, 2024.

BALTI, R. *et al.* Development and characterization of bioactive edible films from spider crab (*Maja crispata*) chitosan incorporated with *Spirulina* extract. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 105, p. 1464–1472, 2017.

BERTSCH, P. Proteins from microalgae for the stabilization of fluid interfaces, emulsions, and foams. [s. l.], 2021.

BRDLÍK, P. *et al.* The Influence of Plasticizers and Accelerated Ageing on Biodegradation of PLA under Controlled Composting Conditions. **Polymers**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 140, 2022.

BUMBAC, M. *et al.* Biodegradation Study of Styrene–Butadiene Composites with Incorporated *Arthrospira platensis* Biomass. **Polymers**, [s. l.], v. 16, n. 9, p. 1218, 2024.

CAINGLET, H. E. *et al.* Can pure cellulose nanofibril films replace polyolefins as water vapor barriers in packaging?. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 678, p. 547–555, 2025.

CARISSIMI, M.; FLÔRES, S. H.; RECH, R. Effect of microalgae addition on active biodegradable starch film. **Algal Research**, [s. l.], v. 32, p. 201–209, 2018.

CHAI, W. S. *et al.* Multifaceted roles of microalgae in the application of wastewater biotreatment: A review. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 269, p. 116236, 2021.

CHENTIR, I. *et al.* Biofunctional gelatin-based films incorporated with food grade phycocyanin extracted from the Saharian cyanobacterium *Arthrospira* sp. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 89, p. 715–725, 2019.

COSTA, M. R. *et al.* Toward the Production of Hydroxyapatite/Poly(Ether-Ether-Ketone) (PEEK) Biocomposites: Exploring the Physicochemical, Mechanical, Cytotoxic and Antimicrobial Properties. **Polymers**, [s. l.], v. 16, n. 17, p. 2520, 2024.

DI CAPRIO, F. *et al.* Exploring different processes for starch extraction from microalgae and synthesis of starch-chitosan plastic films. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 413, p. 131516, 2024.

DOLGANYUK, V. *et al.* Microalgae: A Promising Source of Valuable Bioproducts. **Biomolecules**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1153, 2020.

FABRIS, M. *et al.* Emerging Technologies in Algal Biotechnology: Toward the Establishment of a Sustainable, Algae-Based Bioeconomy. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 11, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.00279/full>. Acesso em: 6 nov. 2025.

FULKE, A. B.; BHANUSHALI, S.; JADHAV, H. S. Global marine plastic pollution: Sources, distribution, implications on human health and mitigation strategies. **Continental Shelf Research**, [s. l.], v. 296, p. 105578, 2026.

IGHALO, J. O. *et al.* Avanços na aplicação de microalgas para o sequestro de CO₂. **Cleaner Chemical Engineering**, [s. l.], v. 3, p. 100044, 2022.

JIN, K. *et al.* Polylactic acid based biocomposite films reinforced with silanized nanocrystalline cellulose. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 162, p. 1109–1117, 2020.

KIM, M. *et al.* Enhancing Microalgae Content in Biocomposites through a Mechanical Grinding Method. **Polymers**, [s. l.], v. 15, n. 23, p. 4557, 2023.

KIM, J. H. *et al.* Microalgas derivadas de CO₂ como carga de biomassa para fabricação de compósitos verdes. **Materials Today Sustainability**, [s. l.], v. 24, p. 100582, 2023.

KUMAR, A.; JYSKE, T.; MÖTTÖNEN, V. Properties of Injection Molded Biocomposites Reinforced with Wood Particles of Short-Rotation Aspen and Willow. **Polymers**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 257, 2020.

LIANG, X. *et al.* Recent advancements and perspectives on processable natural biopolymers: Cellulose, chitosan, eggshell membrane, and silk fibroin. **Science Bulletin**, [s. l.], v. 69, n. 21, p. 3444–3466, 2024.

MATHIOT, C. *et al.* Microalgae starch-based bioplastics: Screening of ten strains and plasticization of unfractionated microalgae by extrusion. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 208, p. 142–151, 2019.

MERCHANT, M.; MANDE, S. S.; SAR, P. Microbial community enrichment and transition in landfill for the biotransformation of unpretreated low-density polyethylene (LDPE) under aerobic and anaerobic conditions. **Chemosphere**, [s. l.], v. 382, p. 144429, 2025.

MOBIN, S.; ALAM, F. Some Promising Microalgal Species for Commercial Applications: A review. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 110, p. 510–517, 2017.

MOHAMADZADE, S. *et al.* Application of cellulose/poly(vinylidene fluoride) blend films as polymer electrolytes in lithium ion batteries. **Heliyon**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. e42546, 2025.

MOHARIR, R. V.; KUMAR, S. Structural characterization of LDPE films to analyse the impact of heavy metals and effect of UV pre-treatment on polymer degradation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 298, p. 126670, 2021.

MORAIS JUNIOR, W. G. *et al.* Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing. **Aquaculture**, [s. l.], v. 528, p. 735562, 2020.

MOREIRA, A. S. P. *et al.* Potential of Coccolithophore Microalgae as Fillers in Starch-Based Films for Active and Sustainable Food Packaging. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 513, 2023.

NAYANATHARA THATHSARANI PILAPITIYA, P. G. C.; RATNAYAKE, A. S. The world of plastic waste: A review. **Cleaner Materials**, [s. l.], v. 11, p. 100220, 2024.

NGUYEN, H.-L. *et al.* Biorenewable, transparent, and oxygen/moisture barrier nanocellulose/nanochitin-based coating on polypropylene for food packaging applications. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 271, p. 118421, 2021.

OCCHIPINTI, P. S. *et al.* Current challenges of microalgae applications: exploiting the potential of non-conventional microalgae species. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 104, n. 7, p. 3823–3833, 2024.

O'LOUGHLIN, J. *et al.* The Potential of Bio-Based Polylactic Acid (PLA) as an Alternative in Reusable Food Containers: A Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 21, p. 15312, 2023.

PANCHAL, S. K.; HEIMANN, K.; BROWN, L. Improving Undernutrition with Microalgae. **Nutrients**, [s. l.], v. 16, n. 18, p. 3223, 2024.

PATEL, G.; MINKO, T. Miscibility, phase behavior, and mechanical properties of copovidone/HPMC ASLF and copovidone/Eudragit EPO polymer blends for hot-melt extrusion and 3D printing applications. **International Journal of Pharmaceutics**, [s. l.], v. 670, p. 125124, 2025.

POKHAREL, A. *et al.* Biobased Polymer Composites: A Review. **Journal of Composites Science**, [s. l.], v. 6, n. 9, p. 255, 2022.

PRASAD, R. *et al.* Role of Microalgae in Global CO₂ Sequestration: Physiological Mechanism, Recent Development, Challenges, and Future Prospective. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 23, p. 13061, 2021.

QIAO, D. *et al.* Enhancing thermal stability and mechanical resilience in gelatin/starch composites through polyvinyl alcohol integration. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 344, p. 122528, 2024.

RAZZAQ, S.; SHAHID, S.; NAWAB, Y. Applications and environmental impact of biodegradable polymers in textile industry: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 282, p. 136791, 2024.

RIZAL, S. *et al.* Properties and Characterization of Lignin Nanoparticles Functionalized in Macroalgae Biopolymer Films. **Nanomaterials**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 637, 2021.

RIZAL, S. *et al.* Properties of Macroalgae Biopolymer Films Reinforcement with Polysaccharide Microfibre. **Polymers**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 2554, 2020.

ROJAS, A. *et al.* Active PLA Packaging Films: Effect of Processing and the Addition of Natural Antimicrobials and Antioxidants on Physical Properties, Release Kinetics, and Compostability. **Antioxidants**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 1976, 2021.

ROJAS-VILLALTA, D. *et al.* Exploring Extremotolerant and Extremophilic Microalgae: New Frontiers in Sustainable Biotechnological Applications. **Biology**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 712, 2024.

SATCHANSKA, G.; DAVIDOVA, S.; PETROV, P. D. Natural and Synthetic Polymers for Biomedical and Environmental Applications. **Polymers**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 1159, 2024.

SHAFQAT, A. *et al.* A review on environmental significance carbon foot prints of starch based bio-plastic: A substitute of conventional plastics. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 27, p. 101540, 2020.

SHAHID, A. *et al.* Cultivating microalgae in wastewater for biomass production, pollutant removal, and atmospheric carbon mitigation; a review. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 704, p. 135303, 2020.

SHAHID, A. *et al.* Impact of wastewater cultivation on pollutant removal, biomass production, metabolite biosynthesis, and carbon dioxide fixation of newly isolated cyanobacteria in a multiproduct biorefinery paradigm. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 333, p. 125194, 2021.

SHANMUGAM, V. *et al.* Economia circular no desenvolvimento de biocompósitos: estado da arte, desafios e tendências emergentes. **Composites Part C: Open Access**, [s. l.], v. 5, p. 100138, 2021.

SIDDIQUI, M. A. S. *et al.* Biodegradable natural polymers and fibers for 3D printing: A holistic perspective on processing, characterization, and advanced applications. **Cleaner Materials**, [s. l.], v. 14, p. 100275, 2024.

SINGH, D. V. *et al.* Microalgae in aquatic environs: A sustainable approach for remediation of heavy metals and emerging contaminants. **Environmental Technology & Innovation**, [s. l.], v. 21, p. 101340, 2021.

SINGH, G.; PATIDAR, S. K. Microalgae harvesting techniques: A review. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 217, p. 499–508, 2018.

SMITH, O.; BRISMAN, A. Plastic Waste and the Environmental Crisis Industry. **Critical Criminology**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 289–309, 2021.

SOMANATHAN, H. *et al.* An update on polyethylene and biodegradable plastic mulch films and their impact on the environment. **Chemosphere**, [s. l.], v. 307, p. 135839, 2022.

SONG, Y. *et al.* The promising way to treat wastewater by microalgae: Approaches, mechanisms, applications and challenges. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 49, p. 103012, 2022.

SWETHA, T. A. *et al.* A comprehensive review on polylactic acid (PLA) – Synthesis, processing and application in food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 234, p. 123715, 2023.

TRIPATHI, S. *et al.* Carbon capture, storage, and usage with microalgae: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 2085–2128, 2023.

UDAYAKUMAR, G. P. *et al.* Biopolymers and composites: Properties, characterization and their applications in food, medical and pharmaceutical industries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 105322, 2021.

UDAYAN, A. *et al.* Mass cultivation and harvesting of microalgal biomass: Current trends and future perspectives. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 344, p. 126406, 2022.

VELENTURF, A. P. M.; PURNELL, P. Principles for a sustainable circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 27, p. 1437–1457, 2021.

VENKATACHALAM, V.; SPIERLING, S.; ENDRES, H.-J. Recyclable, but not recycled—an indicator to quantify the environmental impacts of plastic waste disposal. **Frontiers in Environmental Science**, [s. l.], v. 12, p. 1316530, 2024.

WANG, J. *et al.* Moisture and Oxygen Barrier Properties of Cellulose Nanomaterial-Based Films. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 49–70, 2018.

XU, P. *et al.* Recent advances in CO₂ fixation by microalgae and its potential contribution to carbon neutrality. **Chemosphere**, [s. l.], v. 319, p. 137987, 2023.

YAN, C. *et al.* Cellulose/microalgae composite films prepared in ionic liquids. **Algal Research**, [s. l.], v. 20, p. 135–141, 2016.

YIN, B.; HE, Q.; YE, L. Effects of deposition speed and extrusion temperature on fusion between filaments in single-layer polymer films printed with FFF. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 270–276, 2021.

ZAHARESCU, T.; BUMBAC, M.; NICOLESCU, C. M. Stability effects of added biomass on microalgae styrene–butadiene–styrene composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], v. 149, n. 19, p. 10793–10805, 2024a.

ZAHARESCU, T.; BUMBAC, M.; NICOLESCU, C. M. Stability effects of added biomass on microalgae styrene–butadiene–styrene composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], v. 149, n. 19, p. 10793–10805, 2024b.

ZHU, B. *et al.* Aprimoramento das propriedades mecânicas de filmes compósitos de ácido polilático (PLA) utilizando celulose microcristalina da raiz de *Pueraria lobata*. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 279, p. 135579, 2024.

3. CAPÍTULO 2: BIOCOMPÓSITOS À BASE DE POLI(ÁCIDO LÁCTICO) E MICROALGAS: O ESTADO DA ARTE SOBRE PROPRIEDADES, DESAFIOS DE PROCESSAMENTO E APLICAÇÕES

RESUMO

O poli(ácido láctico) (PLA) emergiu como um substituto proeminente para os plásticos convencionais, impulsionado pela crise ambiental e pela sua origem renovável e biodegradabilidade. Contudo, suas limitações intrínsecas, como fragilidade inerente, estabilidade térmica limitada e propriedades de barreira inferiores, exigem a incorporação de aditivos sustentáveis. As microalgas representam um aditivo promissor, devido à sua capacidade de captura de CO₂, altas taxas de crescimento e rica composição bioquímica (incluindo proteínas, lipídios e carboidratos). Esta revisão analisou o estado da arte do desenvolvimento de filmes biocompósitos, com foco na otimização das propriedades do PLA. Estudos com polímeros análogos demonstram que as microalgas modulam as propriedades mecânicas, atuando ora como agente de reforço, ora como plastificante. Em termos de propriedades de barreira, a biomassa pode reduzir a permeabilidade ao vapor de água (PVA), aumentando a tortuosidade ou a cristalinidade da matriz. Além disso, as microalgas conferem funcionalidades de embalagem ativa, notadamente atividade antioxidante (elevação da capacidade de eliminação de radicais DPPH) e antimicrobiana. A presença de pigmentos naturais nas microalgas geralmente reduz a transparência dos filmes e confere coloração, o que é estrategicamente benéfico para a fotoproteção de produtos sensíveis à luz. Crucialmente, a introdução de microalgas, ricas em compostos orgânicos facilmente metabolizáveis, acelera a biodegradação dos filmes em condições simuladas de descarte no solo. No entanto, persistem desafios técnicos, como a má dispersão da biomassa e a baixa compatibilidade interfacial entre a biomassa hidrofílica e a matriz hidrofóbica do PLA. A literatura atual, contudo, carece de estudos em escala piloto e de abordagens aprofundadas em polímeros hidrofóbicos como o PLA, e

de padronização nos métodos de avaliação, limitando a transição comercial desses materiais.

Palavras-chave: Biocompósitos; PLA; Sustentabilidade.

3.1. Introdução

O consumo de plásticos convencionais aumentou exponencialmente nas últimas décadas, desencadeando uma crise ambiental sem precedentes (Smith; Brisman, 2021). Estima-se que a produção global de plástico continue a crescer rapidamente, enquanto apenas uma fração é reciclada adequadamente (Venkatachalam; Spierling; Endres, 2024). A resistência à degradação e a acumulação de resíduos plásticos em ambientes terrestres e aquáticos resultam em graves consequências ecológicas, incluindo a poluição de ecossistemas, ameaças à biodiversidade e a entrada de microplásticos na cadeia alimentar humana (Nayanathara Thathsarani Pilapitiya; Ratnayake, 2024).

Diante deste cenário alarmante, o desenvolvimento de alternativas sustentáveis aos materiais plásticos de origem fóssil tornou-se imperativo (Shafqat *et al.*, 2020). Neste contexto, o PLA, um poliéster termoplástico biodegradável derivado de fontes renováveis como o amido de milho, emergiu como um dos principais candidatos para substituir os plásticos convencionais em aplicações como embalagens (Swetha *et al.*, 2023).

No entanto, apesar da sua biodegradabilidade e biocompatibilidade, o PLA apresenta limitações intrínsecas, como fragilidade inerente, estabilidade térmica limitada e propriedades de barreira inferiores às de muitos polímeros petroquímicos (O'Loughlin *et al.*, 2023). Para superar esses desafios e expandir sua competitividade, a incorporação de cargas sustentáveis tem sido intensamente investigada (Jin *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2024).

É neste ponto que as microalgas surgem como um aditivo promissor para o desenvolvimento de filmes compósitos à base de PLA. Devido às suas altas taxas de crescimento, são capazes de capturar grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e podem ser cultivadas em ambientes não

agrícolas, como águas residuais ou terras improdutivas (Tripathi *et al.*, 2023). Além disso, sua rica composição (incluindo proteínas, lipídios, carboidratos e pigmentos) oferece uma vasta gama de aplicações biotecnológicas (Morais Junior *et al.*, 2020). O uso da biomassa de microalgas em matrizes poliméricas oferece não apenas uma adição funcional, mas também uma abordagem integrada para a valorização de resíduos e a mitigação do impacto ambiental (Mathiot *et al.*, 2019).

Embora estudos com outras matrizes biodegradáveis tenham demonstrado o potencial das microalgas para modular propriedades mecânicas, aumentar a estabilidade térmica e conferir propriedades antioxidantes e antimicrobianas (Abdo *et al.*, 2024; Moreira *et al.*, 2023; Rizal *et al.*, 2020, 2021), os desafios persistem. Questões relacionadas à compatibilidade interfacial entre a biomassa de microalga e a matriz hidrofóbica do PLA, a dispersão homogênea durante o processamento e a manutenção da estabilidade estrutural ainda representam barreiras técnicas importantes (Zaharescu; Bumbac; Nicolescu, 2024).

Diante dessas perspectivas, a seguinte questão central orienta esta revisão: Até que ponto a incorporação de microalgas pode otimizar as propriedades de filmes à base de PLA, tornando-os substitutos viáveis para os materiais plásticos convencionais?

Assim, o objetivo deste artigo foi revisar sistematicamente o desenvolvimento de filmes poliméricos reforçados com microalgas, com foco especial no potencial de aplicação no PLA. Para isso, discutimos suas características estruturais e funcionais, os obstáculos à sua produção em larga escala e as estratégias inovadoras adotadas para otimizar seu desempenho, utilizando estudos análogos com outras matrizes poliméricas para elucidar os mecanismos fundamentais de interação. Por fim, buscamos avaliar o real potencial desses materiais para atuar como aditivos ou substitutos sustentáveis dos plásticos tradicionais, contribuindo para a construção de uma economia mais verde e circular.

3.2. Estratégia de Revisão e Escopo de Análise

O objetivo desta Revisão Crítica do Estado da Arte foi analisar profundamente os melhores trabalhos disponíveis, em vez de apenas listá-los, para entender como a combinação de PLA e microalgas funciona e quais são os próximos passos para a indústria.

A pesquisa bibliográfica foi realizada de forma ampla e adaptativa entre outubro de 2024 e julho de 2025. As bases de dados acadêmicas mais importantes, como Web of Science, Scopus e Google Scholar, foram utilizadas para garantir que os artigos selecionados tivessem alta qualidade.

A estratégia de busca foi flexível e orientada pelos seguintes tópicos centrais: 1) material base (PLA); 2) aditivo (microalgas); e 3) processos (casting e extrusão). Em vez de usar uma lista rígida de palavras-chave, a pesquisa foi feita em etapas: começando com termos gerais e, conforme artigos importantes eram encontrados, as referências e citações desses artigos foram exploradas para garantir que nenhuma informação crucial fosse perdida.

A seleção dos materiais incluídos na análise seguiu dois critérios principais: foco na qualidade e tema, onde foram escolhidos artigos de pesquisa original e revisões que tratassem diretamente da incorporação de microalgas em materiais poliméricos; e relevância para o PLA, sendo dado um foco principal aos estudos sobre esse polímero. Contudo, devido à novidade do tema, foram incluídos também estudos de polímeros semelhantes. Essa inclusão de estudos análogos foi crucial para entender os mecanismos básicos de interação (como compatibilidade e dispersão da biomassa), que são diretamente aplicáveis ao desenvolvimento de filmes de PLA. Artigos muito específicos (como os focados apenas em biocombustíveis ou teses não publicadas em periódicos) foram excluídos para manter o foco na ciência de materiais e nas aplicações em filmes.

Os artigos selecionados foram lidos na íntegra para extração e avaliação das informações mais relevantes. A análise crítica concentrou-se em como as microalgas modificam as cinco propriedades-chaves dos filmes: mecânicas, de barreira, térmica, ópticas e de biodegradabilidade.

Ao final, buscou-se identificar os desafios técnicos (como a baixa compatibilidade) e as tendências de mercado e pesquisa para oferecer uma visão realista e projetar o futuro dos compósitos de PLA/microalgas.

3.3. Microalgas: Características e Potencial para Aplicações em Materiais Poliméricos

Microalgas são organismos unicelulares, fotossintéticos, pertencentes a diferentes grupos taxonômicos, como Chlorophyta, Rhodophyta e Cyanobacteria (Mobin; Alam, 2017). Nativas de ambientes aquáticos, tanto marinhos quanto de água doce, também são capazes de colonizar condições extremas, como desertos, fontes termais, solos úmidos, ambientes com alta salinidade ou pH extremo, demonstrando sua notável adaptabilidade (Rojas-Villalta *et al.*, 2024). Sua capacidade de converter energia solar em biomassa de alto rendimento através da fotossíntese as torna fontes promissoras de matéria-prima renovável para aplicações industriais, com eficiência fotossintética superior à das plantas, com taxas de conversão que podem chegar a até 10% (Udayan *et al.*, 2022).

O cultivo de microalgas pode ocorrer de forma fotoautotrófica (utilizando luz e CO₂), heterotrófica (utilizando carbono orgânico no escuro) ou mixotrófica (combinando ambos os modos para otimizar o crescimento). Sistemas de cultivo abertos, como tanques rasos, são baratos e de fácil expansão, mas são suscetíveis à contaminação e a variações climáticas. Fotobiorreatores fechados oferecem maior produtividade e qualidade da biomassa, embora sejam mais caros e difíceis de escalar (Dolganyuk *et al.*, 2020; Razzaq; Shahid; Nawab, 2024; Shahid *et al.*, 2020). Outra alternativa é o cultivo em águas residuais agroindustriais ou industriais, estratégia que promove simultaneamente a produção de biomassa de interesse e contribui para a mitigação da poluição ambiental (Shahid *et al.*, 2021).

Durante seu crescimento, as microalgas podem fixar CO₂ para cada quilograma de biomassa produzida, reduzindo diretamente os gases de efeito estufa (Xu *et al.*, 2023). Outro aspecto positivo é a baixa competição por recursos agrícolas, já que as microalgas podem ser cultivadas em terras não aráveis e

com água de baixa qualidade, sem impactar diretamente a produção de alimentos (Occhipinti *et al.*, 2024).

Após o cultivo, a colheita da biomassa é realizada por métodos mecânicos ou químicos, sendo os métodos mecânicos os mais confiáveis, especialmente quando combinados com coagulação e floculação para aumentar a eficiência e reduzir custos. Técnicas como floculação, flotação, filtração e centrifugação são amplamente utilizadas, isoladamente ou em combinação. Como não existe um método ideal, são adotados processos que combinam etapas e podem ser avaliados por parâmetros como eficiência de recuperação e fator de concentração (Singh; Patidar, 2018).

Do ponto de vista composicional, as microalgas possuem uma diversidade bioquímica que favorece o desenvolvimento de filmes poliméricos (Gongi *et al.*, 2022). Por exemplo, as proteínas atuam como agentes estruturantes e estabilizadores, formando redes intermoleculares que podem aumentar a resistência, a elasticidade e a homogeneidade da matriz, além de melhorar a compatibilidade entre os componentes e prevenir a separação de fases durante a formação do filme (Bertsch, 2021). Os lipídios atuam como plastificantes naturais em filmes poliméricos, conferindo maior flexibilidade e reduzindo a permeabilidade à umidade devido à sua natureza hidrofóbica. Além disso, podem contribuir com propriedades bioativas e antioxidantes (Brdlík *et al.*, 2022).

Ademais, as microalgas também são compostas por carboidratos com alto potencial filmogênico. Esses carboidratos variam em quantidade e composição dependendo da espécie e são encontrados principalmente como polissacarídeos de reserva nos plastídios e como componentes estruturais nas paredes celulares. O amido é o principal polissacarídeo de reserva em microalgas. As paredes celulares geralmente possuem uma camada interna rica em celulose e uma camada externa composta por substâncias como pectina, ágar ou alginato. A alta disponibilidade e a diversidade estrutural desses carboidratos tornam as microalgas fontes promissoras para aplicações biotecnológicas, incluindo a produção de biocombustíveis, alimentos funcionais e, especialmente, materiais poliméricos sustentáveis (Silvello *et al.*, 2022).

3.4. Filmes Poliméricos Incorporados com Microalgas: Polímeros Usados e Métodos de Produção

A produção de filmes poliméricos incorporados com microalgas depende das propriedades de um polímero base, bem como do método de fabricação empregado, sendo ambos fatores decisivos na determinação do desempenho do material final (Kim *et al.*, 2023).

Vários tipos de polímeros têm sido utilizados nessa abordagem, desde polímeros naturais até sintéticos (Satchanska; Davidova; Petrov, 2024). Os polímeros naturais e seus derivados, como amido, gelatina, celulose e alginato, e os polímeros biodegradáveis de origem biológica, como polihidroxialcanoatos (PHA) e PLA, além de polímeros sintéticos tradicionais, como polialcool vinílico (PVA) se destacam por sua biocompatibilidade, biodegradabilidade e facilidade de processamento (Liang *et al.*, 2024; Qiao *et al.*, 2024; Rojas *et al.*, 2021; Siddiqui *et al.*, 2024; Udayakumar *et al.*, 2021).

A escolha do polímero determina o método de produção dos filmes de microalgas. O método de *casting* é uma técnica simples que consiste na dissolução do polímero em um solvente e posterior evaporação para a formação do filme (Mohamadzade *et al.*, 2025). A extrusão, método preferencial para termoplásticos como o PLA, utiliza calor e pressão para fundir e homogeneizar a mistura, resultando em filmes uniformes e contínuos (Yin; He; Ye, 2021). A compressão a quente é um processo eficiente que envolve a aplicação de alta pressão e temperatura em um molde para consolidar misturas sólidas. Já a impressão 3D é um método promissor para customização, onde o material polimérico é depositado camada por camada de forma precisa para criar estruturas complexas (Patel; Minko, 2025).

Cada método possui vantagens e limitações específicas, que devem ser consideradas de acordo com as características do polímero, o tipo de microalga utilizada e a aplicação do filme. A seleção cuidadosa desses elementos é essencial para garantir a produção de materiais com propriedades mecânicas, de barreira e biodegradáveis adequadas. A Tabela 1 abaixo ilustra exemplos de filmes poliméricos incorporados com microalgas, destacando as matrizes

poliméricas que servem de modelo para o desenvolvimento de compósitos de PLA.

Tabela 1. Filmes poliméricos e revestimentos desenvolvidos com incorporação de biomassa de microalgas.

Microalga	Polímero	Método de Produção do Filme/Revestimento	Propriedade do Filme	Aplicação	Referência
<i>Nannochloropsis</i> (Resíduo)	Celulose	Dissolução e Regeneração, <i>Casting</i>	Mecânica, térmica, biodegradabilidade e biocompatibilidade	Materiais biodegradáveis, campo médico	(Yan <i>et al.</i> , 2016)
<i>Spirulina</i> (Extrato)	Quitosa (de caranguejo)	<i>Casting</i>	Antioxidante, antimicrobiana, barreira e mecânica	Embalagem ativa de alimentos	(Balti <i>et al.</i> , 2017)
<i>Chlorella vulgaris</i> (Biomassa)	Nanocristais de Celulose (CNC)	<i>Casting</i>	Antioxidante, antimicrobiana, mecânica, barreira e biodegradabilidade	Embalagem ativa de alimentos	(Najafi; Kahyao glu, 2024)
<i>Scenedesmus obliquus</i> (Extrato)	Poliuretano (PU)	<i>Casting</i>	Antimicrobiana, barreira e	Aplicações de bioplástico	(Abdo <i>et al.</i> , 2024)

			biodegradab	embalage	
			ilidade	ns	
<i>Heterochlorella</i>	Amido de	<i>Casting</i>	Antioxidante , mecânica, barreira e biodegradab	Embalage m ativa de alimentos (salmão)	(Carissi mi; Flôres; Rech, 2018)
<i>luteoviridis</i> (Biomassa ou Extrato)	Mandio ca		ilidade		
<i>Dunaliella tertiolecta</i> (Biomassa ou Extrato)	Amido de Mandio ca	<i>Casting</i>	Antioxidante , mecânica, barreira e biodegradab	Embalage m ativa de alimentos	(Carissi mi; Flôres; Rech, 2018)
<i>Tetradesm us obliquus</i> (Amido purificado ou Biomassa desengord urada)	Quitosa na, Amido	<i>Casting</i>	Mecânica e barreira	Filmes para embalagem ns	(Di Caprio et al., 2024)

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Através dos estudos analisados, observou-se o potencial das microalgas em diferentes bases poliméricas para a formulação de filmes ativos e materiais compósitos. Embora a Tabela 1 se concentre em matrizes como amido e quitosana, as descobertas são diretamente relevantes para o desenvolvimento de compósitos de PLA. A existência de diferentes cepas microalgais e solventes de extração, bem como o efeito da concentração que impacta a interação entre o polímero base e a biomassa, influencia diretamente as propriedades dos materiais, destacando a importância da seleção cuidadosa dos parâmetros de formulação e processamento.

O sucesso na criação de filmes sustentáveis depende crucialmente da otimização das propriedades mecânicas, que definem a integridade estrutural e

a resistência durante o manuseio. A introdução de microalgas, seja como extrato ou biomassa, demonstrou ser uma estratégia eficaz para modular estas características. Por um lado, o extrato de *Spirulina* (SE) em filmes de quitosana aumentou significativamente a resistência à tração (TS) de $21,24 \pm 2,33$ MPa (controle) para $29,65 \pm 1,43$ MPa (com 20% SE), um efeito atribuído às fortes ligações de hidrogênio formadas entre os grupos funcionais da quitosana e os compostos polifenólicos do extrato. De maneira análoga, a incorporação de CNC em filmes de *Chlorella vulgaris* elevou a TS de 0,5 MPa (controle) para 1,97 MPa (Chl-CNC15), atuando como um eficiente agente de reforço. Este efeito de reforço é comumente relacionado à densificação estrutural e à diminuição da mobilidade das cadeias poliméricas. Por outro lado, a adição de biomassa de *Heterochlorella luteoviridis* ou *Dunaliella tertiolecta* em filmes de amido de mandioca atuou como plastificante, reduzindo o Módulo de Young e a TS, enquanto aumentava o alongamento na ruptura. Em contraste, o extrato da mesma microalga demonstrou um efeito anti-plastificante, o que sugere que a composição (lipídica ou proteica) e a forma de incorporação (biomassa total versus extrato) da microalga têm um impacto direto no comportamento mecânico final do material.

A função primária de uma embalagem, a de barreira, é igualmente aprimorada pela presença de microalgas, essencial para o controle da deterioração induzida por umidade e oxigênio. A permeabilidade ao vapor de água (PVA), um desafio para materiais hidrofílicos, foi notavelmente reduzida pela introdução de extratos de microalgas. Por exemplo, o filme de PU com 40% de extrato de *Scenedesmus obliquus* registrou uma queda na Taxa de transmissão de vapor de água de 193,37 para 99,75 g/m². Esta melhoria é atribuída à compatibilidade (miscibilidade) do extrato e ao potencial aumento da cristalinidade, que impõe uma maior tortuosidade para a passagem do vapor. De forma similar, em filmes de quitosana/SE, a PVA diminuiu de $0,5242 \pm 0,011$ para $0,3786 \pm 0,023$ g.mm.d⁻¹.Pa⁻¹.m⁻² com 20% SE, um resultado da redução da afinidade do filme pela água devido às interações polímero-polifenol. O desempenho de barreira se estende à permeabilidade ao oxigênio, com filmes de quitosana/SE exibindo uma diminuição de 0,3941 para 0,1556 cm³.mm.atm⁻¹.

$1.d^{-1}.m^{-2}$ (com 20% SE), o que é consequência de uma estrutura polimérica mais compactada induzida pelo extrato.

Além das características passivas de barreira, as microalgas conferem ao material a funcionalidade ativa, crucial para estender o prazo de validade dos alimentos. A atividade antioxidante é uma propriedade de destaque, sendo o extrato de SE responsável por elevar a capacidade de eliminação de radicais DPPH em filmes de quitosana de 4,89% (controle) para 58,77% (com 20% SE), um efeito diretamente proporcional à concentração de bioativos incorporados, como carotenoides, clorofilas e polifenóis. Similarmente, filmes de amido com extrato de *H. luteoviridis* demonstraram proteção contra a oxidação lipídica em salmão, mantendo o óleo estável por longos períodos em condições aceleradas. A atividade antimicrobiana também se destaca, com filmes de PU contendo 40% de extrato de *Scenedesmus obliquus* atingindo 100% de taxa de inibição contra *E. coli* e *E. faecalis* após 2 horas de contato, devido à presença de lipídios antibacterianos, como o ácido palmítico. Contudo, o espectro de ação pode variar; filmes de *Chlorella vulgaris*/CNC demonstraram atividade contra *E. coli* mas não contra *S. aureus*, uma limitação que frequentemente se deve à ineficiência da difusão dos componentes ativos hidrofílicos contra a parede celular do Gram-positivo.

Finalmente, o cerne da sustentabilidade desses materiais reside na sua biodegradabilidade. Filmes de amido de mandioca com biomassa de *Heterochlorella luteoviridis* apresentaram uma perda de massa de 87,6% em 15 dias de teste de solo. Esta notável e rápida degradação é correlacionada com a alta solubilidade do filme, a qual, neste caso, foi exacerbada pela atividade amilásica presente na biomassa da microalga, que hidrolisa a matriz de amido e a torna mais acessível à microbiota do solo. Em contrapartida, a introdução de CNC em filmes de *Chlorella vulgaris* conferiu-lhes maior cristalinidade e menor solubilidade em água, o que resultou em uma biodegradação mais lenta no solo em comparação com o controle. A biodegradação mais lenta é, paradoxalmente, uma característica desejável para aumentar o desempenho em aplicações de embalagem, demonstrando que é possível ajustar a taxa de decomposição do material por meio da modificação da sua composição estrutural.

Diante do exposto, os resultados compilados reforçaram a versatilidade das microalgas como aditivos funcionais em materiais poliméricos sustentáveis, com destaque para aplicações em embalagens ativas e biomateriais. Contudo, seu uso requer ajustes refinados na formulação, como a escolha adequada do solvente, a concentração de extratos ou biomassa, o tipo de matriz polimérica e a necessidade de tratamentos prévios. Esses fatores são cruciais para potencializar os efeitos benéficos e minimizar as limitações desses materiais, como a liberação de compostos orgânicos voláteis durante o processamento térmico.

3.5. Efeitos da Incorporação de Microalgas nas Propriedades dos Filmes

3.5.1. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas do polímero, como resistência à tração, alongamento na ruptura e rigidez, são essenciais para a aplicação, especialmente na indústria de embalagens, determinando a integridade do material durante o transporte, armazenamento e uso (Patil *et al.*, 2021). A adição de microalgas às matrizes pode alterar as propriedades mecânicas dos materiais dependendo de fatores como o tipo de microalga, a concentração utilizada e a compatibilidade com o polímero base (Xiao; Zheng, 2016). A complexidade da parede celular da microalga e a presença de componentes como carboidratos, proteínas e lipídios desempenham um papel decisivo nas características dos materiais poliméricos (Spain; Funk, 2022).

Vários estudos relatam que a resistência à tração tende a diminuir com o aumento da concentração de microalgas em filmes poliméricos, especialmente em matrizes hidrofílicas como amido ou gelatina (Di Caprio *et al.*, 2024; Moreira *et al.*, 2023; Stejskal *et al.*, 2020). Essa redução é frequentemente atribuída à má dispersão da biomassa, formação de agregados e fraca adesão interfacial entre as partículas de microalgas e a matriz polimérica (Fabra *et al.*, 2018). No caso de filmes de amido incorporados com *Nannochloropsis gaditana* foi observado uma queda acentuada na resistência mecânica, atribuída ao efeito

plastificante dos ácidos graxos insaturados presentes na biomassa de microalgas, que reduziram as forças coesivas entre as cadeias poliméricas de amido, enfraquecendo a rede estrutural e tornando o material menos rígido e mais propenso à deformação (Fabra *et al.*, 2017).

Por outro lado, o módulo de elasticidade ou módulo de Young, que expressa a rigidez do material, pode aumentar com a adição de microalgas (Shirai *et al.*, 2025). Esse comportamento está relacionado à interação de proteínas, lipídios e outros compostos bioativos das microalgas com a matriz polimérica, formando uma rede mais coesa e menos flexível, o que se reflete diretamente no aumento do módulo de elasticidade (Kontogianni *et al.*, 2021). A rigidez dos filmes pode aumentar ou diminuir dependendo do tipo de microalga, do tratamento aplicado e da composição de proteínas, polissacarídeos ou plastificantes naturais, que podem densificar a rede polimérica ou torná-la mais flexível (Fabra *et al.*, 2017, 2018).

O alongamento na ruptura, que representa a capacidade do plástico de se deformar antes de quebrar, tende a ser reduzido com a incorporação da biomassa de microalgas, comportamento que está fortemente relacionado à dispersão heterogênea das partículas na matriz polimérica, comprometendo a homogeneidade estrutural do filme e favorecendo a formação de aglomerados que atuam como pontos de tensão, limitando a mobilidade das cadeias poliméricas e dificultando sua deformação sob tensão (Deshmukh *et al.*, 2021). A redução do alongamento é particularmente relevante para filmes que exigem elasticidade para embalar produtos com formatos irregulares ou que são mais suscetíveis ao impacto (Jakubowska *et al.*, 2020). Alguns estudos indicam que a modulação do teor de microalgas e a incorporação de plastificantes naturais, como o glicerol, podem compensar a redução da resistência mecânica causada pelas cargas e, ao mesmo tempo, melhorar a flexibilidade e o alongamento dos filmes (Dianursanti; Gozan; Noviasari, 2018).

Para melhorar as propriedades mecânicas dos filmes compósitos incorporados com microalgas, estratégias têm sido exploradas, como o uso de plastificantes, extração prévia de lipídios, purificação de compostos poliméricos, moagem ultrafina da biomassa e aplicação de surfactantes compatibilizantes, já que as interações entre os aditivos e a matriz polimérica variam de acordo com

a composição do material e as condições de processo (Balti *et al.*, 2017; Larrosa *et al.*, 2018). Destaca-se também o uso de misturas poliméricas e métodos de processamento como a extrusão reativa, auxiliada por agitação ultrassônica, que favorecem a dispersão da biomassa, aumentam a resistência mecânica e podem promover a modificação da superfície (Gallo-García *et al.*, 2022). A dispersão das microalgas na matriz também desempenha um papel fundamental nas propriedades finais do filme (Kim *et al.*, 2023). A formação de aglomerados reduz a homogeneidade e compromete a resistência mecânica, enquanto a distribuição uniforme contribui para a melhoria do desempenho estrutural (Mottaghi T.; Ghandehari; Masoodi, 2025).

Nesse contexto, microalgas ricas em polissacarídeos favoreceram a formação de estruturas mais coesas, aumentando a resistência dos materiais. Da mesma forma, é relatado que a adição de 0,5 g de espirulina a uma matriz de quitosana aumentou a resistência à tração dos filmes de 24,6 MPa para 46,3 MPa, demonstrando o potencial de reforço da biomassa de microalgas (Ramji; Vishnuvarthanan, 2022).

Em suma, a integração de microalgas em matrizes poliméricas oferece uma rota promissora para a bioeconomia, mas a modulação de suas propriedades mecânicas exige uma compreensão aprofundada da interface biomassa-polímero. A adição de microalgas, rica em carboidratos e lipídios, frequentemente compromete a resistência à tração e o alongamento na ruptura devido a fenômenos de segregação de fase e baixa molhabilidade interfacial, que resultam na formação de concentradores de tensão estrutural. Por outro lado, a natureza rígida de alguns componentes celulares pode elevar o módulo de elasticidade, conferindo maior rigidez ao material. Dessa forma, para atingir um balanço ideal entre a tenacidade e a resistência, é crucial que futuros estudos se concentrem na modificação química da superfície da biomassa e na aplicação de compatibilizantes para promover a ligação de hidrogênio e o encadeamento físico na interface. Somente através da engenharia de superfícies e do controle da morfologia de dispersão será possível transpor o potencial das microalgas de carga de enchimento para agentes de reforço efetivos, consolidando o desenvolvimento de biocompósitos avançados com desempenho mecânico otimizado para aplicações industriais.

3.5.2. Propriedades de Barreira

As propriedades de barreira dos filmes bioplásticos são essenciais para sua aplicação em embalagens de alimentos, pois influenciam diretamente a preservação dos produtos embalados. Os materiais plásticos regulam a transferência de vapor de água e gases, impactando a taxa de deterioração, o crescimento microbiano e a oxidação lipídica dos alimentos (Zhao *et al.*, 2023). A incorporação de microalgas nos filmes pode modificar a estrutura da matriz polimérica e influenciar diretamente os mecanismos de difusão molecular, sendo a natureza da biomassa, sua distribuição na matriz e o grau de interação com os componentes poliméricos fatores determinantes para entender os efeitos observados (Balti *et al.*, 2017; Long *et al.*, 2023).

Geralmente, a PVA pode ser reduzido com a adição de microcompósitos devido à formação de estruturas mais compactas e ao preenchimento de espaços vazios. Conforme observado com a incorporação de 35% de biomassa de microalgas em filmes de quitosana reduziu a PVA em mais de 60%. Esse efeito foi atribuído à formação de ligações de hidrogênio e à reticulação da estrutura, que limitaram a difusão da água (Deshmukh *et al.*, 2021).

No que diz respeito à permeabilidade a gases, os resultados são mais variados, e alguns indicam melhorias nas propriedades de barreira dos filmes. Quando as partículas de microalgas estão bem distribuídas, elas aumentam a tortuosidade dos caminhos de difusão dos gases, dificultando a passagem de moléculas como O₂ e CO₂ (Schiessl *et al.*, 2024). Este efeito de tortuosidade é altamente desejado em compósitos de PLA, que naturalmente possui uma barreira ao vapor de água e oxigênio inferior à de plásticos como o PET; a incorporação de microalgas poderia, portanto, mitigar essa deficiência.

A influência das microalgas nas propriedades de barreira também depende fortemente da concentração utilizada. Em baixas concentrações, é possível melhorar a barreira a gases e vapor de água. No entanto, concentrações mais altas geralmente promovem a agregação de partículas e a desorganização estrutural, afastando as cadeias poliméricas e abrindo espaços que favorecem o

transporte tanto de vapor quanto de gases. Além disso, a presença de lipídios residuais nas microalgas pode influenciar a hidrofobicidade do sistema e modificar os mecanismos de adsorção e difusão molecular (Fabra *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2021).

Para modular a permeabilidade ao vapor de água e gases, estratégias semelhantes às utilizadas nas propriedades mecânicas podem ser empregadas, como a purificação de polímeros, incorporação de agentes hidrofóbicos ou compostos de enchimento, e aplicação de tratamentos de superfície aos filmes (Deshmukh *et al.*, 2021; Saidi *et al.*, 2025). Além disso, a incorporação de microalgas pode ser vantajosa quando o objetivo é desenvolver embalagens ativas que “respiram” e permitem trocas gasosas controladas, como no caso de produtos frescos minimamente processados (Carissimi; Flôres; Rech, 2018). Assim, os ajustes na formulação devem ser guiados pela função final do material e pelas características do alimento a ser embalado.

3.5.3. Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas dos filmes biodegradáveis são fundamentais para determinar sua estabilidade durante o processamento, armazenamento e aplicação, especialmente em sistemas sujeitos a variações de temperatura (Hasan *et al.*, 2020). A estabilidade térmica, o ponto de fusão (T_m), a temperatura de transição vítrea (T_g) e o perfil de degradação são parâmetros frequentemente avaliados por técnicas como análise termogravimétrica (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise mecânica dinâmica (DMA) (Buchwalder *et al.*, 2022; Lorandi; Cioffi; Ornaghi Jr., 2016). A composição química das microalgas, influenciada pelas condições de cultivo, afeta diretamente as propriedades térmicas dos filmes produzidos, devido à sua interação molecular, pureza e estrutura interna (Silva *et al.*, 2024).

A introdução de microalgas em filmes poliméricos resulta em uma resposta térmica complexa, dada a sua composição heterogênea. Por um lado, a presença de constituintes inorgânicos (como sílica, fósforo, magnésio e cálcio) pode contribuir para um ligeiro aumento na estabilidade térmica dos filmes.

Esses minerais atuam como barreiras térmicas, retardando o início da degradação. No entanto, o comportamento térmico também pode ser negativamente afetado pela presença de lipídios e compostos orgânicos voláteis (COVs). Esses compostos orgânicos atuam como plastificantes naturais, reduzindo a coesão entre as cadeias poliméricas e facilitando sua movimentação, o que tende a diminuir a temperatura de transição vítrea (T_g) e a temperatura de fusão (T_m) dos filmes (Kim *et al.*, 2025).

Esse efeito de plastificação é particularmente crítico para o PLA, cuja baixa T_g ($\sim 55-60^\circ\text{C}$) já é uma limitação de uso. A redução da T_g compromete a estabilidade dimensional em temperaturas moderadas, enquanto a diminuição da T_m limita as aplicações que exigem maior resistência térmica (Brouchon *et al.*, 2025). Portanto, a incorporação de microalgas ricas em lipídios exigiria um pré-tratamento, como a extração lipídica, para evitar a plastificação indesejada da matriz polimérica.

A análise TGA de filmes de microalgas geralmente revela múltiplos estágios de degradação, refletindo a diversidade de compostos presentes na matriz (Erfani; Pirouzifard; Pirsa, 2023). O primeiro estágio, geralmente entre $30-130^\circ\text{C}$, está associado à perda de umidade e compostos voláteis; o segundo, entre $180-360^\circ\text{C}$, à degradação de proteínas, polissacarídeos e glicerídeos; e um terceiro, acima de 500°C , à decomposição de resíduos carbonáceos e formação de cinzas minerais (Mosayebi *et al.*, 2022). Esse perfil mais complexo pode ser vantajoso em aplicações que exigem resistência térmica em múltiplas faixas de temperatura, como embalagens para alimentos cozidos ou esterilizados.

3.5.4. Propriedades Ópticas

As propriedades ópticas dos filmes biodegradáveis são características fundamentais em diversas aplicações, especialmente na indústria de embalagens, na qual a transparência, a cor e o brilho podem influenciar diretamente a aceitação do consumidor e a funcionalidade do material. Filmes transparentes são amplamente utilizados para permitir a visualização do produto

embalado, enquanto outros tipos de coloração podem ser empregados para fornecer propriedades estéticas ou até funcionais, como a detecção de mudanças durante o armazenamento (Akhila *et al.*, 2023; Vaezi; Asadpour; Sharifi, 2019). A incorporação de microalgas nesses filmes resulta em uma série de mudanças nas propriedades ópticas, que dependem de fatores como o tipo de microalga, sua concentração e sua interação com a matriz polimérica (López-Padilla; Cortés-Rodríguez; Ortega-Toro, 2025; Moreira *et al.*, 2023).

Em geral, a presença de microalgas reduz a transparência dos filmes devido à dispersão de partículas e pigmentos presentes nas células das microalgas. A *Spirulina platensis*, por exemplo, possui pigmentos naturais, como clorofila, carotenoides e ficocianina, que conferem aos filmes uma cor característica (Dakhili *et al.*, 2025; Mussagy *et al.*, 2024). Essa coloração natural é um ponto central a ser considerado em filmes de PLA, que são originalmente conhecidos por sua alta transparência. A adição de microalgas transformaria o material de transparente para opaco e colorido, o que pode ser uma vantagem estratégica para proteger alimentos sensíveis à luz (fotodegradação). A redução na transparência do material foi confirmada pelo aumento expressivo nos valores de opacidade, que passaram de $1,13 \text{ A mm}^{-1}$ (filme controle) para até $9,47 \text{ A mm}^{-1}$ com a incorporação da biomassa. Esse aumento sugere que os constituintes sólidos das microalgas não apenas absorveram a luz, mas também intensificaram o espalhamento da luz incidentes na matriz polimérica. Essa alteração nas propriedades ópticas é um indicativo da presença de partículas na biomassa que modificam drasticamente a passagem da luz através do filme (Carissimi; Flôres; Rech, 2018).

A clorofila, por exemplo, confere aos filmes uma cor esverdeada, enquanto a ficocianina pode proporcionar tons azulados (Li *et al.*, 2020; Tsai *et al.*, 2025). Essas características podem ser exploradas estrategicamente para o desenvolvimento de filmes com cores vibrantes e visualmente atraentes, além de possibilitar a criação de embalagens inteligentes capazes de mudar de cor em resposta a variações ambientais, como temperatura ou presença de compostos voláteis (Alizadeh-Sani *et al.*, 2020).

Embora a redução da transparência seja frequentemente observada, é importante notar que a opacidade do filme pode ser controlada pela quantidade

de microalgas incorporada e pelo método de processamento. A distribuição uniforme das microalgas no filme pode minimizar o efeito de turvamento, permitindo um controle mais preciso sobre a transparência (Fabra *et al.*, 2018). Além disso, a combinação de microalgas com outros aditivos ou polímeros também pode otimizar as propriedades ópticas, possibilitando a obtenção de filmes com a quantidade desejada de opacidade sem comprometer outras características, como resistência mecânica e propriedades de barreira a gases (Rizal *et al.*, 2021).

O controle das propriedades ópticas dos filmes é crucial não apenas por razões estéticas, mas também por sua funcionalidade, especialmente em aplicações alimentícias. Filmes com maior opacidade ou coloração intensa podem atuar como barreiras de luz, protegendo produtos sensíveis à radiação ultravioleta (UV) e evitando sua degradação prematura (Deshmukh *et al.*, 2021; Santiesteban-Romero *et al.*, 2022). Nesse contexto, a incorporação de microalgas representa uma estratégia promissora, pois os pigmentos naturais presentes em suas células não apenas alteram a cor e a transparência dos filmes, mas também conferem propriedades antioxidantes e fotoprotetoras.

Por fim, é importante considerar que a uniformidade na dispersão das microalgas e o tratamento adequado da biomassa desempenham um papel crucial nas propriedades ópticas dos filmes. O uso de métodos de processamento como a agitação ultrassônica, que favorecem uma dispersão homogênea das partículas de microalgas, pode reduzir a turbidez e melhorar a transparência sem comprometer outras propriedades (Mokhtar *et al.*, 2024). Assim, o design de filmes com microalgas requer uma abordagem cuidadosa para equilibrar transparência, coloração e funcionalidade adequadas para a aplicação.

3.5.5. Propriedades Biodegradáveis

A biodegradabilidade dos filmes é uma das propriedades mais valorizadas no contexto da sustentabilidade, especialmente para aplicações em embalagens e produtos de uso único (Tang; Kuo; Liao, 2024). A degradação desses filmes

ocorre devido à ação de microrganismos presentes no solo ou composto, que utilizam os componentes orgânicos como fonte de nutrientes (Pradhan; Mohanty; Nayak, 2018; Yu *et al.*, 2023). As características físico-químicas das microalgas, como a composição de polissacarídeos, proteínas e lipídios, afetam diretamente a biodegradabilidade dos filmes (Carissimi; Flôres; Rech, 2018).

Filmes biodegradáveis adicionados de *Spirulina platensis* aumentaram as taxas de degradação em comparação com filmes sem microalgas (Abreu; Pereira; Da Silva, 2023). Em condições simuladas de descarte no solo, filmes contendo 2% e 70% de microalgas biodegradaram-se completamente em 8 dias quando enterrados, enquanto fragmentos residuais das amostras de controle permaneceram. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de compostos orgânicos facilmente metabolizáveis nas microalgas, como proteínas e polissacarídeos, que favorecem a colonização e a ação de microrganismos, acelerando a desintegração da matriz (Mastropetros *et al.*, 2022). Essa aceleração pode ser particularmente vantajosa em aplicações que visam reduzir o tempo de persistência do resíduo no ambiente. Isso é de grande interesse para compósitos de PLA, pois, embora o PLA seja biodegradável, ele requer condições específicas de compostagem industrial (alta temperatura e umidade) para se degradar eficientemente. A incorporação de microalgas, ricas em nutrientes, poderia acelerar a biodegradação do PLA mesmo em condições não ideais, como em solo comum.

A biodegradação com microalgas é influenciada por fatores como pH, temperatura, luz, nutrientes e co-metabólitos. Em geral, o processo é mais eficiente em condições de pH neutro a levemente alcalino, temperaturas moderadas (20-28 °C) e boa intensidade luminosa, que favorecem o crescimento algal e a atividade enzimática. A adição de nutrientes, como íons metálicos e vitaminas, e fontes extras de carbono, como glicose ou bicarbonato, pode aumentar a eficiência da degradação. Esses fatores combinados reforçam o potencial das microalgas para acelerar a biodegradação (Li *et al.*, 2023; Lin *et al.*, 2023).

Testes de biodegradabilidade em solo ou composto são essenciais para entender o comportamento do filme após o descarte (Chamley *et al.*, 2024; Sintim *et al.*, 2020). Em experimentos conduzidos, após 15 dias, foi observada

uma perda de massa de 69,9% para o controle para 55,1%, 56,8%, 73,2% e 87,6% para os filmes com 0,5%, 1,0% e 2,0% de biomassa de *Halimeda luteoviridis*, e 48,6%, 51,3% e 57,4% para filmes com 0,5%, 1,0% e 2,0% de biomassa de *Dunaliella tertiolecta*, indicando degradação, perda de aparência e integridade estrutural dos componentes poliméricos e redução da resistência interfacial (Carissimi; Flôres; Rech, 2018).

3.6. Soluções e Estratégias para Superar Desafios

Diversas estratégias têm sido propostas na literatura que podem superar a baixa compatibilidade entre a biomassa de microalgas e as matrizes poliméricas. Tratamentos com solventes alcalinos ou ácidos, por exemplo, têm promovido a remoção de componentes indesejáveis, que favorecem a adesão à matriz (Barrera-Fajardo; Rivero-Romero; Unfried-Silgado, 2024; Dimitriou; Hale; Spear, 2018). Processos físicos como a ultrassonicação e a moagem úmida também têm sido aplicados para reduzir o tamanho das partículas, aumentar a área superficial e alterar as propriedades de carga, facilitando a dispersão e a integração nos filmes (Tiwari; Ranade, 2025; Yang *et al.*, 2021).

Outra abordagem relevante envolve o uso de plastificantes e compatibilizantes que promovem maior miscibilidade entre os constituintes (Fahrngruber *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2020). Compostos como glicerol, sorbitol e ácido cítrico têm sido incorporados com sucesso em formulações para melhorar a flexibilidade, reduzir a rigidez e mitigar tensões mecânicas (Dong *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024). Além disso, compatibilizantes como o anidrido maleico e polímeros funcionalizados com grupos polares têm mostrado resultados promissores em facilitar as ligações químicas entre a biomassa e a matriz, resultando em filmes mais coesos e homogêneos (Rojas-Lema *et al.*, 2021; Ye *et al.*, 2023).

A combinação de polímeros naturais com polímeros sintéticos biodegradáveis permite o ajuste das propriedades mecânicas, térmicas e sensoriais dos filmes (Elgharbawy *et al.*, 2024; Gupta; Guha; Srivastav, 2022). Esses sistemas híbridos podem acomodar melhor as microalgas, reduzir a

necessidade de aditivos adicionais e ampliar a gama de aplicações dos materiais obtidos. Além disso, a flexibilidade na escolha dos polímeros permite que os filmes sejam personalizados para aplicações específicas, desde embalagens alimentícias até filmes agrícolas ou biomédicos.

3.7. Comparação Crítica entre Filmes de Microalgas e Plásticos Tradicionais

Uma comparação crítica entre filmes poliméricos com microalgas e plásticos convencionais revela avanços nas propriedades funcionais, mas que ainda possuem limitações a serem superadas para a substituição generalizada. A homogeneidade estrutural é um fator determinante no desempenho dos filmes poliméricos, e sua ausência ainda é uma das principais limitações dos filmes à base de microalgas (Yang *et al.*, 2024). Irregularidades na distribuição dos componentes comprometem a integridade da matriz, afetando negativamente propriedades como resistência mecânica, flexibilidade, estabilidade térmica e, sobretudo, a capacidade de barreira. Mesmo quando as formulações apresentam desempenho comparável aos polímeros sintéticos, a variabilidade estrutural torna o processo menos reprodutível (Dakhili *et al.*, 2025). Isso limita sua aplicação em sistemas que exigem alta uniformidade e eficácia, como na preservação de alimentos altamente perecíveis.

Do ponto de vista econômico, a competitividade dos filmes de microalgas frente aos plásticos de origem fóssil ainda é um desafio. Os custos de cultivo, colheita, secagem e processamento da biomassa algal são elevados, especialmente em sistemas que priorizam a qualidade da matéria-prima (Gaurav; Neeti; Singh, 2024). Contudo, a literatura aponta que o uso de microalgas cultivadas em águas residuais sob condições de baixo custo, combinado com subprodutos de biorrefinaria, pode reduzir significativamente o custo da biomassa e tornar sua aplicação em embalagens sustentáveis economicamente viável (Assemany *et al.*, 2025). Mesmo assim, o mercado exige estratégias claras para a redução de custos em larga escala.

A escalabilidade industrial é outro fator determinante na viabilidade desses materiais. Embora protótipos e processos em escala laboratorial tenham apresentado bons resultados, poucos estudos demonstraram a consistência e a eficiência de processos em escala piloto ou industrial. A falta de padronização nas características da biomassa e nos métodos de processamento dos filmes compromete a reprodutibilidade e a viabilidade comercial. Iniciativas que integram tecnologias de cultivo automatizadas, reuso de resíduos industriais e extrusão contínua de filmes podem acelerar a transição para uma produção em larga escala mais robusta e economicamente viável (Gaur *et al.*, 2020; Gebhard *et al.*, 2023; Janzen *et al.*, 2019).

Em termos de impacto ambiental, os filmes de microalgas oferecem vantagens consideráveis sobre os plásticos convencionais. Geralmente, por serem biodegradáveis e derivados de fontes renováveis, esses materiais contribuem para a redução da dependência de combustíveis fósseis e da poluição por plásticos que persistem no ambiente por longo tempo (Roy Chong *et al.*, 2022). Além disso, quando a biomassa é obtida a partir do tratamento de águas residuais ou integrada a sistemas de captura de CO₂, o ciclo de produção torna-se ainda mais sustentável, com um balanço de carbono potencialmente neutro ou até negativo (Hariz *et al.*, 2019; Shahid *et al.*, 2020). No entanto, é essencial realizar análises de ciclo de vida abrangentes e comparativas para quantificar esse impacto.

3.8. Análise Crítica e Limitações da Literatura Atual

Apesar dos avanços da pesquisa sobre filmes poliméricos incorporando microalgas nos últimos anos, a literatura ainda apresenta limitações que comprometem a transição dessas soluções para aplicações comerciais. Uma das principais lacunas é o predomínio de estudos em escala laboratorial, que geralmente não representam adequadamente os desafios enfrentados em processos industriais. A falta de estudos em escala piloto ou pré-industrial impede uma avaliação realista da eficiência dos métodos de produção, do

consumo energético e da viabilidade técnica em larga escala, o que compromete a aplicabilidade prática das formulações desenvolvidas.

Outro ponto crítico refere-se à ausência de padronização nos métodos de avaliação das propriedades dos filmes, especialmente em relação à biodegradabilidade e ao desempenho ambiental. Muitos estudos aplicam metodologias distintas, com condições experimentais que não são facilmente comparáveis, o que dificulta a análise sistemática e a construção de indicadores confiáveis. Por exemplo, a avaliação da degradação em solo, água ou composto é frequentemente realizada sem seguir normas internacionais como *American Society for Testing and Materials* (ASTM), o que limita a reprodutibilidade dos resultados e a comparação entre diferentes formulações.

Além disso, há uma concentração de estudos em poucas espécies de microalgas, principalmente *Chlorella vulgaris*. Embora essas espécies sejam de fácil cultivo e já amplamente utilizadas, essa baixa diversidade limita o potencial de descoberta de propriedades únicas que poderiam ser exploradas a partir de outras cepas. A exploração de espécies menos convencionais, incluindo as obtidas de efluentes industriais ou ambientes extremos, poderia revelar biomassas com perfis composicionais diferenciados e de alto valor funcional para aplicações em filmes biodegradáveis.

Uma limitação notável, crucial para o avanço industrial, é o desequilíbrio na pesquisa de matrizes poliméricas. Como evidenciado nesta revisão, há uma concentração de estudos em polímeros hidrofílicos, que são mais fáceis de processar em escala laboratorial por *casting*. Em contrapartida, a investigação da incorporação de microalgas em polímeros hidrofóbicos e processados por fusão, como o PLA, ainda é incipiente. A compatibilidade, a dispersão e o impacto nas propriedades reológicas durante a extrusão de compósitos PLA/microalgas são áreas que carecem de investigação aprofundada para viabilizar aplicações comerciais.

Finalmente, a literatura ainda carece de abordagens transdisciplinares que integrem a ciência dos materiais, a engenharia de processos, a economia circular e a avaliação ambiental abrangente. A maioria dos estudos permanece focada exclusivamente na caracterização físico-química e mecânica dos filmes,

negligenciando aspectos econômicos, sociais e regulatórios que são essenciais para a viabilidade real do uso desses materiais. A inclusão de avaliações de ciclo de vida (ACV), análises de custo-benefício e estudos de mercado ainda é incipiente, mas representa um passo fundamental para posicionar os filmes de microalgas como alternativas concretas e sustentáveis aos plásticos tradicionais.

3.9. Conclusão

O desenvolvimento de biocompósitos de PLA/microalgas representa um avanço na busca por materiais sustentáveis, oferecendo uma solução de ciclo de vida mais verde. A versatilidade da biomassa microalgal é inquestionável, conferindo funcionalidades ativas (antioxidante/antimicrobiana) e proteção contra a luz, além de acelerar a degradação dos filmes. Contudo, a transição do potencial laboratorial para a viabilidade industrial exige a superação de desafios críticos. Primeiramente, a otimização das propriedades mecânicas e de barreira do PLA depende da resolução da baixa compatibilidade da biomassa e da dispersão heterogênea. Isso requer foco em engenharia de superfícies (modificação química da biomassa) e no controle da morfologia de dispersão para que as microalgas atuem como agentes de reforço efetivos. Em segundo lugar, a competitividade econômica e a escalabilidade industrial serão alcançadas através da integração das microalgas em modelos de biorrefinaria, utilizando-as no tratamento de águas residuais para reduzir os custos, combinados com a adoção de tecnologias de processamento contínuo, como a extrusão em larga escala. Por fim, a consolidação desses materiais exige que a pesquisa adote urgentemente abordagens transdisciplinares, que integrem a ciência dos materiais, a engenharia de processos e a ACV, que é atualmente incipiente. Adicionalmente, a padronização dos testes de biodegradabilidade conforme normas internacionais, como a ASTM, é fundamental para a aceitação regulatória e comercial. Somente por meio dessa abordagem integrada e focada em escala, os biocompósitos de PLA/microalgas poderão se tornar substitutos concretos e sustentáveis dos plásticos tradicionais.

Referências

- ABDO, S. M. *et al.* Processing and characterization of antimicrobial bioplastic films based on green microalgae *Scenedesmus obliquus* extract-loaded polyurethane. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 257, p. 128711, 2024.
- ABREU, J. K.; PEREIRA, L. C.; DA SILVA, J. I. S. Comparative Study of Properties of Biopolymers from Corn Starch with Addition of Microalgae *Spirulina platensis*. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 29–43, 2023.
- AKHILA, K. *et al.* UV-blocking biodegradable film based on flaxseed mucilage/pectin impregnated with titanium dioxide and calcium chloride for food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 239, p. 124335, 2023.
- ALIZADEH-SANI, M. *et al.* pH-sensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 105, p. 93–144, 2020.
- ASSEMANY, P. *et al.* Microalgae biotechnology applied to wastewater treatment and biopolymer production: A sustainable alternative for resource recovery. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 75, p. 107900, 2025.
- BALTI, R. *et al.* Development and characterization of bioactive edible films from spider crab (*Maja crispata*) chitosan incorporated with *Spirulina* extract. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 105, p. 1464–1472, 2017.
- BARRERA-FAJARDO, I.; RIVERO-ROMERO, O.; UNFRIED-SILGADO, J. Investigation of the Effect of Chemical Treatment on the Properties of Colombian Banana and Coir Fibers and Their Adhesion Behavior on Polylactic Acid and Unsaturated Polyester Matrices. **Fibers**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 6, 2024.
- BERTSCH, P. Proteins from microalgae for the stabilization of fluid interfaces, emulsions, and foams. [s. l.], 2021.
- BRDLÍK, P. *et al.* The Influence of Plasticizers and Accelerated Ageing on Biodegradation of PLA under Controlled Composting Conditions. **Polymers**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 140, 2022.
- BROUCHON, G. *et al.* Biosynthesis of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBHV) using microalgae-derived starch and levulinic acid. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 233, p. 111176, 2025.
- BUCHWALDER, S. *et al.* Thermal Analysis of Parylene Thin Films for Barrier Layer Applications. **Polymers**, [s. l.], v. 14, n. 17, p. 3677, 2022.

CARISSIMI, M.; FLÔRES, S. H.; RECH, R. Effect of microalgae addition on active biodegradable starch film. **Algal Research**, [s. l.], v. 32, p. 201–209, 2018.

CHAMLEY, A. *et al.* Polymer material biodegradation in the deep sea. A review. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 957, p. 177637, 2024.

DAKHILI, S. *et al.* Innovative applications of microalgae in biodegradable food packaging: A review. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s. l.], v. 19, p. 101723, 2025.

DESHMUKH, A. R. *et al.* Biodegradable films based on chitosan and defatted *Chlorella* biomass: Functional and physical characterization. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 337, p. 127777, 2021.

DI CAPRIO, F. *et al.* Exploring different processes for starch extraction from microalgae and synthesis of starch-chitosan plastic films. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 413, p. 131516, 2024.

DIANURSANTI; GOZAN, M.; NOVIASARI, C. The effect of glycerol addition as plasticizer in *Spirulina platensis* based bioplastic. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 67, p. 03048, 2018.

DIMITRIOU, A.; HALE, M. D.; SPEAR, M. J. The effect of pH on surface activation of wood polymer composites (WPCs) with hydrogen peroxide for improved adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s. l.], v. 85, p. 44–57, 2018.

DOLGANYUK, V. *et al.* Microalgae: A Promising Source of Valuable Bioproducts. **Biomolecules**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1153, 2020.

DONG, Y. *et al.* Effect of polyol plasticizers on properties and microstructure of soluble soybean polysaccharide edible films. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 35, p. 101023, 2023.

ELGHARBAWY, A. S. *et al.* Enhancing the Biodegradability, Water Solubility, and Thermal Properties of Polyvinyl Alcohol through Natural Polymer Blending: An Approach toward Sustainable Polymer Applications. **Polymers**, [s. l.], v. 16, n. 15, p. 2141, 2024.

ERFANI, A.; PIROUZIFARD, M. K.; PIRSA, S. Photochromic biodegradable film based on polyvinyl alcohol modified with silver chloride nanoparticles and spirulina; investigation of physicochemical, antimicrobial and optical properties. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 411, p. 135459, 2023.

FABRA, M. J. *et al.* Development and characterization of hybrid corn starch-microalgae films: Effect of ultrasound pre-treatment on structural, barrier and mechanical performance. **Algal Research**, [s. l.], v. 28, p. 80–87, 2017.

FABRA, M. J. *et al.* Structural and physicochemical characterization of thermoplastic corn starch films containing microalgae. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 186, p. 184–191, 2018.

FAHRNGRUBER, B. *et al.* Starch/Poly(butylene succinate) Compatibilizers: Effect of Different Reaction-Approaches on the Properties of Thermoplastic Starch-Based Compostable Films. **Journal of Polymers and the Environment**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 257–270, 2020.

GALLO-GARCÍA, L. A. *et al.* Feasibility of production starch/poly(butylene adipate- co -terephthalate) biodegradable materials with microalgal biomass by blown film extrusion. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 45, n. 12, p. e14181, 2022.

GAUR, V. K. *et al.* Assessing the impact of industrial waste on environment and mitigation strategies: A comprehensive review. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 398, p. 123019, 2020.

GAURAV, K.; NEETI, K.; SINGH, R. Microalgae-based biodiesel production and its challenges and future opportunities: A review. **Green Technologies and Sustainability**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 100060, 2024.

GEBHARD, J. *et al.* Continuous hot extrusion with a stationary valve. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 72, n. 1, p. 237–240, 2023.

GUPTA, R. K.; GUHA, P.; SRIVASTAV, P. P. Natural polymers in biodegradable/edible film: A review on environmental concerns, cold plasma technology and nanotechnology application on food packaging- A recent trends. **Food Chemistry Advances**, [s. l.], v. 1, p. 100135, 2022.

HARIZ, H. B. *et al.* Potential of the microalgae-based integrated wastewater treatment and CO₂ fixation system to treat Palm Oil Mill Effluent (POME) by indigenous microalgae; *Scenedesmus* sp. and *Chlorella* sp. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 32, p. 100907, 2019.

HASAN, M. *et al.* Evaluation of the thermomechanical properties and biodegradation of brown rice starch-based chitosan biodegradable composite films. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 156, p. 896–905, 2020.

HU, D. *et al.* Microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus* co-cultivation with landfill leachate for pollutant removal and lipid production. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 342, p. 126003, 2021.

JAKUBOWSKA, E. *et al.* Physicochemical and storage properties of chitosan-based films plasticized with deep eutectic solvent. **Food Hydrocolloids**, [s. l.], v. 108, p. 106007, 2020.

JANZEN, N. H. *et al.* Implementation of a Fully Automated Microbial Cultivation Platform for Strain and Process Screening. **Biotechnology Journal**, [s. l.], v. 14, n. 10, p. 1800625, 2019.

JIN, K. *et al.* Polylactic acid based biocomposite films reinforced with silanized nanocrystalline cellulose. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 162, p. 1109–1117, 2020.

KIM, M. *et al.* Enhancing Microalgae Content in Biocomposites through a Mechanical Grinding Method. **Polymers**, [s. l.], v. 15, n. 23, p. 4557, 2023.

KIM, Y.-G. *et al.* Volatile compounds characterization of microalgae biomass (*Chlorella* sp. HS2) at high processing temperatures for application to an eco-friendly polymer composite. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 237, p. 111330, 2025.

KONTOGIANNI, V. G. *et al.* Evaluation of the Antioxidant and Physicochemical Properties of Microalgae/Whey Protein-Based Edible Films. *In*: INTERNATIONAL ELECTRONIC CONFERENCE ON FOODS, 2021. **The 2nd International Electronic Conference on Foods—“Future Foods and Food Technologies for a Sustainable World”**. [S. l.]: MDPI, 2021. p. 97. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-9976/6/1/97>. Acesso em: 15 maio 2025.

LARROSA, A. P. Q. *et al.* Spirulina sp. biomass dried/disrupted by different methods and their application in biofilms production. **Food Science and Biotechnology**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 1659–1665, 2018.

LI, Y. *et al.* Extraction of phycocyanin—A natural blue colorant from dried spirulina biomass: Influence of processing parameters and extraction techniques. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 85, n. 3, p. 727–735, 2020.

LI, H. *et al.* Extrusion-blown oxidized starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) biodegradable active films with adequate material properties and antimicrobial activities for chilled pork preservation. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 253, p. 127408, 2023.

LIANG, X. *et al.* Recent advancements and perspectives on processable natural biopolymers: Cellulose, chitosan, eggshell membrane, and silk fibroin. **Science Bulletin**, [s. l.], v. 69, n. 21, p. 3444–3466, 2024.

LIN, X. *et al.* A landfill serves as a critical source of microplastic pollution and harbors diverse plastic biodegradation microbial species and enzymes: Study in large-scale landfills, China. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 457, p. 131676, 2023.

LIU, J. *et al.* Citric acid crosslinked soluble soybean polysaccharide films for active food packaging applications. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 438, p. 138009, 2024.

LONG, J. *et al.* The reduce of water vapor permeability of polysaccharide-based films in food packaging: A comprehensive review. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 321, p. 121267, 2023.

LÓPEZ-PADILLA, A.; CORTÉS-RODRÍGUEZ, M.; ORTEGA-TORO, R. Development and Comparative Analysis of Hard and Soft Wheat Flour Films Enriched with Yellow and White *Chlorella vulgaris* Algae. **Polymers**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 785, 2025.

LORANDI, N. P.; CIOFFI, M. O. H.; ORNAGHI JR., H. Dynamic Mechanical Analysis (DMA) of Polymeric Composite Materials. **Scientia cum Industria**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 48–60, 2016.

MASTROPETROS, S. G. *et al.* Biopolymers production from microalgae and cyanobacteria cultivated in wastewater: Recent advances. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 60, p. 107999, 2022.

MATHIOT, C. *et al.* Microalgae starch-based bioplastics: Screening of ten strains and plasticization of unfractionated microalgae by extrusion. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 208, p. 142–151, 2019.

MOBIN, S.; ALAM, F. Some Promising Microalgal Species for Commercial Applications: A review. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 110, p. 510–517, 2017.

MOHAMADZADE, S. *et al.* Application of cellulose/poly(vinylidene fluoride) blend films as polymer electrolytes in lithium ion batteries. **Heliyon**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. e42546, 2025.

MOKHTAR, N. *et al.* Comparative analysis of process intensification technologies (PIT) for improved cell disruption and lipid recovery in *Aurantiochytrium* sp. SW1 microalgae. **International Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 59, n. 10, p. 7827–7836, 2024.

MORAIS JUNIOR, W. G. *et al.* Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing. **Aquaculture**, [s. l.], v. 528, p. 735562, 2020.

MOREIRA, A. S. P. *et al.* Potential of Coccolithophore Microalgae as Fillers in Starch-Based Films for Active and Sustainable Food Packaging. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 513, 2023.

MOSAYEBI, V. *et al.* Fast-dissolving antioxidant nanofibers based on Spirulina protein concentrate and gelatin developed using needleless electrospinning. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 47, p. 101759, 2022.

MOTTAGHI T., H.; GHANDEHARI, M. A.; MASOODI, A. R. Dynamic Behavior of Carbon Nanotube-Reinforced Polymer Composite Ring-like Structures: Unraveling the Effects of Agglomeration, Porosity, and Elastic Coupling. **Polymers**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. 696, 2025.

MUSSAGY, C. U. *et al.* Halochromic properties of carotenoid-based films for smart food packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 44, p. 101325, 2024.

NAJAFI, Z.; KAHYAOGU, L. N. Biodegradable active films based on *Chlorella* biomass and cellulose nanocrystals isolated from hemp stalk fibers. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 62, p. 105142, 2024.

NAYANATHARA THATHSARANI PILAPITIYA, P. G. C.; RATNAYAKE, A. S. The world of plastic waste: A review. **Cleaner Materials**, [s. l.], v. 11, p. 100220, 2024.

OCCHIPINTI, P. S. *et al.* Current challenges of microalgae applications: exploiting the potential of non-conventional microalgae species. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 104, n. 7, p. 3823–3833, 2024.

O'LOUGHLIN, J. *et al.* The Potential of Bio-Based Polylactic Acid (PLA) as an Alternative in Reusable Food Containers: A Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 21, p. 15312, 2023.

PATEL, G.; MINKO, T. Miscibility, phase behavior, and mechanical properties of copovidone/HPMC ASLF and copovidone/Eudragit EPO polymer blends for hot-melt extrusion and 3D printing applications. **International Journal of Pharmaceutics**, [s. l.], v. 670, p. 125124, 2025.

PATIL, S. *et al.* Effect of polymer blending on mechanical and barrier properties of starch-polyvinyl alcohol based biodegradable composite films. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 44, p. 101352, 2021.

PRADHAN, S.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. In-Situ Aerobic Biodegradation Study of Epoxy-Acrylate Film in Compost Soil Environment. **Journal of Polymers and the Environment**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 1133–1144, 2018.

QIAO, D. *et al.* Enhancing thermal stability and mechanical resilience in gelatin/starch composites through polyvinyl alcohol integration. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 344, p. 122528, 2024.

RAMJI, V.; VISHNUVARTHANAN, M. Chitosan Ternary Bio Nanocomposite Films Incorporated with MMT K10 Nanoclay and Spirulina. **Silicon**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 1209–1220, 2022.

RAZZAQ, S.; SHAHID, S.; NAWAB, Y. Applications and environmental impact of biodegradable polymers in textile industry: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 282, p. 136791, 2024.

RIZAL, S. *et al.* Properties and Characterization of Lignin Nanoparticles Functionalized in Macroalgae Biopolymer Films. **Nanomaterials**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 637, 2021.

RIZAL, S. *et al.* Properties of Macroalgae Biopolymer Films Reinforcement with Polysaccharide Microfibre. **Polymers**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 2554, 2020.

ROJAS, A. *et al.* Active PLA Packaging Films: Effect of Processing and the Addition of Natural Antimicrobials and Antioxidants on Physical Properties, Release Kinetics, and Compostability. **Antioxidants**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 1976, 2021.

ROJAS-LEMA, S. *et al.* Peroxide-Induced Synthesis of Maleic Anhydride-Grafted Poly(butylene succinate) and Its Compatibilizing Effect on Poly(butylene succinate)/Pistachio Shell Flour Composites. **Molecules**, [s. l.], v. 26, n. 19, p. 5927, 2021.

ROJAS-VILLALTA, D. *et al.* Exploring Extremotolerant and Extremophilic Microalgae: New Frontiers in Sustainable Biotechnological Applications. **Biology**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 712, 2024.

ROY CHONG, J. W. *et al.* Microalgae-based bioplastics: Future solution towards mitigation of plastic wastes. **Environmental Research**, [s. l.], v. 206, p. 112620, 2022.

SAIDI, L. *et al.* Polysaccharide-based edible films — strategies to minimize water vapor permeability. **Current Opinion in Food Science**, [s. l.], v. 61, p. 101258, 2025.

SANTIESTEBAN-ROMERO, B. *et al.* Microalgae Photo-Protectants and Related Bio-Carriers Loaded with Bioactive Entities for Skin Applications—An Insight of Microalgae Biotechnology. **Marine Drugs**, [s. l.], v. 20, n. 8, p. 487, 2022.

SATCHANSKA, G.; DAVIDOVA, S.; PETROV, P. D. Natural and Synthetic Polymers for Biomedical and Environmental Applications. **Polymers**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 1159, 2024.

SCHIESSL, S. *et al.* Mechanisms of permeation of helium, hydrogen, oxygen, and water vapor through silicate-based composite barrier coating layers. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], v. 483, p. 130800, 2024.

SHAFQAT, A. *et al.* A review on environmental significance carbon foot prints of starch based bio-plastic: A substitute of conventional plastics. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 27, p. 101540, 2020.

SHAHID, A. *et al.* Cultivating microalgae in wastewater for biomass production, pollutant removal, and atmospheric carbon mitigation; a review. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 704, p. 135303, 2020.

SHAHID, A. *et al.* Impact of wastewater cultivation on pollutant removal, biomass production, metabolite biosynthesis, and carbon dioxide fixation of newly isolated cyanobacteria in a multiproduct biorefinery paradigm. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 333, p. 125194, 2021.

SHIRAI, M. A. *et al.* Microalgae as an innovative active ingredient for edible films and coatings for food applications. **Algal Research**, [s. l.], v. 86, p. 103959, 2025.

SIDDIQUI, M. A. S. *et al.* Biodegradable natural polymers and fibers for 3D printing: A holistic perspective on processing, characterization, and advanced applications. **Cleaner Materials**, [s. l.], v. 14, p. 100275, 2024.

SILVA, P. E. D. C. E. *et al.* Obtaining polyhydroxyalkanoate and plastic film formation from the microalgae *Chlorella vulgaris* under light stress and nitrogen deficiency. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 13, n. 12, p. e106131247730, 2024.

SINGH, G.; PATIDAR, S. K. Microalgae harvesting techniques: A review. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 217, p. 499–508, 2018.

SINTIM, H. Y. *et al.* In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 727, p. 138668, 2020.

SMITH, O.; BRISMAN, A. Plastic Waste and the Environmental Crisis Industry. **Critical Criminology**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 289–309, 2021.

SPAIN, O.; FUNK, C. Detailed Characterization of the Cell Wall Structure and Composition of Nordic Green Microalgae. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 70, n. 31, p. 9711–9721, 2022.

STEJSKAL, N. *et al.* The Effect of Gelatine Packaging Film Containing a *Spirulina platensis* Protein Concentrate on Atlantic Mackerel Shelf Life. **Molecules**, [s. l.], v. 25, n. 14, p. 3209, 2020.

SUN, Y. *et al.* Effects of plasticizer type and concentration on rheological, physico-mechanical and structural properties of chitosan/zein film. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 143, p. 334–340, 2020.

SWETHA, T. A. *et al.* A comprehensive review on polylactic acid (PLA) – Synthesis, processing and application in food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 234, p. 123715, 2023.

TANG, J.-S.; KUO, C.-T.; LIAO, Y.-C. Transparent biodegradable composite plastic packaging film from TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 260, p. 129502, 2024.

TIWARI, V.; RANADE, V. Modelling particle breakage in in-line fluidic devices: Application to wet mill, ultrasonic horn, and vortex-based cavitation device. **Chemical Engineering Research and Design**, [s. l.], v. 213, p. 230–242, 2025.

TRIPATHI, S. *et al.* Carbon capture, storage, and usage with microalgae: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 2085–2128, 2023.

TSAI, P.-C. *et al.* Structural study of the chlorophyll between Lhca8 and Psal in an Antarctica green algal photosystem I-LHCI supercomplex revealed by its atomic structure. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, [s. l.], v. 1866, n. 2, p. 149543, 2025.

UDAYAKUMAR, G. P. *et al.* Biopolymers and composites: Properties, characterization and their applications in food, medical and pharmaceutical industries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 105322, 2021.

UDAYAN, A. *et al.* Mass cultivation and harvesting of microalgal biomass: Current trends and future perspectives. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 344, p. 126406, 2022.

VAEZI, K.; ASADPOUR, G.; SHARIFI, H. Effect of ZnO nanoparticles on the mechanical, barrier and optical properties of thermoplastic cationic

starch/montmorillonite biodegradable films. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 124, p. 519–529, 2019.

VENKATACHALAM, V.; SPIERLING, S.; ENDRES, H.-J. Recyclable, but not recycled—an indicator to quantify the environmental impacts of plastic waste disposal. **Frontiers in Environmental Science**, [s. l.], v. 12, p. 1316530, 2024.

XIAO, R.; ZHENG, Y. Overview of microalgal extracellular polymeric substances (EPS) and their applications. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 34, n. 7, p. 1225–1244, 2016.

XU, P. *et al.* Recent advances in CO₂ fixation by microalgae and its potential contribution to carbon neutrality. **Chemosphere**, [s. l.], v. 319, p. 137987, 2023.

YAN, C. *et al.* Cellulose/microalgae composite films prepared in ionic liquids. **Algal Research**, [s. l.], v. 20, p. 135–141, 2016.

YANG, J. H. *et al.* Rheological analysis of peroxide radical-induced modification of microalgae-based polymer composite. **Reactive and Functional Polymers**, [s. l.], v. 194, p. 105803, 2024.

YANG, G. *et al.* Understanding the relationship between particle size and ultrasonic treatment during the synthesis of metal nanoparticles. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 73, p. 105497, 2021.

YE, H. *et al.* Customized compatibilizer to improve the mechanical properties of polylactic acid/lignin composites via enhanced intermolecular interactions for 3D printing. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 205, p. 117454, 2023.

YIN, B.; HE, Q.; YE, L. Effects of deposition speed and extrusion temperature on fusion between filaments in single-layer polymer films printed with FFF. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 270–276, 2021.

YU, J. *et al.* Exploring the mechanism associated with methane emissions during composting: Inoculation with lignocellulose-degrading microorganisms. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 325, p. 116421, 2023.

ZAHARESCU, T.; BUMBAC, M.; NICOLESCU, C. M. Stability effects of added biomass on microalgae styrene–butadiene–styrene composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], v. 149, n. 19, p. 10793–10805, 2024.

ZHAO, X. *et al.* Sustainable bioplastics derived from renewable natural resources for food packaging. **Matter**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 97–127, 2023.

ZHU, B. *et al.* Aprimoramento das propriedades mecânicas de filmes compósitos de ácido polilático (PLA) utilizando celulose microcristalina da raiz de *Pueraria lobata*. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 279, p. 135579, 2024.

4. CAPÍTULO 3: BIOPOLÍMERO À BASE DE MICROALGAS: UMA ESTRATÉGIA ECOLÓGICA PARA REDUZIR A DEPENDÊNCIA DO POLI(ÁCIDO LÁCTICO)

RESUMO

A crescente demanda por materiais sustentáveis e a valorização de resíduos impulsionaram pesquisas sobre biorrefinaria de águas residuais e bioplásticos. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar filmes à base de poli(ácido láctico) (PLA) parcialmente substituídos por diferentes concentrações de biomassa de microalgas derivadas do tratamento de águas residuais (PLA-MA: 0, 10, 20, 30, 40 e 50%). Os filmes foram produzidos e caracterizados em relação às suas propriedades morfológicas (MEV), estruturais (FTIR), físicas (espessura, peso, inchaço, solubilidade), térmicas (TGA), mecânicas (resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo de Young), ópticas (colorimetria, UV-Vis), de barreira (permeabilidade ao vapor de água) e biodegradabilidade. A análise FTIR confirmou a incorporação de microalgas e sugeriu que, embora baixas cargas de biomassa resultassem em boa compatibilidade do material, concentrações mais altas (>20%) introduziam grupos funcionais hidrofílicos distintos, indicando uma incompatibilidade estrutural crescente. A substituição parcial do PLA por microalgas modulou as propriedades físicas, mecânicas e ópticas dos compósitos. Notavelmente, os testes de biodegradabilidade mostraram que o compósito PLA-MA 50% atingiu 89% de degradação em 120 dias, confirmando que a biomassa de microalgas pode acelerar a decomposição do material. Além disso, ensaios antimicrobianos (realizados para PLA-MA 0%, 20% e 50%) confirmaram que as microalgas derivadas de águas residuais são seguras para incorporação na matriz polimérica. No geral, essas descobertas destacam o potencial da biomassa de microalgas como uma opção promissora para aplicações de bioplásticos de ciclo de vida curto, particularmente no setor agrícola.

Palavras-chave: Biodegradabilidade; Biopolímeros; Filmes poliméricos.

4.1. Introdução

A produção global de plásticos convencionais atingiu 413,8 milhões de toneladas em 2023, contribuindo substancialmente para o acúmulo de resíduos nos ecossistemas terrestres e aquáticos. Esses materiais são altamente resistentes à degradação, permanecendo no meio ambiente por séculos e causando impactos adversos tanto na fauna quanto na flora. A persistência ambiental dos polímeros petroquímicos intensificou, portanto, as pesquisas sobre alternativas biodegradáveis capazes de substituir os plásticos convencionais (Li *et al.*, 2024; Marín *et al.*, 2025).

Apesar dos avanços nesse campo, a substituição de embalagens sintéticas por materiais derivados de polímeros naturais continua sendo um desafio. Os materiais à base de polímeros naturais geralmente apresentam propriedades de barreira inferiores contra umidade e gases, resistência mecânica reduzida em comparação com os plásticos convencionais, estabilidade térmica limitada durante o processamento e custos de produção mais elevados (Ponnusamy; Mani, 2022; Shelly *et al.*, 2025; Trinh; Chang; Mekonnen, 2023; Zhao *et al.*, 2023). Essas limitações explicam por que a maioria das soluções de embalagem à base de polímeros naturais permanece em fase de pesquisa, limitando a implementação em escala industrial.

Entre esses materiais, o PLA é um bioplástico produzido a partir de recursos renováveis que oferece biodegradabilidade e biocompatibilidade, tornando-o adequado para uma ampla gama de aplicações (Shahdan *et al.*, 2023). O PLA ganhou relevância comercial devido às suas características de processamento, que são semelhantes às dos termoplásticos convencionais. No entanto, sua aplicação generalizada é dificultada por limitações, incluindo desempenho mecânico, estabilidade térmica e custos de produção (He *et al.*, 2021). Para que o PLA substitua efetivamente os filmes biodegradáveis convencionais, ele deve atender a critérios específicos de desempenho em relação à resistência à tração, alongamento na ruptura, propriedades de barreira ao oxigênio e vapor de água, estabilidade térmica e custos de produção

competitivos com os materiais convencionais (Lazaro-Hdez *et al.*, 2025; O'Loughlin *et al.*, 2023).

Uma estratégia para superar essas limitações envolve a incorporação de enchimentos naturais na matriz de PLA (Kumar *et al.*, 2025). Em particular, a biomassa de microalgas oferece vantagens técnicas, ambientais e econômicas. As microalgas possuem uma composição química rica em proteínas, polissacarídeos e lipídios - componentes que podem influenciar positivamente as propriedades mecânicas, térmicas e funcionais da matriz polimérica (Sayin *et al.*, 2020). Além disso, a presença de compostos nitrogenados nas microalgas pode acelerar a biodegradação do PLA, estimulando o crescimento de microrganismos degradadores de polímeros, facilitando assim a quebra das cadeias poliméricas (Kalita *et al.*, 2021).

Estudos recentes indicam que a incorporação de biomassa de microalgas em misturas de poli(adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT) e PLA pode aumentar a resistência mecânica e a estabilidade térmica, reduzindo simultaneamente a pegada de carbono do material resultante (Letwaba *et al.*, 2024). Embora algumas pesquisas tenham explorado a incorporação de microalgas em matrizes de PLA, os relatórios envolvendo microalgas cultivadas em águas residuais permanecem limitados.

Essa abordagem específica de usar microalgas cultivadas em águas residuais para a produção de bioplásticos representa uma abordagem de economia circular, transformando resíduos do tratamento de água em um novo polímero funcional, ao mesmo tempo em que reduz a quantidade de PLA necessária (Vo *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2024). Essa estratégia permite a valorização da biomassa de microalgas que, de outra forma, seria descartada ou subutilizada, agregando valor econômico e mitigando os impactos ambientais associados ao descarte inadequado de plástico (Jayaraman *et al.*, 2024). Além disso, as microalgas cultivadas em águas residuais oferecem vantagens únicas, incluindo alto teor de proteínas e polissacarídeos, potencial para aumentar as taxas de biodegradação e a oportunidade de valorizar simultaneamente os resíduos e melhorar as propriedades dos materiais (Chong *et al.*, 2021). Consequentemente, o desenvolvimento de compósitos de PLA-microalgas de

águas residuais apresenta um potencial considerável para o avanço de materiais sustentáveis.

Portanto, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da substituição parcial do PLA por microalgas cultivadas em águas residuais e caracterizar os filmes resultantes em relação às propriedades morfológicas, estruturais, mecânicas, térmicas, de barreira, ópticas e de biodegradabilidade. Os resultados fornecem insights para o desenvolvimento de bioplásticos econômicos com desempenho aprimorado, oferecendo alternativas promissoras para a indústria de materiais.

4.2. Materiais e métodos

4.2.1. Materiais

A biomassa de microalgas utilizada neste estudo foi fornecida pelo Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. O cultivo foi realizado em tanques de alta taxa de produção (HRAPs) com área superficial de 3,3 m² (2,86 m x 1,28 m x 0,3 m) localizados a 20°45'14" S, 42°52'54" W em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. O sistema operou sob condições ambientais naturais de temperatura e iluminação. O esgoto sanitário da Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) do bairro Romão dos Reis foi utilizado como meio de cultura. O efluente, coletado após tratamento primário em fossa séptica, foi fornecido pela Companhia Autônoma de Água e Saneamento. O cultivo foi realizado em modo batch, com tempo de retenção hidráulica de 10 a 15 dias, durante o qual foram monitorados o pH, a temperatura, o oxigênio dissolvido e a densidade óptica. Ao final do período de cultivo, a biomassa foi colhida por sedimentação gravitacional. Para preservação e processamento, a biomassa úmida foi primeiro congelada em um ultrafreezer a -70±1 °C por 24 h, seguida de liofilização usando um liofilizador de bancada (modelo LP510, Liotop, Brasil) sob vácuo por 72 h, atingindo até 30 °C durante o estágio final. A biomassa seca foi moída usando um liquidificador doméstico e, em seguida, macerada com um

almofariz e um pilão para obter um pó fino e homogêneo. A biomassa processada foi então armazenada sob vácuo até o uso.

O PLA foi fornecido pela Earth Renewable Technologies LTDA (Brasil) e o diclorometano foi adquirido da LabSynth LTDA (Brasil). Ambos os reagentes foram fornecidos pelo Laboratório de Embalagens do Departamento de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Viçosa.

4.2.2. Preparação do filme

Os filmes foram preparados utilizando a técnica de moldagem. A massa total de polímero foi mantida numa proporção de 1:10 (m/v), com o PLA parcialmente substituído por biomassa de microalgas (0, 10, 20, 30, 40, 50%). O PLA (2,0, 1,8, 1,6, 1,4, 1,2 e 1,0 g) foi primeiro disperso em diclorometano, após o que foi adicionada a quantidade correspondente de biomassa de microalgas (0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 g). As dispersões foram mantidas sob agitação magnética por 24 horas a 25 ± 5 °C para garantir a dispersão completa do polímero e da biomassa. A mistura foi então homogeneizada usando um Ultra-Turrax (modelo T25, Ika, Alemanha) a 4800 rpm. Finalmente, as suspensões foram despejadas em placas de vidro (25 cm x 10 cm) e deixadas secar à temperatura ambiente até a formação de filmes uniformes.

4.2.3. Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A análise FTIR foi realizada utilizando um espectrômetro Jasco FT/IR-4100 tipo A (Tóquio, Japão). Os espectros foram registrados na faixa de 4000-600 cm^{-1} com uma resolução de 4 cm^{-1} , acumulando 256 varreduras por amostra.

4.2.4. Gramatura

Amostras de teste medindo 5 cm x 5 cm foram cortadas usando um cortador de precisão e pesadas em uma balança analítica. Todas as medições foram realizadas em triplicata para cada tratamento. A gramatura ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) foi calculada de acordo com a Equação 1:

$$G = \frac{P}{A} \times 1000 \quad (1)$$

Sendo:

G = Gramatura;

P = Peso do corpo de prova (g);

A = Área do corpo de prova (cm^2).

4.2.5. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

As micrografias foram obtidas utilizando um MEV (modelo TM3000, Hitachi High-Technologies, Tóquio, Japão). Amostras de aproximadamente 1,0 cm^2 foram montadas em suportes de alumínio metálico usando fita condutora de carbono dupla-face. A tensão de aceleração de elétrons foi ajustada automaticamente pelo equipamento. As imagens da superfície foram capturadas com ampliações de 100x.

4.2.6. Espessura e propriedades mecânicas

A espessura do filme foi medida usando um micrômetro digital (Mitoyo Corporation, Kawasaki, Japão), com uma precisão de 0,001 mm. Dez medições aleatórias foram feitas por amostra. As propriedades mecânicas foram avaliadas de acordo com a norma ASTM D882-18. As amostras de teste (175 mm x 25 mm) foram avaliadas usando uma Máquina de Teste Universal (modelo 3367,

Instron Corporation, Norwood, EUA), equipada com uma célula de carga de 250 N, uma separação inicial da mandíbula de 125 mm e uma velocidade da cruzeta de 50 mm·min⁻¹. Seis réplicas foram analisadas para cada tratamento.

4.2.7. Análise de cor

A transmitância da luz dos filmes foi avaliada utilizando um espectrofotômetro UV-Visível (UV-2600, Shimadzu, Japão). Amostras de teste medindo 5 cm x 5 cm foram digitalizadas em toda a faixa espectral de 200-800 nm. As propriedades cromáticas dos filmes foram avaliadas através da determinação das coordenadas de cor L* (luminosidade, variando do preto ao branco), a* (variando do verde ao vermelho) e b* (variando do azul ao amarelo) utilizando espectrofotômetros Colorquest® XE (HunterLab, Reston, EUA). O índice de saturação (C*) e o ângulo de matiz (h*) foram determinados usando as Equações 2 e 3, respectivamente.

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2)$$

$$h^* = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3)$$

4.2.8. Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica foi realizada utilizando um analisador térmico DTG (Shimadzu, modelo 60 H, Kyoto, Japão). Aproximadamente 3,5 mg de cada amostra de filme foram colocados em cadinhos de alumina e aquecidos de 30 °C a 600 °C, a uma taxa de 10 °C.min⁻¹, sob atmosfera de nitrogênio com uma vazão de 50 ml.min⁻¹. A estabilidade térmica dos filmes foi avaliada com base nas curvas termogravimétricas (TG) e da primeira derivada (DTG).

4.2.9. Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

A PVA foi determinada pelo método gravimétrico, de acordo com a norma ASTM E96/E96M, com adaptações. Amostras circulares de filme ($\varnothing = 80$ mm) foram seladas com parafina em cápsulas cheias com uma solução supersaturada de cloreto de lítio (LiCl), que mantinha uma umidade relativa interna (UR) de 12%. As cápsulas foram armazenadas a 25 ± 2 °C dentro de um dessecador contendo uma solução supersaturada de cloreto de sódio (NaCl), que mantinha uma UR externa de 75%, estabelecendo um gradiente de umidade de 63% através do filme. As cápsulas foram pesadas a cada 12 h durante 12 dias para monitorar o ganho de massa de água. A taxa de transmissão de vapor de água (TPVA) foi calculada usando a Equação 4.

$$TPVA = \frac{m}{t \times A} \quad (4)$$

Em que m/t corresponde ao ganho de massa de água ao longo do tempo (g.s^{-1}), obtido a partir da inclinação da curva de massa versus tempo, e A é a área de permeação do filme (m^2). Os valores de PVA ($\text{g.Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) foram calculados de acordo com a Equação 5.

$$PVA = \frac{(TPVA \times X_T)}{[P_s(RH_1 - RH_2)]} \quad (5)$$

Em que X_T é a espessura média do filme (m), P_s é a pressão de vapor de saturação da água a 25 °C, RH_1 é a umidade relativa no dessecador e RH_2 é a umidade relativa dentro da cápsula.

4.2.10. Índice de inchaço (II) e solubilidade do filme (SF)

As amostras de filme foram cortadas em espécimes de 2 cm x 2 cm, secas em estufa a 70 ± 5 °C por 24 h e pesadas para determinar o peso seco inicial (W_1). Posteriormente, as amostras foram imersas em 20 ml de água destilada a 25 ± 5 °C por 24 h e pesadas para determinar o peso inchado (W_2). Depois, as amostras foram novamente secas a 70 ± 5 °C por mais 24 horas para determinar o peso seco final (W_3). O índice de inchaço (II) e a solubilidade do filme (SF) foram calculados usando as equações 6 e 7:

$$II (\%) = \left[\left(\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right) \right] \times 100 \quad (6)$$

$$SF (\%) = \left[\left(\frac{W_1 - W_3}{W_1} \right) \right] \times 100 \quad (7)$$

4.2.11. Análise microbiológica

Para avaliar a segurança microbiológica da biomassa de microalgas, as amostras foram diluídas nas proporções de 1:10 e 1:100 em água peptonada a 0,1% (p/v). Alíquotas (1 ml) foram inoculadas em placas *Petrifilm*TM (3M) para enumeração do total de bactérias aeróbicas mesófilas, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e coliformes, *Salmonella spp.* e *Listeria monocytogenes*. As placas *Petrifilm* para o total de bactérias aeróbicas mesófilas foram incubadas a 35 °C por 24 horas.

A atividade antimicrobiana in vitro dos filmes contendo 0, 20 e 50% (p/p) de microalgas foi avaliada contra *E. coli* ATCC 29214, *Salmonella Typhimurium* ATCC 14028 e *Listeria monocytogenes* ATCC 19111. As cepas bacterianas foram ativadas em caldo de infusão de cérebro e coração (BHI, Kasvi) e incubadas a 37 ± 2 °C por 16 h. A concentração final de cada suspensão de microrganismos, aproximadamente 10⁸ UFC/ml, foi confirmada pela técnica de contagem de células por microgotas em ágar BHI. Alíquotas (100 µL) de cada suspensão bacteriana foram espalhadas em ágar BHI usando uma alça de Drigalski. Posteriormente, discos de filme com 20 mm de diâmetro foram colocados na

superfície do ágar e as placas foram incubadas a 37 ± 2 °C por 24 h para observar as zonas de inibição do crescimento microbiano.

4.2.12. Biodegradabilidade

Os testes de biodegradabilidade foram avaliados seguindo a metodologia da norma ASTM D6400. Inicialmente, as amostras de filme foram cortadas em espécimes de 3 cm × 3 cm e pesadas para determinar a massa inicial (m_0). O meio de enterramento foi preparado usando uma mistura de esterco de cavalo, areia e solo (1:1:1 m/m). O teor de umidade da mistura foi ajustado para 60% de sua capacidade de retenção de água e monitorado periodicamente. Cada amostra foi enterrada individualmente em recipientes plásticos de 250 ml, posicionados horizontalmente a uma profundidade de 5 cm. Os recipientes foram incubados em uma câmara climática (420-CLDTS 300, Ethik Technology, Brasil) sob condições de temperatura controlada (25 ± 2 °C) e na ausência de luz por períodos de 30, 60, 90, 120 e 180 dias. Após cada período de incubação, as amostras foram cuidadosamente recuperadas, limpas e pesadas (m_x). A biodegradação foi quantificada como perda de massa (%) de acordo com a equação 9:

$$\text{Perda de massa} = \left(\frac{m_0 - m_x}{m_0} \right) \times 100 \quad (9)$$

4.2.13. Análise estatística

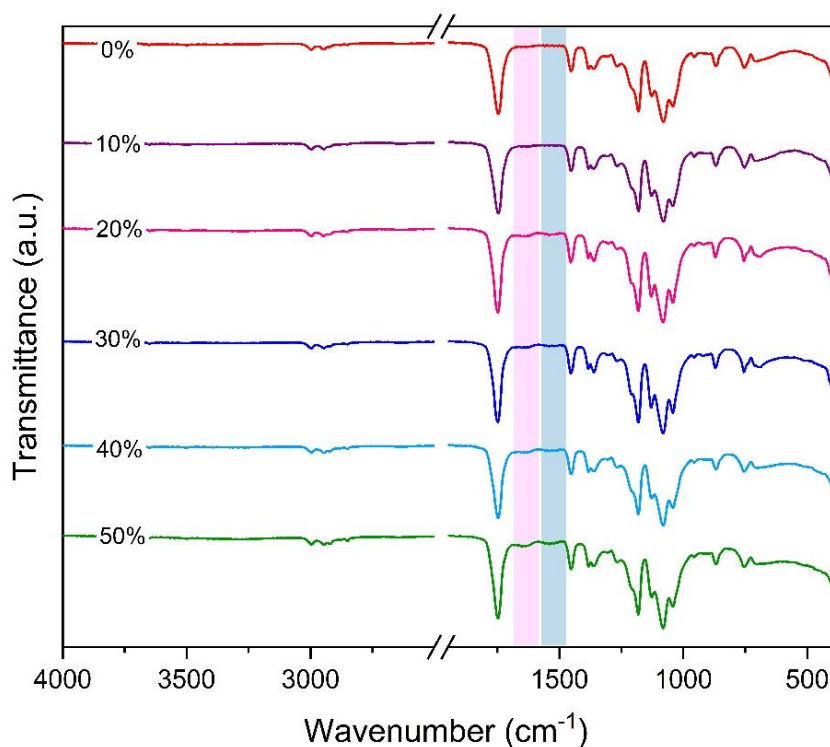
Todas as análises foram realizadas em triplicata, salvo indicação em contrário. Os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão e submetidos à Análise de Variância (ANOVA). Quando foram detectadas diferenças significativas, as médias dos tratamentos foram comparadas utilizando o teste de Tukey a um nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As

análises foram realizadas utilizando o software RStudio (versão 2025.09.1, Posit, PBC, Boston, MA).

4.3. Resultados e discussão

Os filmes de polímero PLA parcialmente substituídos por diferentes proporções de biomassa de microalgas apresentaram superfícies visualmente homogêneas, com boa conformação e integridade estrutural. A incorporação de microalgas na matriz polimérica, mesmo nos níveis mais altos de substituição, não comprometeu a formação do filme, confirmando a viabilidade da substituição parcial do PLA pela biomassa de microalgas. Portanto, os filmes foram caracterizados para avaliar os efeitos da incorporação de microalgas em sua microestrutura e desempenho geral. Assim, os espectros FTIR foram registrados para os filmes PLA puros (PLA-MA 0%) e para aqueles parcialmente substituídos por diferentes concentrações de microalgas (Figura 1).

Figura 1. Espectros FTIR para filmes PLA substituídos com 0% (PLA-MA 0%), 10% (PLA-MA 10%), 20% (PLA-MA 20%), 30% (PLA-MA 30%), 40% (PLA-MA 40%) e 50% (PLA-MA 50%) de microalgas.



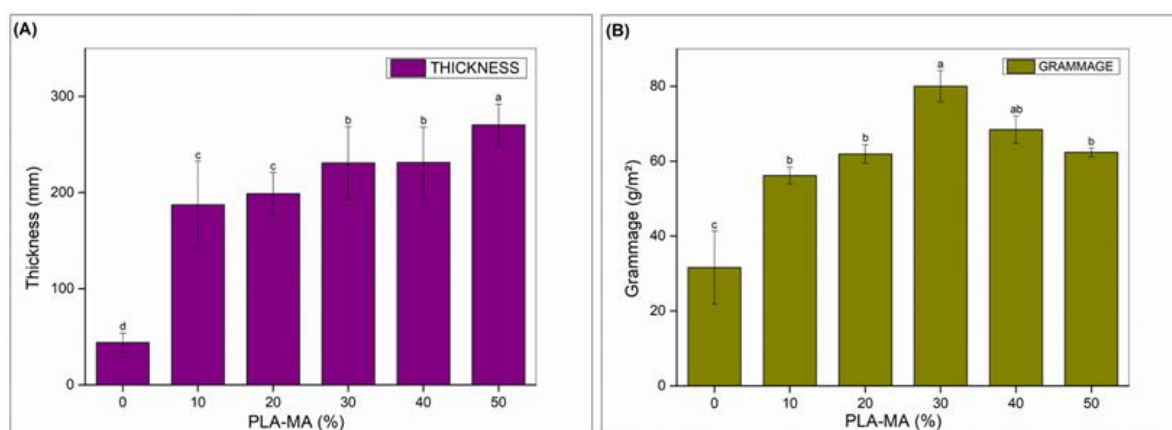
Fonte: Elaboração própria, 2025.

É evidente que os espectros das amostras de PLA-MA exibem a mesma banda característica observada para o filme PLA de controle (PLA-MA 0%), sugerindo que a estrutura do polímero permaneceu inalterada mesmo após a substituição parcial pela biomassa de microalgas. No entanto, pequenas bandas de absorção podem ser observadas nos espectros de filmes contendo microalgas acima de 20% (Figura 1). Essas bandas, em aproximadamente 1585-1680 cm^{-1} e 1495-1575 cm^{-1} , podem corresponder ao alongamento de N-H ou C=O (amida I) e à flexão de N-H (amida II) de grupos proteicos, respectivamente (Torres *et al.*, 2015). Sinais semelhantes também foram associados a grupos funcionais presentes na biomassa pura de microalgas (Bulota; Budtova, 2015; Torres *et al.*, 2015). Dada a sua ausência no nível de substituição de 10%, sua aparência sutil acima de 20% e a ausência de mudanças espectrais, essas bandas provavelmente refletem a presença detectável de componentes de microalgas, em vez de qualquer interação química com a matriz PLA.

Continuando com a avaliação das dimensões físicas dos filmes, a espessura é uma variável crítica em estudos texturais, pois é considerada no cálculo de parâmetros mecânicos e afeta diretamente os resultados de

resistência e elasticidade (Ghasemi *et al.*, 2022; Zhang; Riggelman, 2022). Neste estudo, a substituição parcial do PLA por microalgas cultivadas em águas residuais aumentou significativamente ($p < 0,05$) a espessura do filme (Figura 2A). O filme de controle de PLA (PLA-MA 0%) apresentou a menor espessura média ($0,044 \pm 0,0097$ mm), enquanto o filme contendo 50% de substituição por microalgas apresentou o valor mais alto ($0,270 \pm 0,0215$ mm). Como a massa total do filme foi mantida constante, esse aumento pode ser atribuído à contribuição volumétrica das microalgas incorporadas, associada à menor densidade da biomassa (Ghasemi *et al.*, 2022). No entanto, a espessura do filme não deve ser usada como um indicador direto do custo de produção, apesar de ser frequentemente empregada no controle de custo-rendimento (Oluwasina; Awonyemi, 2021).

Figura 2. Espessura média (mm) (A) e gramatura (g/m^2) (B) dos filmes de PLA-MA em função do substituto de microalgas (0, 10, 20, 30, 40 e 50%). As barras de erro representam o desvio padrão. Letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$).

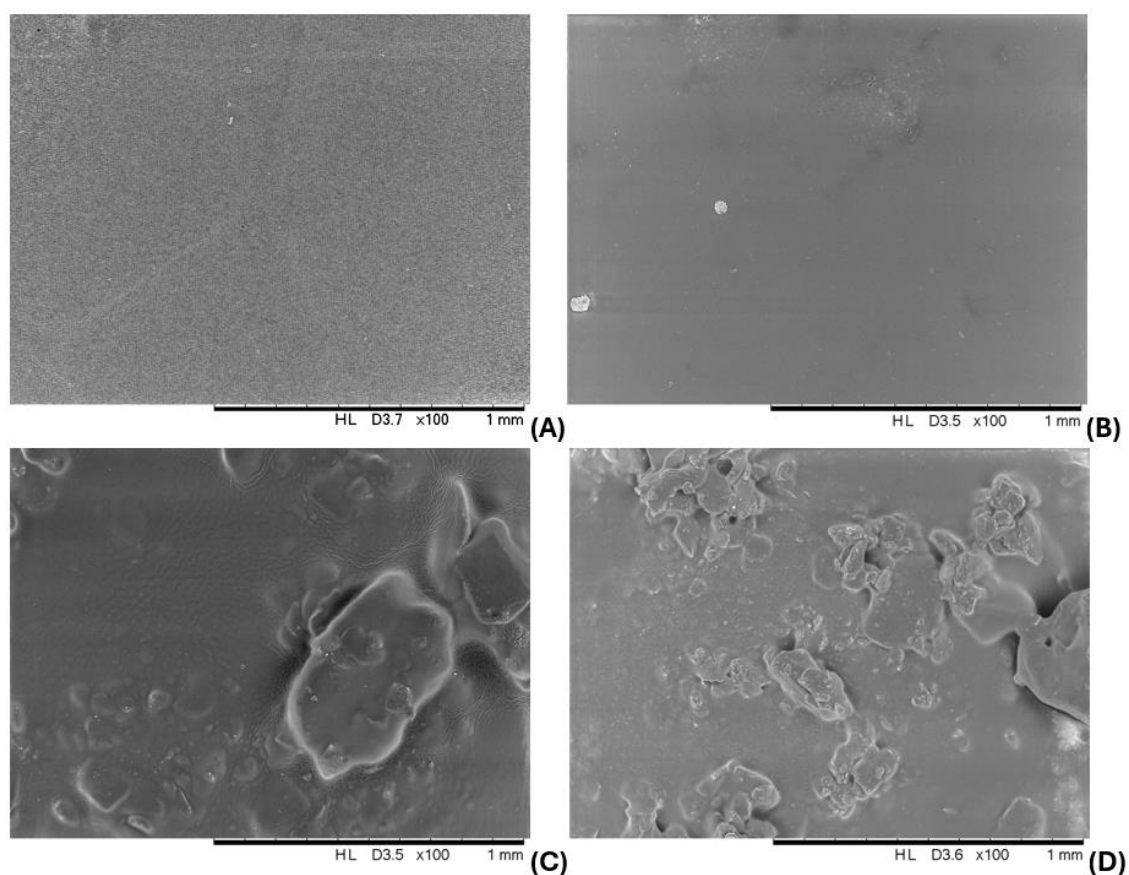


Fonte: Elaboração própria, 2025.

Em relação à distribuição de massa, o aumento na espessura é atribuído à formação de aglomerados à medida que o teor de biomassa aumenta. Concentrações mais altas de biomassa aumentam a viscosidade da dispersão do polímero, dificultando a homogeneidade e promovendo a sedimentação de partículas durante a moldagem e secagem, o que leva a uma distribuição de

massa desigual. Consequentemente, os filmes exibiram separação de fases entre o PLA e a biomassa de microalgas (Nor Adilah *et al.*, 2020; Sharifzadeh, 2021). Esse comportamento é ainda mais corroborado pelos resultados de gramatura (Figura 2B), que apresentaram um valor máximo com 30% de substituição por microalgas, seguido por uma diminuição subsequente, provavelmente influenciada pela distribuição não uniforme da biomassa na matriz do polímero. Além disso, essa redução pode estar relacionada à dispersão incompleta do polímero e à perda parcial da biomassa durante a formação do filme. Para verificar as inferências estruturais feitas a partir de medições físicas, a morfologia da superfície foi examinada, conforme ilustrado nas micrografias MEV na Figura 3.

Figura 3. Morfologia da superfície dos filmes PLA-MA com 0% (A), 10% (B), 20% (C) e 50% (D) de biomassa de microalgas. Todas as micrografias foram obtidas com ampliação de 100X.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O filme de controle (PLA-MA 0%) apresentou uma superfície visualmente lisa, transparente e homogênea, refletindo uma excelente dispersão do PLA (Li *et al.*, 2025). No entanto, após uma inspeção mais detalhada, foram observadas pequenas bolhas e microvazios, provavelmente formados devido à rápida evaporação do solvente durante a etapa de secagem. Em contrapartida, os filmes contendo 50% de biomassa de microalgas apresentaram irregularidades na superfície e aglomeração de partículas (Ravi; Zagabathuni, 2026). Curiosamente, a adição de biomassa pareceu retardar a taxa de evaporação do solvente, resultando em matrizes poliméricas mais contínuas. Especificamente, PLA-MA 10% e PLA-MA 20% produziram uma matriz mais firme e coesa, com partículas uniformemente dispersas e uma superfície lisa e ininterrupta. Nesses filmes, as microalgas atuaram como um enchimento eficaz, moderando a liberação do solvente e impedindo a formação de bolhas observada no filme de controle. Para obter uma visão mais profunda do comportamento estrutural do PLA e da biomassa, foi realizada uma análise FTIR.

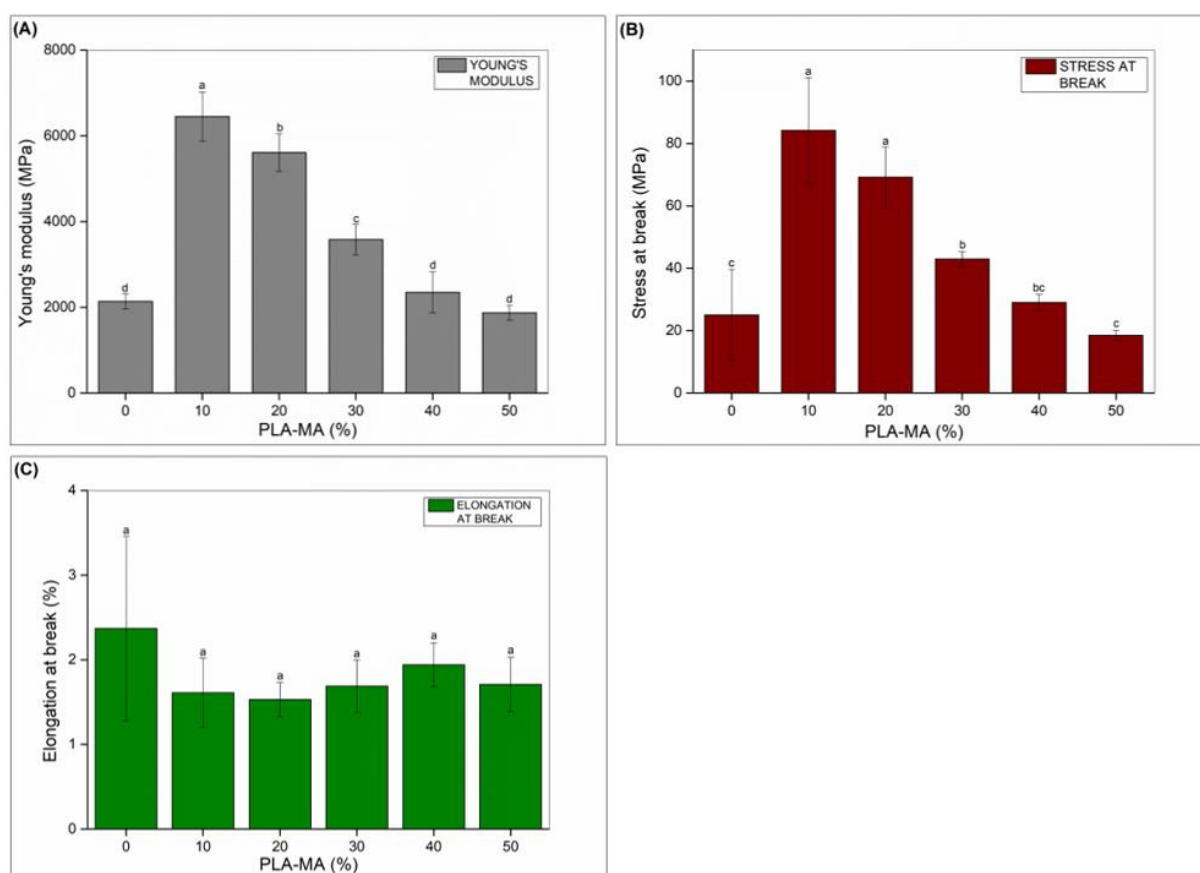
O PLA é um polímero hidrofóbico com uma estrutura composta principalmente por grupos apolares, como grupos metil (-CH₃), e contém apenas um número limitado de grupos funcionais polares (éster -COO), que são insuficientes para estabelecer interações fortes com compostos hidrofílicos (Basu *et al.*, 2016). Em contrapartida, a biomassa de microalgas é predominantemente hidrofílica, devido à abundância de moléculas polares em sua superfície, como proteínas e polissacarídeos, contendo grupos hidroxila (-OH), amino (-NH₂) e carboxila (-COOH) (Finkel *et al.*, 2016). Esses grupos promovem fortes interações entre as próprias partículas de microalgas, fazendo com que elas se agreguem e formem aglomerados, em vez de se dispersarem uniformemente na matriz de PLA.

As descobertas atuais — particularmente o efeito positivo de baixas concentrações de microalgas (10% e 20%) na redução de defeitos superficiais e na promoção de uma matriz polimérica mais coesa — são altamente relevantes para a produção em larga escala. Ao fazer a transição da moldagem à base de

solvente para a extrusão por fusão, a rota de processamento industrial padrão, não são mais esperados problemas de deformação relacionados ao solvente (como as bolhas observadas no filme de controle). Portanto, estudos futuros são recomendados para elucidar melhor como as formulações contendo microalgas se comportam em termos de viscosidade, distribuição de partículas, processabilidade, estabilidade de fusão e a qualidade resultante dos compósitos extrudados.

Por fim, para avaliar o impacto da incorporação de microalgas de águas residuais no desempenho do filme, foram avaliadas as propriedades mecânicas (Figura 4). As variações de espessura discutidas anteriormente foram cuidadosamente consideradas para garantir a precisão dos cálculos de tensão e deformação.

Figura 4. Resultados para (A) módulo de Young (MPa), (B) tensão na ruptura (MPa) e (C) alongamento na ruptura (%) de filmes de PLA-MA com 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de biomassa de microalgas. As barras representam os valores médios de seis réplicas (n=6) e as barras de erro representam o desvio padrão. Para os gráficos (A) e (B), as médias seguidas por letras diferentes diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). Para o gráfico (C), a Análise de Variância (ANOVA) não indicou uma diferença significativa entre as médias ($p \geq 0,05$).



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Efeitos distintos foram observados para o módulo de Young e a tensão na ruptura em função da porcentagem de PLA substituída pela biomassa de microalgas. Na substituição de 10%, a biomassa de microalgas atuou como um agente reforçador eficaz, aumentando a rigidez e a resistência dos filmes. Esse efeito de reforço diminuiu gradualmente à medida que a concentração aumentou para 40%. Além disso, com 50% de substituição, a integridade da matriz polimérica foi comprometida devido à aglomeração de partículas. Esses resultados são consistentes com as análises de gramatura e morfológicas, que indicaram baixa dispersão da biomassa em concentrações mais altas.

O desempenho ideal foi alcançado com 10% de incorporação de biomassa de microalgas. Nessa concentração, os filmes ficaram mais rígidos, com o módulo de Young quase triplicando de 2140,15 MPa (0%) para 6442,58 MPa, e mais resistentes, com a tensão na ruptura aumentando de 25,01 MPa (0%) para 84,15 MPa, representando uma melhoria de 230%. Notavelmente, o

aumento simultâneo e pronunciado na resistência à tração supera relatórios anteriores, nos quais a adição de enchimento frequentemente diminuía a resistência do PLA (Bhagia *et al.*, 2020; Lazaridis *et al.*, 2025), sugerindo que a biomassa de microalgas promoveu uma adesão interfacial surpreendentemente eficaz em um nível de substituição de 10%.

Em relação ao alongamento na ruptura, a ductilidade dos filmes não foi significativamente afetada pela substituição por microalgas. Este é um resultado favorável, uma vez que os materiais normalmente reduzem a ductilidade quando a resistência à tração na ruptura e o módulo de Young aumentam. Os valores médios de alongamento na ruptura variaram de 2,37% para filmes de PLA puro a 1,62% (10%), 1,53% (20%), 1,69% (30%), 1,95% (40%) e 1,72% (50%) para os filmes contendo microalgas.

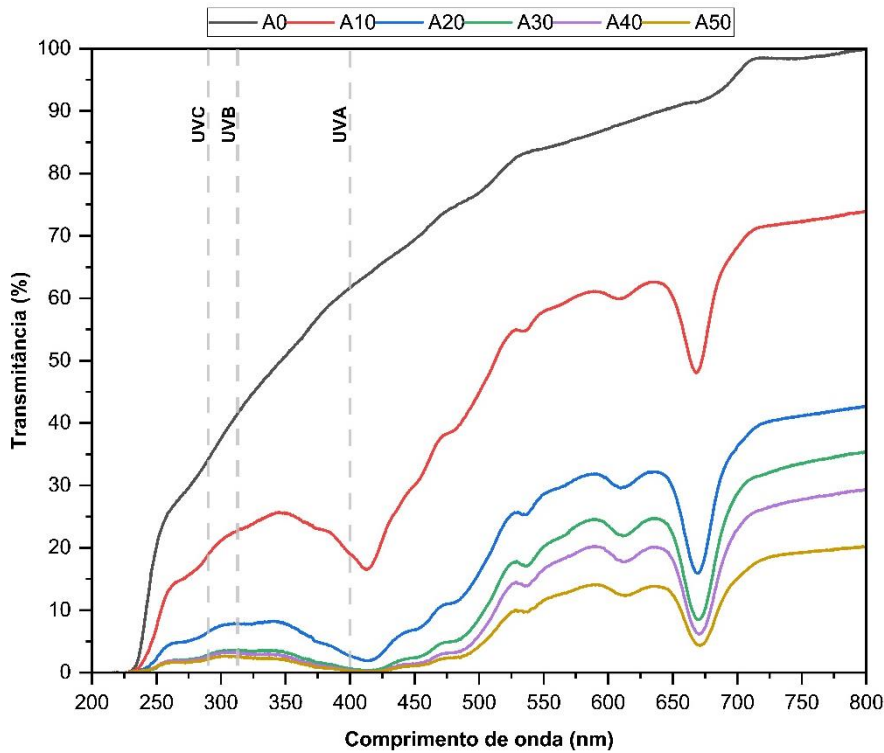
Tabela 1. Valores médios das coordenadas de cor (L*, a*, b*), brilho (Y Branco e Y Preto) e opacidade dos filmes PLA-MA em diferentes concentrações de microalgas. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, de acordo com o teste de Tukey (p<0,05).

PLA-MA (%)	L*	a*	b*	Y White	Y Black	Opacity
0	92.70 ± 0.21 ^a	-0.95 ± 0.03 ^b	1.63 ± 0.07 ^d	82.27 ± 0.49 ^d	11.35 ± 0.27 ^b	13.79 ± 0.41 ^b
10	77.88 ± 0.99 ^b	-4.37 ± 0.15 ^a	39.40 ± 1.07 ^a	53.01 ± 1.68 ^a	9.11 ± 0.18 ^{ab}	17.19 ± 0.20 ^{ab}
20	65.68 ± 1.98 ^c	-1.46 ± 0.31 ^b	49.15 ± 1.94 ^b	34.94 ± 2.54 ^b	7.76 ± 0.28 ^a	22.29 ± 2.43 ^{ac}
30	59.71 ± 0.73 ^c	0.05 ± 0.08 ^{bc}	47.20 ± 0.74 ^b	27.81 ± 0.80 ^b	7.18 ± 0.37 ^a	25.80 ± 0.59 ^c

40	47.85 ± 1.58 ^d	2.50 ± 0.55 ^d	36.18 ± 1.94 ^{ac}	16.69 ± 1.24 ^c	6.50 ± 1.01 ^a	38.84 ± 3.19 ^d
50	47.01 ± 6.55 ^d	1.99 ± 1.34 ^{cd}	32.78 ± 2.28 ^c	16.29 ± 5.01 ^c	6.42 ± 1.47 ^a	39.93 ± 3.25 ^d

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 5. Espectros de absorvância UV-Vis de filmes PLA-MA com 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de biomassa de microalgas.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O efeito mais notável foi o aumento da barreira contra a radiação UV. Conforme mostrado na Figura 5, a biomassa de microalgas foi capaz de bloquear toda a radiação UV incidente (280-400 nm) em concentrações acima de 20%, enquanto o filme PLA puro permaneceu altamente transparente. Este efeito fotoprotetor pronunciado é atribuído aos pigmentos naturalmente presentes na biomassa, tais como carotenóides e clorofilas, que absorvem eficientemente a energia ultravioleta, corroborando relatórios anteriores sobre o potencial das

microalgas como aditivos fotoprotetores naturais em biopolímeros (Martins *et al.*, 2025; Roy Chong *et al.*, 2022; Simkin *et al.*, 2022).

Além disso, a alta absorvância observada em todo o espectro visível (400-700 nm) explica o escurecimento e a redução da transparência dos filmes contendo biomassa de microalgas. Esse efeito foi evidenciado pela diminuição progressiva da luminosidade (L^*) e pelo aumento correspondente na opacidade do filme à medida que o conteúdo de microalgas aumentava. Portanto, a incorporação da biomassa de microalgas na matriz polimérica funciona como um agente opacificante eficaz, promovendo a absorção e a dispersão da luz — comportamento semelhante ao relatado para microalgas *Chlorella* ricas em pigmentos em filmes de quitosana (Deshmukh *et al.*, 2021).

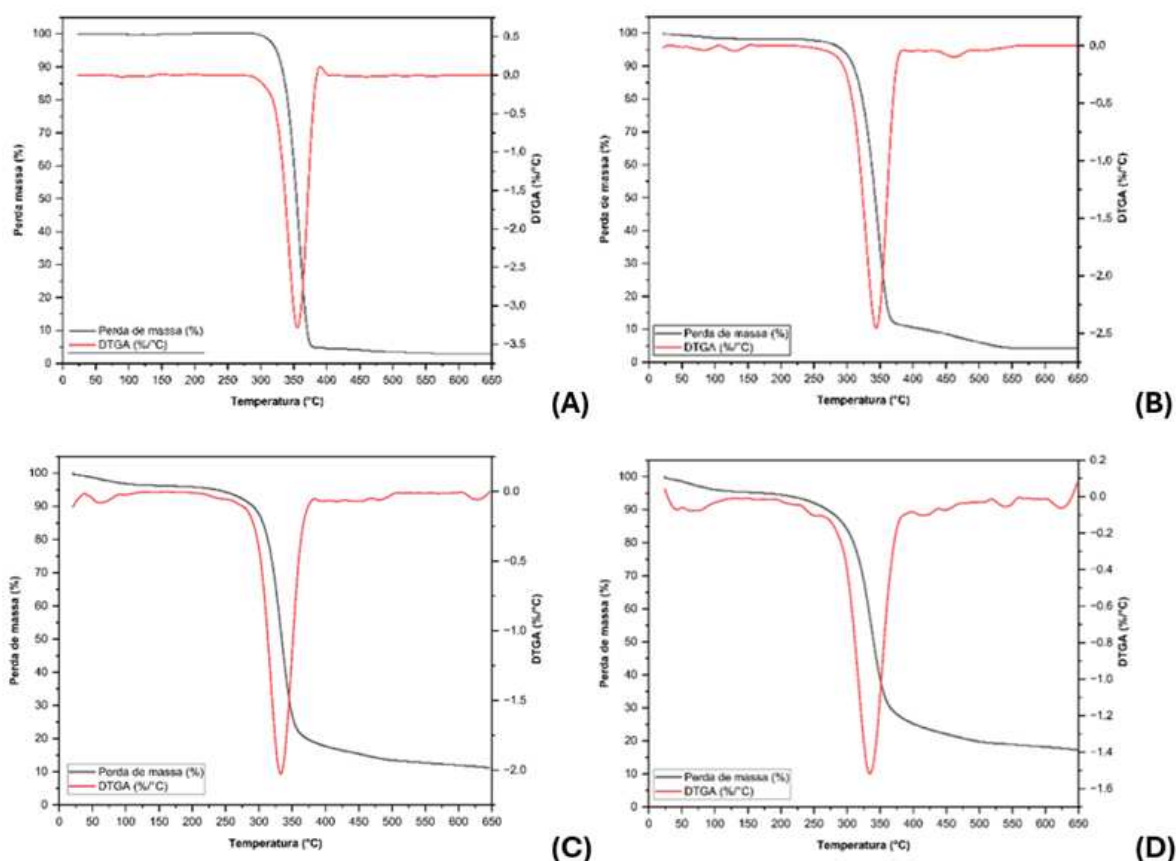
O perfil espectral também explica as complexas mudanças de cor observadas nos filmes. Em concentrações mais baixas de microalgas, a tonalidade verde, evidenciada por valores a^* negativos, surge da absorção da clorofila, que ocorre predominantemente nas regiões azul (~440 nm) e vermelha (~670 nm), enquanto reflete a luz na faixa verde (~500-600 nm) (Fernandes *et al.*, 2020; López-Padilla; Cortés-Rodríguez; Ortega-Toro, 2025; Maletin *et al.*, 2020). No entanto, a coloração verde é mascarada em concentrações mais altas devido à sobreposição de pigmentos amarelos e laranja (carotenóides), resultando em um tom acastanhado. Além disso, pode ter ocorrido degradação química da clorofila durante a preparação do filme. O ambiente ácido gerado durante a dispersão do PLA pode converter a clorofila (verde) em feofitina (marrom acinzentado) (Kusmita; Limantara, 2010). Portanto, a combinação do mascaramento do pigmento e da transformação da clorofila explica a perda da tonalidade verde em concentrações mais elevadas de microalgas.

No geral, a biomassa de microalgas de águas residuais atua como um aditivo multifuncional, modificando simultaneamente a coloração do PLA e proporcionando propriedades eficazes de bloqueio de raios UV. Essa abordagem representa uma estratégia promissora dentro da estrutura da economia circular, valorizando um subproduto de baixo custo para produzir biocompostos com desempenho óptico e funcional aprimorado, adequados para aplicações que exigem proteção contra a degradação induzida pela luz.

A caracterização seguiu-se à análise termogravimétrica de filmes de PLA substituídos por diferentes concentrações de microalgas, conforme mostrado na Figura 6. O filme de controle (PLA-MA 0%) exibiu um perfil de degradação de estágio único, com alta estabilidade até aproximadamente 320 °C e uma temperatura máxima de degradação em torno de 350 °C. Em contraste, observou-se uma perda de massa em múltiplos estágios para filmes contendo microalgas. O primeiro estágio, observado abaixo de 100 °C, foi associado à evaporação da umidade e volatilização de compostos de baixo peso molecular. Os estágios subsequentes corresponderam à degradação do polímero principal e à decomposição de compostos secundários formados durante a quebra. Além disso, também foi observado um início mais precoce da degradação térmica, diminuindo com o aumento do teor de biomassa de ~310 °C para PLA-MA 10% a ~260 °C para PLA-MA 50%. Essa redução na estabilidade térmica é atribuída à decomposição dos componentes da biomassa (como lipídios, proteínas e carboidratos), que se degradam em temperaturas mais baixas do que a matriz PLA (Arif *et al.*, 2021). No entanto, a temperatura máxima de degradação dos filmes contendo microalgas permaneceu em torno de 340 °C.

Além disso, o aumento linear na massa residual, de aproximadamente 3% para PLA puro a cerca de 17% no filme com 50% de substituição por microalgas, é consistente com os resultados esperados. Esse comportamento é atribuído à carbonização da biomassa, que produz um resíduo carbonoso (biocarvão), em contraste com a volatilização quase completa do PLA puro durante a pirólise (Bach; Chen, 2017). Em resumo, os resultados estão alinhados com os efeitos típicos da incorporação de um enchimento orgânico hidrofílico no perfil de degradação térmica do PLA.

Figura 6. Análise termogravimétrica (TGA) e curvas derivadas (DTG) dos filmes PLA-MA com (A) 0%, (B) 10%, (C) 30% e (D) 50% de biomassa de microalgas.

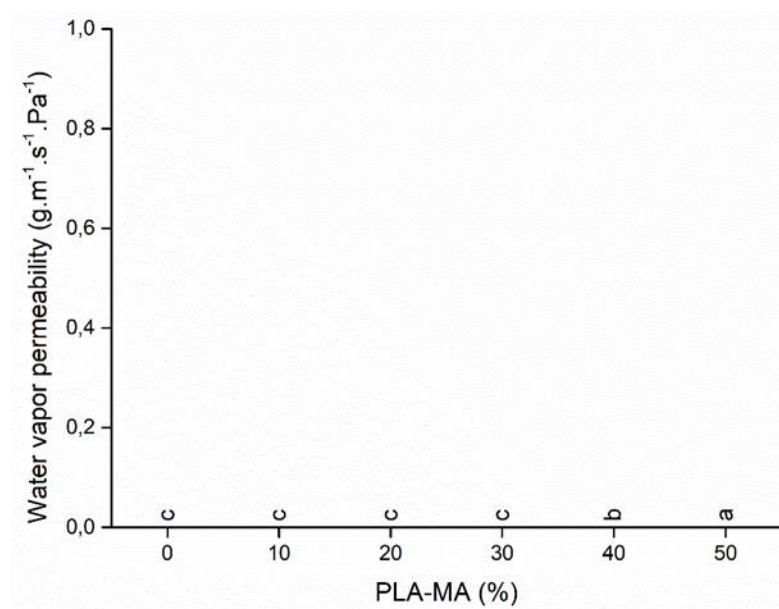


Fonte: Elaboração própria, 2025.

Embora a incorporação de microalgas na matriz de PLA tenha reduzido a estabilidade térmica geral dos filmes, as temperaturas de início da degradação permaneceram bem acima da faixa de fusão do PLA (normalmente 150-170 °C). Isso indica que os compósitos contendo microalgas podem suportar facilmente as condições de processamento térmico exigidas para o PLA, como extrusão e moldagem por injeção. Portanto, as microalgas derivadas de águas residuais representam um excelente substituto parcial para o PLA, reduzindo os custos de material e, ao mesmo tempo, melhorando as propriedades funcionais e contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e econômicos.

O estudo avaliou então a permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes de PLA-MA para avaliar seu desempenho de barreira. Essa análise permite compreender como a incorporação de microalgas afeta a resistência dos filmes à transferência de umidade. Os resultados são ilustrados na Figura 7.

Figura 7. Permeabilidade ao vapor de água dos filmes PLA-MA com (A) 0%, (B) 10%, (C) 30% e (D) 50% de biomassa de microalgas.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

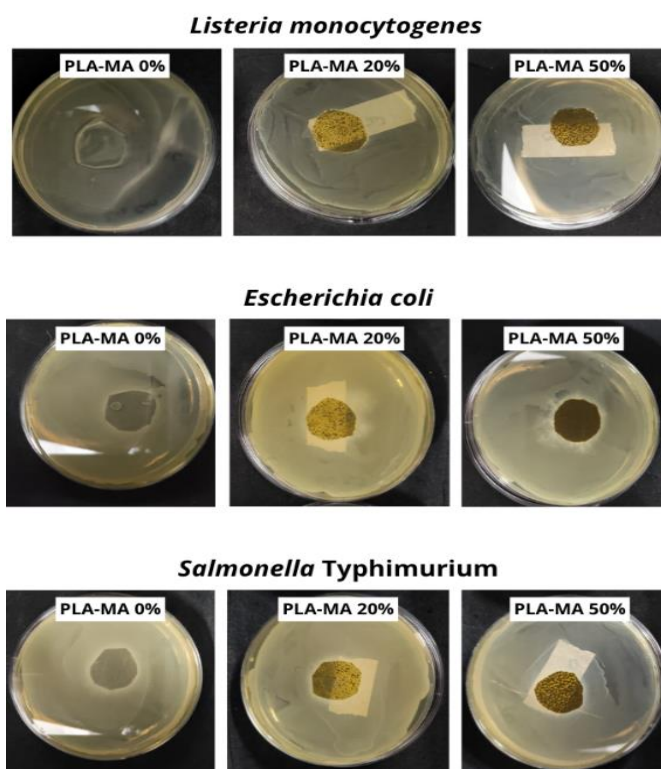
A substituição parcial do PLA por microalgas aumentou os valores de PVA, indicando uma redução na capacidade dos filmes de atuarem como barreiras à umidade. Em concentrações acima de 40%, a formação de aglomerados de partículas provavelmente criou “atalhos” dentro da rede de polímeros, facilitando ainda mais a transferência de umidade através do filme.

Essa distinção é fundamental para a aplicação do material. As formulações contendo até 30% de microalgas apresentam excelentes propriedades de equilíbrio, tornando-as adequadas para várias aplicações, como filmes de cobertura morta para regiões áridas, onde a retenção da umidade do solo é a função principal. Por outro lado, filmes com 40% e 50% de microalgas, que exibiram alta PVA, são mais adequados para aplicações em que a permeabilidade é vantajosa, como vasos biodegradáveis ou bandejas de mudas, pois sua maior capacidade de troca de umidade com o solo pode acelerar a decomposição após o plantio.

Em relação à solubilidade, nenhum dos filmes se dissolveu na água, mesmo com 50% de conteúdo de microalgas, sugerindo que o PLA foi capaz de “encapsular” a biomassa, impedindo sua liberação ou solução em meio aquoso. Além disso, os testes de inchaço mostraram absorção de água estatisticamente semelhante em todas as formulações, com valores médios de 0,34%, indicando que a incorporação de microalgas permite que a água se difunda através da matriz sem ser retida ou causar a desintegração do filme. Esse comportamento reforça as hipóteses de encapsulamento das microalgas na matriz de PLA, o que impede o inchaço e a solubilidade, enquanto modifica ligeiramente a estrutura interna para permitir a difusão da água.

Na análise microbiológica das microalgas, não foi observado crescimento microbiano em placas Pertrifilms™ para *S. aureus*, *E. coli* e coliformes, *Salmonella* e *L. monocytogenes*. Apenas microorganismos aeróbicos totais foram detectados, a $3,5 \times 10^3$ UFC/ml. Embora as microalgas sejam originárias de águas residuais sanitárias, essa carga microbiana é relativamente baixa e nenhum patógeno entérico ou fecal foi detectado. Esse perfil de segurança pode ser atribuído ao processo de congelamento e liofilização aplicado durante o processamento das microalgas, o que reduz consideravelmente a atividade da água da amostra e afeta o crescimento microbiano (Adams; Cook; Ward, 2015). Além disso, durante o polimento das águas residuais, as microalgas são expostas à luz solar intensa, flutuações de pH, competição dentro da comunidade microbiana e outros fatores de estresse ambientais que suprimem naturalmente a sobrevivência de patógenos entéricos. Portanto, esses resultados confirmam que as microalgas processadas são microbiologicamente seguras para uso como substituto parcial de polímeros em filmes de PLA. A atividade antimicrobiana dos filmes de PLA-MA parcialmente substituídos por microalgas pode ser observada na Figura 8.

Figura 8. Análise antimicrobiana de filmes PLA-MA com 0%, 20% e 50% (m/m) de biomassa de microalgas contra *Listeria monocytogenes*, *E. coli* e *Salmonella Typhimurium*.



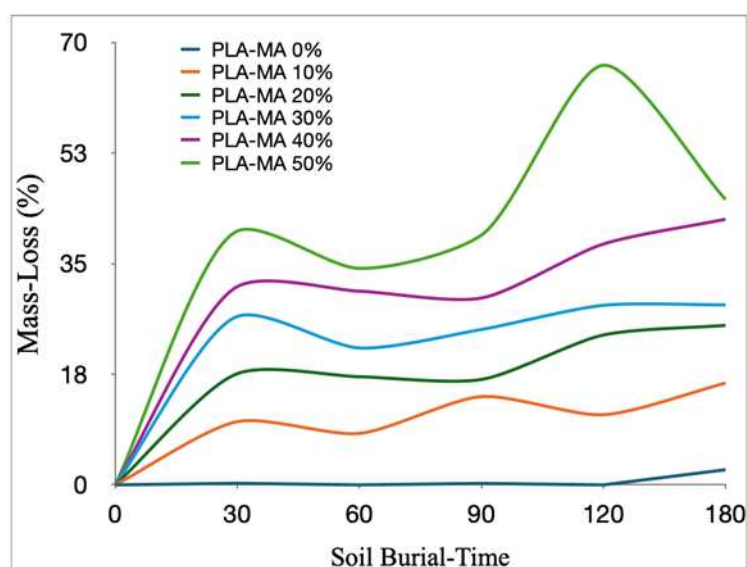
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Para *Listeria monocytogenes*, observou-se uma zona de inibição sutil (~1 mm) para filmes de PLA puro (PLA-MA 0%), enquanto nenhuma inibição foi detectada para os filmes PLA-MA 20% e 50%. Para *E. coli* e *Salmonella Typhimurium*, nenhum dos filmes exibiu zonas de inibição do crescimento microbiano. Quando associado a substâncias bioativas, o PLA pode exibir atividade antimicrobiana, conforme demonstrado em estudos, que desenvolveram filmes para embalagens de alimentos de PLA com celulose microcristalina modificada com N-halamina que inativou as células de *E. coli* e *S. aureus* (An *et al.*, 2023). Da mesma forma, Theinsathid *et al.* (2012) (Theinsathid *et al.*, 2012) relataram atividade antibacteriana contra *L. monocytogenes* e *S. Typhimurium* em filmes de PLA revestidos com alginato de Laurie. Neste estudo, a falta de atividade antimicrobiana in vitro dos filmes de microalgas contra as cepas testadas pode estar relacionada à baixa concentração de compostos bioativos presentes nas microalgas ou à difusão limitada desses compostos da matriz polimérica em ágar BHI (Perumal Pillai *et*

al., 2023). Consequentemente, os filmes de PLA-MA apresentam potencial limitado para aplicações que exigem funcionalidade antimicrobiana.

A biodegradabilidade foi subsequentemente avaliada por meio de um teste de enterramento no solo, e os resultados da perda de massa são resumidos na Figura 9.

Figura 9. Porcentagem de perda de massa de filmes de PLA-MA com (A) 0%, (B) 10%, (C) 30% e (D) 50% de biomassa de microalgas, ao longo do tempo e em condições de enterramento no solo.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Para facilitar a interpretação dos dados, os resultados da perda de massa foram apresentados em um gráfico, o que permite uma visualização mais clara do comportamento de degradação ao longo do tempo e possibilita uma comparação mais direta entre as diferentes concentrações de microalgas. É importante observar que essa análise está sujeita a uma variabilidade considerável, uma vez que partículas do solo podem aderir às amostras de filme durante o teste de degradação, influenciando potencialmente a perda de massa medida. Apesar dessa limitação, a tendência geral de degradação permanece evidente: formulações com concentrações mais altas de microalgas exibem

inclinações mais acentuadas de perda de massa, indicando um aumento na taxa de biodegradação.

Testes de biodegradabilidade demonstraram que a incorporação de microalgas como substituto parcial do PLA acelerou significativamente a decomposição do filme. A análise foi realizada por um período de até 180 dias. O filme de controle (PLA-MA 0%) não se degradou após 120 dias, sugerindo sua alta resistência ao enterramento no solo nas condições avaliadas. Em contrapartida, os filmes contendo microalgas apresentaram perdas de massa que variaram de 11% a 90% para filmes com 10% e 50% de biomassa, respectivamente. Esse comportamento pode ser explicado por dois mecanismos: i) as microalgas estimulam a atividade microbiana no ambiente circundante, aumentando a biodegradação (Huang *et al.*, 2024); e ii) os componentes hidrofílicos promovem o processo hidrolítico dentro da matriz polimérica (Liberti *et al.*, 2024). Notavelmente, o filme PLA-MA 50% apresentou um aumento acentuado na perda de massa entre 90 e 120 dias, de 39,54% para 89,47%. Esses resultados indicam que as microalgas aceleram a taxa de degradação do PLA, que pode ser ajustada pela alteração do teor de biomassa, destacando seu potencial para o desenvolvimento de materiais bioplásticos mais sustentáveis e ecológicos.

4.4. Conclusão

Este estudo desenvolveu com sucesso filmes PLA biodegradáveis parcialmente substituídos por biomassa de microalgas derivadas de águas residuais (0-50% p/p) utilizando o método de moldagem. A biomassa integrou-se bem na matriz em proporções até 30%, resultando em filmes coesivos e homogêneos, enquanto cargas mais elevadas (40-50%) levaram a uma dispersão heterogênea. O conteúdo de microalgas modulou várias propriedades do filme: a espessura e a gramatura aumentaram com a adição de biomassa, a cor mudou de transparente para verde-amarelado e as micrografias MEV revelaram microvazios e aglomeração de partículas em concentrações mais altas (40-50%). Em relação ao desempenho mecânico, baixos níveis de

microalgas (10-20%) atuaram como um agente de reforço, aumentando o módulo de Young e a resistência à tração na ruptura, aumentando assim a rigidez sem afetar significativamente o alongamento na ruptura. Em contrapartida, a estabilidade térmica e as propriedades de barreira ao vapor de água reduziram com o aumento do teor de microalgas, embora os materiais permanecessem processáveis e termicamente estáveis acima do ponto de fusão do PLA. Os filmes também demonstraram estabilidade à água, apresentando solubilidade insignificante e baixo inchaço. O resultado mais notável está relacionado à biodegradabilidade: a biomassa de microalgas atuou como um agente pró-degradante eficaz. Todos os compósitos contendo microalgas apresentaram degradação visível após 30 dias, atingindo uma perda de massa de 89,47% para PLA-MA 50% após 120 dias, enquanto o filme PLA de controle permaneceu inalterado. Embora nenhuma atividade antimicrobiana tenha sido detectada, a ausência de microrganismos patogênicos nos filmes confirma seu uso seguro. No geral, as microalgas derivadas de águas residuais em PLA representam uma abordagem sustentável e versátil: concentrações mais baixas (10-20%) melhoram o desempenho mecânico, enquanto concentrações mais altas (50%) promovem uma rápida biodegradação. Esta estratégia destaca o potencial da biomassa derivada de águas residuais para acelerar a decomposição do PLA e abre oportunidades promissoras para aplicações no setor agrícola, tais como filmes de cobertura morta ou tubos para mudas.

Referências

ADAMS, G. D. J.; COOK, I.; WARD, K. R. The Principles of Freeze-Drying. *In*: WOLKERS, W. F.; OLDENHOF, H. (org.). **Cryopreservation and Freeze-Drying Protocols**. New York, NY: Springer New York, 2015. (Methods in Molecular Biology). v. 1257, p. 121–143. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-2193-5_4. Acesso em: 21 out. 2025.

AN, L. *et al.* Development of polylactic acid based antimicrobial food packaging films with N-halamine modified microcrystalline cellulose. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 242, p. 124685, 2023.

ARIF, M. *et al.* A complete characterization of microalgal biomass through FTIR/TGA/CHNS analysis: An approach for biofuel generation and nutrients removal. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 163, p. 1973–1982, 2021.

ASTM, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, D882- 18, (2018) 1–12. <https://doi.org/10.1520/D0882-18>.

ASTM, Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of materials. ASTM E96/E96M-15, (2015) 1–13. https://doi.org/10.1520/E0096_E0096M-15.

BACH, Q.-V.; CHEN, W.-H. Pyrolysis characteristics and kinetics of microalgae via thermogravimetric analysis (TGA): A state-of-the-art review. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 246, Special Issue on Biochar: Production, Characterization and Applications – Beyond Soil Applications, p. 88–100, 2017.

BASU, A. *et al.* Poly(lactic acid) based hydrogels. **Advanced Drug Delivery Reviews**, [s. l.], v. 107, PLA biodegradable polymers, p. 192–205, 2016.

BHAGIA, S. *et al.* Tensile properties of 3D-printed wood-filled PLA materials using poplar trees. **Applied Materials Today**, [s. l.], v. 21, p. 100832, 2020.

BULOTA, M.; BUDTOVA, T. PLA/algae composites: Morphology and mechanical properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 73, p. 109–115, 2015.

CHONG, J. W. R. *et al.* Advances in production of bioplastics by microalgae using food waste hydrolysate and wastewater: A review. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 342, p. 125947, 2021.

DESHMUKH, A. R. *et al.* Biodegradable films based on chitosan and defatted *Chlorella* biomass: Functional and physical characterization. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 337, p. 127777, 2021.

FERNANDES, A. S. *et al.* HPLC-PDA-MS/MS as a strategy to characterize and quantify natural pigments from microalgae. **Current Research in Food Science**, [s. l.], v. 3, p. 100–112, 2020.

FINKEL, Z. V. *et al.* Phylogenetic Diversity in the Macromolecular Composition of Microalgae. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. e0155977, 2016.

GHASEMI, B. *et al.* Thickness Dependence of Electronic Structure and Optical Properties of F8BT Thin Films. **Polymers**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 641, 2022.

HE, L. *et al.* Toward strong and super-toughened PLA via incorporating a novel fully bio-based copolyester containing cyclic sugar. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 207, p. 108558, 2021.

HUANG, F. *et al.* Microalgae-bacterial consortiums for enhanced degradation of nonylphenol: Biodegradability and kinetic analysis. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 370, p. 122400, 2024.

JAYARAMAN, J. *et al.* Wastewater treatment by algae-based membrane bioreactors: a review of the arrangement of a membrane reactor, physico-

chemical properties, advantages and challenges. **RSC Advances**, [s. l.], v. 14, n. 47, p. 34769–34790, 2024.

KALITA, N. K. *et al.* Biodegradation and characterization study of compostable PLA bioplastic containing algae biomass as potential degradation accelerator. **Environmental Challenges**, [s. l.], v. 3, p. 100067, 2021.

KUMAR, G. S. P. *et al.* Enhanced mechanical properties of CNT/Graphene reinforced PLA-based composites fabricated via fused deposition modelling. **Results in Engineering**, [s. l.], v. 25, p. 104472, 2025.

KUSMITA, L.; LIMANTARA, L. THE INFLUENCE OF STRONG AND WEAK ACID UPON AGGREGATION AND PHEOPHYTINIZATION OF CHLOROPHYLL A AND B. **Indonesian Journal of Chemistry**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 70–76, 2010.

LAZARIDIS, D. G. *et al.* Filmes bioativos à base de PLA reforçados com subprodutos agroindustriais para avaliação da vida útil de fatias de abacaxi minimamente processadas (*Ananas comosus* L.). **Food Research International**, [s. l.], v. 221, p. 117602, 2025.

LAZARO-HDEZ, C. *et al.* Enhancing Polylactic Acid Films With Polyethylene Glycol-Based Plasticizers: A Reactive Extrusion Approach. **Macromolecular Rapid Communications**, [s. l.], v. 46, n. 14, p. 2401130, 2025.

LETWABA, J. *et al.* Design of compostable toughened PLA / PBAT blend with algae via reactive compatibilization: The effect of algae content on mechanical and thermal properties of bio-composites. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 141, n. 14, p. e55204, 2024.

LI, J. *et al.* Study on the structure–property relationship of starch/PLA composite films modified by the synergistic effect of aromatic rings and aliphatic chains. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 241, p. 111567, 2025.

LI, B. *et al.* Sustainable strategy for lignin etherification and its promotion of anti-UV aging PLA biocomposite. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 500, p. 156746, 2024.

LIBERTI, D. *et al.* Beyond Bioremediation: The Untapped Potential of Microalgae in Wastewater Treatment. **Water**, [s. l.], v. 16, n. 19, p. 2710, 2024.

LÓPEZ-PADILLA, A.; CORTÉS-RODRÍGUEZ, M.; ORTEGA-TORO, R. Development and Comparative Analysis of Hard and Soft Wheat Flour Films Enriched with Yellow and White *Chlorella vulgaris* Algae. **Polymers**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 785, 2025.

MALETIN, A. *et al.* Analysis of colorimetric parameters of international commission on illumination L*a*b* system in the color of maxillary central incisors. **Medicinski pregled**, [s. l.], v. 73, n. 9–10, p. 309–314, 2020.

MARÍN, A. *et al.* Long-term monitoring of biofilm succession unveils differences between biodegradable and conventional plastic materials. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 214, p. 117820, 2025.

MARTINS, V. F. R. *et al.* Biodegradable Films with Polysaccharides, Proteins, and Bioactive Compounds from *Lobosphaera* sp.: Antioxidant and Antimicrobial Activities. **Foods**, [s. l.], v. 14, n. 8, p. 1327, 2025.

NOR ADILAH, A. *et al.* Development of polyethylene films coated with gelatin and mango peel extract and the effect on the quality of margarine. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], v. 26, p. 100577, 2020.

O'LOUGHLIN, J. *et al.* The Potential of Bio-Based Polylactic Acid (PLA) as an Alternative in Reusable Food Containers: A Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 21, p. 15312, 2023.

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**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 1706–1716, 2021.

PERUMAL PILLAI, B. *et al.* Bio-based materials for antimicrobial films in food applications: beyond the COVID-19 pandemic era. **Oxford Open Materials Science**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. itad016, 2023.

PONNUSAMY, P. G.; MANI, S. Material and Environmental Properties of Natural Polymers and Their Composites for Packaging Applications—A Review. **Polymers**, [s. l.], v. 14, n. 19, p. 4033, 2022.

RAVI, V. C.; ZAGABATHUNI, A. Synergistic effects of pyrolytic carbon reinforcement and annealing on the structural, mechanical, and tribological properties of SLA 3D printed PLA composites. **Materials Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 347, p. 131508, 2026.

ROY CHONG, J. W. *et al.* Microalgae-based bioplastics: Future solution towards mitigation of plastic wastes. **Environmental Research**, [s. l.], v. 206, p. 112620, 2022.

SAYIN, S. *et al.* Marine Algae-PLA composites as de novo alternative to porcine derived collagen membranes. **Materials Today Chemistry**, [s. l.], v. 17, p. 100276, 2020.

SHAHDAN, D. *et al.* Strategies for strengthening toughened poly(lactic acid) blend via natural reinforcement with enhanced biodegradability: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 251, p. 126214, 2023.

SHARIFZADEH, E. Evaluating the dependency of polymer/particle interphase thickness to the nanoparticles content, aggregation/agglomeration factor and type of the exerted driving force. **Iranian Polymer Journal**, [s. l.], v. 30, n. 10, p. 1063–1072, 2021.

SHELLY, D. *et al.* Mechanical performance of bio-based fiber reinforced polymer composites: A review. **Polymer Composites**, [s. l.], v. 46, n. S3, p. S9–S43, 2025.

SIMKIN, A. J. *et al.* The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. **Photosynthesis Research**, [s. l.], v. 152, n. 1, p. 23–42, 2022.

THEINSATHID, P. *et al.* Antimicrobial Activity of Lauric Arginate-Coated Polylactic Acid Films against *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* Typhimurium on Cooked Sliced Ham. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 77, n. 2, 2012. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1750-3841.2011.02526.x>. Acesso em: 21 out. 2025.

TORRES, S. *et al.* Green Composites from Residual Microalgae Biomass and Poly(butylene adipate-co-terephthalate): Processing and Plasticization. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 614–624, 2015.

TRINH, B. M.; CHANG, B. P.; MEKONNEN, T. H. The barrier properties of sustainable multiphase and multicomponent packaging materials: A review. **Progress in Materials Science**, [s. l.], v. 133, p. 101071, 2023.

VO, T.-D.-H. *et al.* Simultaneous organic and nutrient removal in wastewater using a revolving algae biofilm reactor. **Environmental Technology & Innovation**, [s. l.], v. 37, p. 103949, 2025.

YANG, Y. *et al.* Applicability analysis of algae biochar for anaerobic membrane bioreactors in wastewater treatment: A review from a sustainability assessment perspective. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 957, p. 177609, 2024.

ZHANG, T.; RIGGLEMAN, R. A. Thickness-Dependent Mechanical Failure in Thin Films of Glassy Polymer Bidisperse Blends. **Macromolecules**, [s. l.], v. 55, n. 1, p. 201–209, 2022.

ZHAO, X. *et al.* Synergistic effects of chain extenders and natural rubber on PLA thermal, rheological, mechanical and barrier properties. **Polymer**, [s. l.], v. 269, p. 125712, 2023.

5. CONCLUSÃO GERAL

Filmes biocompósitos à base de PLA foram preparados com sucesso incorporando biomassa de microalgas cultivadas em sistemas de tratamento de águas residuais. Os resultados evidenciaram que o potencial dessa biomassa transcende sua função primária na fitorremediação de efluentes, posicionando-a como uma matéria-prima técnica valiosa para a engenharia de materiais. A utilização deste recurso renovável permitiu modular as propriedades da matriz de PLA, conferindo novas funcionalidades sem comprometer a segurança biológica do material, conforme validado pelos ensaios antimicrobianos.

A revisão sistemática e a análise do estado da arte foram fundamentais para identificar que a interseção entre o tratamento de efluentes e a ciência dos polímeros é um campo incipiente, mas com vastas oportunidades. Demonstrou-se que as microalgas atuam como aditivos multifuncionais em filmes poliméricos, melhorando as propriedades de barreira ao oxigênio e agindo como agentes de proteção UV e antioxidantes. Tais características são de extremo interesse para a área de embalagens de alimentos, onde a proteção contra a oxidação lipídica e a degradação induzida pela luz é essencial para a manutenção da vida útil dos produtos.

No desenvolvimento experimental, a concentração de biomassa mostrou-se um fator determinante. Embora teores elevados (>20%) tenham introduzido desafios de compatibilidade estrutural, eles foram cruciais para a obtenção de uma taxa de biodegradação notável, atingindo 89% em 120 dias. Esta característica, somada à capacidade de retenção de umidade e à segurança biológica, indica que o material possui um potencial promissor para o setor agrícola, especificamente para a técnica de mulching (cobertura de solo). A aplicação desses filmes em plantações pode oferecer uma alternativa sustentável aos plásticos convencionais, decompondo-se naturalmente no solo após o ciclo de cultivo e contribuindo para a redução de resíduos plásticos no campo.

Em suma, este trabalho demonstra que a biomassa de microalgas residual é uma carga funcional viável para bioplásticos de ciclo de vida curto. A

integração entre a biorrefinaria de águas residuais e a indústria de polímeros oferece uma solução robusta para a economia circular, atendendo tanto às rigorosas exigências de proteção do setor de alimentos quanto às necessidades de sustentabilidade da agricultura moderna. Investigações futuras devem focar na otimização da adesão interfacial e no escalonamento industrial por processos de extrusão para consolidar a transição comercial desses novos materiais.