

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Avaliação do uso de xilanas extraídas de polpas de eucalipto em matriz de
carboximetilcelulose**

Letícia Said Marangon
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

LETÍCIA SAID MARANGON

Avaliação do uso de xilanas extraídas de polpas de eucalipto em matriz de carboximetilcelulose

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

Orientadora: Deusanilde de Jesus Silva

Coorientadores: Jose Mauro de Almeida
Taila V. de Oliveira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

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

T

M311a
2025

Marangon, Letícia Said, 1998-

Avaliação do uso de xilanas extraídas de polpas de eucalipto em matriz de carboximetilcelulose / Letícia Said Marangon. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (91 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Deusanilde de Jesus Silva.

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

Referências bibliográficas: f. 70-91.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.784>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Hemicelulose. 2. Polímeros. 3. Eucalipto.
4. Sustentabilidade. I. Silva, Deusanilde de Jesus, 1963-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Química.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDD 22. ed. 661.802

LETÍCIA SAID MARANGON

Avaliação do uso de xilanas extraídas de polpas de eucalipto em matriz de carboximetilcelulose

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

APROVADA: 25 de setembro de 2025.

Assentimento:

Letícia Said Marangon
Autora

Deusanilde de Jesus Silva
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 02/12/2025 às 17:10:28 e pela orientadora em 03/12/2025 às 16:43:58. 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 **LQGI.W9OJ.HZZW** e clique no botão 'Validar documento'.

À minha família, em especial ao meu pai, Francisco Evandro Marangon

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela minha vida, e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos com determinação, sabedoria, inteligência, saúde e fé, permitindo que meus objetivos fossem alcançados ao longo do curso de mestrado.

Aos meus pais e a minha irmã, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência, enquanto eu me dedicava à realização e conquista do Mestrado em Engenharia Química.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, pelas oportunidades concebidas.

Ao pró-reitor de pesquisa e pós-graduação Raul Narciso Carvalho Guedes e equipe técnica do departamento de pesquisa e pós-graduação, PPG UFV, por serem sempre solícitos.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. De forma especial, à professora Renata Pereira Lopes Moreira e equipe técnica, mostrando-se sempre solícitos e estarem sempre disponíveis para ajudar.

Aos professores Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Marcelo Moreira da Costa, José Ivo Ribeiro Júnior e Noé Mitterhofer Eiterer Ponce de Leon da Costa, por serem sempre solícitos.

Aos colegas de laboratório, Isabela Cabral Ferreira do LABPIM/DEQ; Karina Sampaio da Silva e Marcela de Oliveira Brahim Cortez do LaNaQua/DEQ; Fernanda Pereira da Silva Araújo e Giselle de Souza Cupertino do PROTEC/DEQ; Inês Clarissa Gomes Sousa, Francisca Liliane Rocha da Silva, Gabriela Rosa Bailon, Lais Fernanda Batista e Amanda Lélis de Souza do LABEM/DTA; Arthur Vinicius de Abreu Oliveira do LAPROBQI/DTA por tornar o ambiente de trabalho mais leve. Ebio Viana Meneses Neto, secretário do programa de pós-graduação em engenharia química, e demais funcionários do DEQ por estarem sempre disponíveis para ajudar. Aos técnicos de laboratório João Carlos Batista, Rodrigo Fraga de Almeida, Cassio Anderson Martins Caetano, Gabriel de Castro Baião Brumano e Jamille Carvalho de Souza do LCP/DEF e Fernando Antônio Rodrigues do LABEM/DTA, e demais funcionários por estarem sempre disponíveis para ajudar.

À Professora Deusanilde de Jesus Silva.

Aos Professores Taíla Veloso de Oliveira e José Mauro de Almeida.

À FAPEMIG, pela bolsa de mestrado concedida.

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).

Por fim, às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso e que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação.

“[...] A vida é uma grande universidade, mas pouco ensina a quem não sabe ser um
aluno.”

Augusto Cury, Dez leis para ser feliz.

“Tudo posso naquEle que me fortalece.”

(Filipenses 4:13, Bíblia Sagrada)

RESUMO

MARANGON, Letícia Said, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2025. **Avaliação do uso de xilanas extraídas de polpas de eucalipto em matriz de carboximetilcelulose.** Orientadora: Deusanilde de Jesus Silva. Coorientadores: Jose Mauro de Almeida e Taila Veloso de Oliveira.

A busca por matérias-primas provenientes de fontes renováveis tem sido fundamental para suprir o crescente interesse por materiais mais sustentáveis e biodegradáveis. Nesse contexto, as xilanas, principais hemiceluloses de madeiras folhosas e frequentemente tratadas como subprodutos nos processos de polpação de celulose branqueada de alta pureza, dispõe como uma alternativa promissora para uso como aditivos renováveis em matrizes poliméricas. Devido à suas propriedades, podem ser extraídas facilmente em meio alcalino, favorecendo sua aplicação em materiais de base polimérica. Assim, este estudo teve como principais objetivos a extração de xilanas a partir de três amostras de polpas de eucalipto, obtidas em diferentes etapas do processo kraft (polpação, deslignificação com oxigênio e branqueamento), e a avaliação de seu potencial como aditivo em matrizes poliméricas de carboximetilcelulose (CMC). As xilanas extraídas foram incorporadas à CMC nas concentrações de 2%, 6% e 10%, com o intuito de analisar os efeitos dessas proporções sobre as propriedades dos filmes formados, em comparação com o filme plastificado com glicerol. O filme de CMC puro, sem a adição de plastificante, foi utilizado como controle. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e os efeitos médios dos tratamentos foram comparados pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade. A extração alcalina das xilanas resultou em rendimentos de 3,26% para a polpa marrom, 4,12% para a polpa pré-deslignificada e 2,01% para a polpa branqueada, considerando a massa seca de cada polpa. A TGA das xilanas indicou degradação principal entre na faixa de 270–290°C, evidenciando que o grau de purificação influencia o perfil térmico do aditivo. O DRX revelou picos amplos entre 18°–22° (2 θ), típicos de estruturas amorfas, enquanto o FTIR mostrou bandas características das hemiceluloses em ~3454 cm⁻¹ (O–H), ~2933 cm⁻¹ (C–H), ~1253 cm⁻¹ (C=O), ~1555 cm⁻¹ (C=C) e ~900 cm⁻¹ (C–O). O tamanho de partícula das xilanas por EDL apresentou médias de 407,4 nm (M), 504,2 nm (P) e 514,6 nm (B), evidenciando distribuições heterogêneas influenciadas pelo grau de purificação e pelas etapas de extração e precipitação. Nos filmes, a opacidade aumentou de 13,9% (CMC) para 16,5% (M 10%), L* (luminosidade) reduziu de 94,3 (CMC) para 88,4 (M 10%), C* (saturação) subiu de 2,1 (CMC) para 11,8 (M10%) e os filmes apresentaram h°

(tonalidade) amarelados/marrons. A espessura variou entre 58–71 μm ; densidade entre 1,0–1,32 g/cm^3 (CMC: 1,39) e gramatura de 76–89 g/m^2 (CMC: 101,14). A tração variou de 22,8 MPa (P 10%) a 36,6 MPa (CMC); força máxima de 56,1 N (CMC) para 46,4 N (P 6%); alongamento de 2,9% (CMC) a 4,0% (GL 10%). O intumescimento caiu de 9,27% (CMC) para 1,74% (P 10%) e a solubilidade subiu de 1,14% (CMC) para 6,45% (B 10%). A PVA (permeabilidade ao vapor d'água) variou entre 92,5 e 318 $\text{g}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$. Por fim, a TGA (termogravimetria) dos filmes mostrou maior estabilidade com xilana marrom, enquanto os plastificados degradaram em menores temperaturas. O DRX (difração de Raios X) indicou semicristalinidade em $2\theta \sim 21\text{--}22^\circ$, mais intenso nas amostras com xilanas. O FTIR (espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier) dos filmes revelou interações estruturais, com variações em $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$ (O–H), $\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ (C=O) e $\sim 1150\text{ cm}^{-1}$ (C–O–C), indicando novas ligações e reorganização da matriz. Portanto, as xilanas demonstraram potencial para a obtenção de filmes poliméricos mais flexíveis. Assim, este estudo contribui para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis com propriedades ajustáveis, reforçando a viabilidade do aproveitamento de coprodutos da indústria de celulose em aplicações sustentáveis.

Palavras-chave: biorrefinaria; polímeros; economia circular; sustentabilidade; Hemiceluloses

ABSTRACT

MARANGON, Letícia Said, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2025. **Evaluation of the use of xylans extracted from eucalyptus pulp in a carboxymethylcellulose matrix.** Adviser: Deusanilde de Jesus Silva. Co-advisers: Jose Mauro de Almeida and Taila Veloso de Oliveira.

The search for raw materials from renewable sources has been fundamental to meeting the growing interest in more sustainable and biodegradable materials. In this context, xylans, the main hemicelluloses in hardwoods and often treated as by-products in high-purity bleached cellulose pulping processes, represent a promising alternative for use as renewable additives in polymeric matrices. Due to their properties, they can be easily extracted under alkaline conditions, favoring their application in polymer-based materials. Thus, this study aimed to extract xylans from three eucalyptus pulp samples obtained at different stages of the kraft process (pulping, oxygen delignification, and bleaching), and to evaluate their potential as additives in carboxymethyl cellulose (CMC) polymer matrices. The extracted xylans were incorporated into CMC at concentrations of 2%, 6%, and 10%, in order to analyze the effects of these proportions on the properties of the films formed, compared to the film plasticized with glycerol. The pure CMC film, without the addition of plasticizer, was used as a control. The results were subjected to analysis of variance (ANOVA), and mean treatment effects were compared using the Scott–Knott test at a 5% probability level. Alkaline extraction of xylans resulted in yields of 3.26% for brown pulp, 4.12% for oxygen-delignified pulp, and 2.01% for bleached pulp, based on the dry mass of each pulp. TGA of the xylans indicated a main degradation range between 270–290 °C, showing that the degree of purification influences the thermal profile of the additive. XRD revealed broad peaks between 18°–22° (2 θ), typical of amorphous structures, while FTIR showed characteristic hemicellulose bands at ~3454 cm⁻¹ (O–H), ~2933 cm⁻¹ (C–H), ~1253 cm⁻¹ (C=O), ~1555 cm⁻¹ (C=C), and ~900 cm⁻¹ (C–O). Xylan particle size measured by EDL presented averages of 407.4 nm (M), 504.2 nm (P), and 514.6 nm (B), evidencing heterogeneous distributions influenced by the degree of purification and by the extraction and precipitation steps. In the films, opacity increased from 13.9% (CMC) to 16.5% (M 10%); L* (lightness) decreased from 94.3 (CMC) to 88.4 (M 10%); C* (chroma) increased from 2.1 (CMC) to 11.8 (M 10%); and the films presented yellowish/brownish hues (h°). Thickness ranged from 58–71 μ m; density from 1.0–1.32 g/cm³ (CMC: 1.39); and grammage from 76–89 g/m² (CMC: 101.14). Tensile strength ranged from 22.8 MPa (P 10%) to 36.6 MPa (CMC); maximum

force from 56.1 N (CMC) to 46.4 N (P 6%); elongation from 2.9% (CMC) to 4.0% (GL 10%). Swelling decreased from 9.27% (CMC) to 1.74% (P 10%), and solubility increased from 1.14% (CMC) to 6.45% (B 10%). Water vapor permeability (WVP) ranged from 92.5 to 318 g·mm/m²·day. Finally, TGA of the films showed greater stability with brown-pulp xylan, while plasticized films degraded at lower temperatures. XRD (X-ray diffraction) indicated semicrystallinity at approximately 21–22° (2 θ), more intense in the samples containing xylans. FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) of the films revealed structural interactions, with variations at ~3400 cm⁻¹ (O–H), ~1600 cm⁻¹ (C=O), and ~1150 cm⁻¹ (C–O–C), indicating new bonds and matrix reorganization. Therefore, xylans demonstrated potential for obtaining more flexible polymeric films. Thus, this study contributes to the development of biodegradable packaging with adjustable properties, reinforcing the feasibility of using co-products from the cellulose industry in sustainable applications.

Keywords: biorefinery; polymers; circular economy; sustainability; hemicelluloses

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Composição estrutural da madeira de eucalipto.	21
Figura 2. Ilustração da estrutura microscópica da madeira.	22
Figura 3. Classificação das hemiceluloses.	25
Figura 4. Fluxo do sistema Kraft na fabricação de celulose.	26
Figura 5. Diagrama esquemático da biorrefinaria integrada à fábrica de celulose.	27
Figura 6. Etapas de desenvolvimento da pesquisa.	37
Figura 7. Processo de preparação das polpas de eucalipto.	38
Figura 8. Processo de extração de xilanas das polpas de eucalipto.	39
Figura 9. Representação das polpas de celulose, das xilanas e dos filmes de carboximetilcelulose com xilana marrom.	46
Figura 10. Espectros no infravermelho (FTIR) das xilanas.	47
Figura 11. Difratoograma de Raios-X das xilanas.	50
Figura 12. Curva termogravimétrica (TGA) das xilanas.	52
Figura 13. Diâmetro hidrodinâmico das xilanas.	53
Figura 14. Fotografias do papel impresso (PI) e da matriz polimérica.	55
Figura 15. Resultados transmitância da luz da matriz polimérica.	56
Figura 16. Resultados da cor percebida da matriz polimérica.	57
Figura 17. Resultados das propriedades estruturais da matriz polimérica.	59
Figura 18. Resultados das propriedades mecânicas da matriz polimérica.	60
Figura 19. Resultados das propriedades hídricas e de barreira da matriz polimérica.	62
Figura 20. Espectros no infravermelho (FTIR) da matriz polimérica.	64
Figura 21. Difratoograma de Raios-X da matriz polimérica.	66
Figura 22. Curvas termogravimétricas (TGA) da matriz polimérica.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química de algumas biomassas lignocelulósicas	20
Tabela 2. Principais características estruturais dos componentes da madeira de eucalipto	23
Tabela 3. Produtos Comerciais da Biorrefinaria	28
Tabela 4. Métodos de extração das hemiceluloses	30
Tabela 5. Classificação dos produtos finais, por categoria, derivados de biorrefinarias lignocelulósicas.....	32
Tabela 6. Técnicas de caracterização dos materiais da pesquisa	40
Tabela 7. Bandas características identificadas nos espectros FTIR das xilanas	48
Tabela 8. Parâmetros de DRX das xilanas	50
Tabela 9. Bandas características identificadas nos espectros FTIR da matriz de carboximetilcelulose.....	65
Tabela 10. Parâmetros de DRX da matriz polimérica.....	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo principal	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA	19
3.1.1 Composição química da biomassa lignocelulósica	19
3.1.2 Componentes químicos da parede celular da madeira de eucalipto	20
3.1.2.1 Hemiceluloses.....	23
3.2 BIORREFINARIA COM FOCO NAS HEMICELULOSES.....	26
3.2.1 Biorrefinaria madreira.....	26
3.2.2 Métodos de extração de hemicelulose	29
3.2.3 Potencial de aplicações industriais das hemiceluloses	31
3.2.4 Polímeros de fontes fóssil e renovável	33
3.2.4.1 Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes	33
3.2.4.2 Filmes poliméricos	35
4. MATERIAL E MÉTODO	36
4.1 MATERIAIS.....	36
4.2 MÉTODOS	37
4.2.1 Preparação das amostras de polpas.....	38
4.2.2 Extração alcalina quantitativa e qualitativa das xilanas	38
4.2.2.1 Extrações quantitativas	38
4.2.2.2 Extrações qualitativas	39
4.2.3 Confeção dos filmes poliméricos	40
4.2.4 Métodos de caracterização das xilanas e dos filmes poliméricos	40
4.2.4.1 Análise termogravimétrica (TGA).....	41
4.2.4.2 Espalhamento dinâmico de luz (EDL).....	41
4.2.4.3 Aspecto visual.....	41
4.2.4.4 Espessura	41
4.2.4.5 Determinação da gramatura e densidade dos filmes.....	41

4.2.4.6 Propriedades de resistência mecânica	42
4.2.4.7 Índice de intumescimento e de solubilidade	42
4.2.4.8 Teste de permeabilidade ao vapor d'água (PVA)	42
4.2.4.9 Cor e transmitância de luz.....	43
4.2.4.10 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	44
4.2.4.11 Raios-X	44
4.2.5 Análise estatística.....	44
4.2.5.1 Planejamento Experimental	44
4.2.5.2 Análise de variância e teste de média	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1 RENDIMENTO	45
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICAS DAS XILANAS.....	46
5.2.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	46
5.2.2 Raios-X	49
5.2.3 Análise termogravimétrica (TGA)	51
5.2.4 Espalhamento dinâmico de luz (EDL)	53
5.3 CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DOS FILMES DE CARBOXIMETILCELULOSE INCORPORADOS COM XILANAS E COM GLICEROL.....	54
5.3.1 Avaliação das propriedades dos filmes de carboximetilcelulose	54
5.3.1.1 Aspecto visual.....	54
5.3.1.2 Cor e transmitância de luz.....	56
5.3.1.3 Espessura, gramatura e densidade.....	58
5.3.1.4 Tensão, elasticidade e deformação	59
5.3.1.5 Intumescimento, solubilidade e permeabilidade ao vapor d'água	61
5.3.2 Caracterização dos filmes de carboximetilcelulose	63
5.3.2.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	63
5.3.2.2 Raios-X	65
5.3.2.3 Análise termogravimétrica (TGA)	67
6. CONCLUSÃO.....	69
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

A procura por matérias-primas provenientes de fontes renováveis tem se intensificado e impulsionando o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis e biodegradáveis. Dessa forma, as fábricas de celulose técnica, reconhecidas pela produção de polpas branqueadas kraft e solúvel para a fabricação de produtos como papéis para impressão e escrita, e papéis tissue, bem como polpa de elevada pureza para produção de derivados da celulose, apresentam potencial competitivo para a valorização de materiais lignocelulósicos gerados no processo (Tan et al., 2021; Quonian et al., 2020). Em razão de suas propriedades técnicas, tais como alta pureza, baixa presença de contaminantes inorgânicos, elevada alvura e viscosidade, os produtos derivados da madeira têm sido considerados versáteis para diversas aplicações em setores industriais como têxtil, farmacêutico, eletrônico, alimentício, automotivo, dentre outros (Chen et al., 2015; Magalhães et al., 2019). É importante mencionar que o processo produtivo da polpa kraft e da polpa solúvel são semelhantes e ocorrem em unidades fabris de elevada capacidade produtiva. Esses processos, altamente tecnológicos, utilizam produtos químicos, como hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, para cozinhar a madeira na forma de cavacos e extrair a polpa celulósica após uma série de tratamentos físicos e químicos.

Considerando o processo de produção da polpa solúvel, uma etapa de pré-hidrólise dos cavacos é realizada em uma torre antes da polpação, para remoção de hemiceluloses, as quais são consideradas impurezas para esse tipo de produto. Nessa etapa, utiliza-se água a cerca de 120 °C para extrair as hemiceluloses do material lignocelulósico (Singh et al. 2022). Na etapa de cozimento, com foco na dissolução da lignina, ocorre também a dissolução parcial dos carboidratos celulose e hemicelulose. Esta última é responsável pela geração de substâncias ácidas como ácido glicurônico, ácido 4-o-metilglicurônico e ácido galacturônico que, além de contribuírem na etapa da pré-hidrólise, também são responsáveis pelo consumo de reagentes da polpação (Magatonet al., 2006). Sendo assim, devido à complexidade da matriz lignocelulósica, a remoção das hemiceluloses ocorre ao longo do processo, como na pré-O₂ e nas etapas alcalinas e ácidas do branqueamento. Durante esse processo, o conteúdo de hemiceluloses é regulado pelas condições de pH, temperatura e pela lavagem após cada etapa alcalina ou ácida. Atualmente, na situação em que a biorrefinarias madeireiras se encontram, as hemiceluloses extraídas e solubilizadas durante a produção de polpas, cerca de 37.500 mil toneladas, com base em uma produção de 2,5 milhões de toneladas anuais, são direcionadas ao sistema de recuperação e empregadas para gerar vapor e energia para a fábrica de celulose (SUZANO, 2022; BRACELL, 2023).

Entre os materiais fibrosos de fonte biológica que podem ser destinados à produção de polpa solúvel, a madeira de eucalipto se destaca. Isso se deve às suas características únicas, como a capacidade de se adaptar a diversas regiões de clima predominantemente tropical, seu crescimento rápido e sua composição química favorável (celulose, hemicelulose e lignina), o que a torna a matéria-prima principal nas fábricas de celulose (Kim et al. 2019). Além da celulose, as hemiceluloses são um dos principais componentes químicos da biomassa e têm se destacado no cenário da biorrefinaria devido à sua reatividade, propriedades e composição molecular (Balkissoon et al., 2022). Esses polímeros são formados por diversas unidades de açúcares, principalmente pentoses, como xilose e arabinose, e hexoses, como manose e galactose, sendo uma classe de componentes poliméricos encontrada em vegetais fibrosos. Suas estruturas consistem em cadeias lineares curtas com pequenas ramificações (ácidos urônicos), possuindo um grau de polimerização que pode variar de 150 a 200, sendo amorfas e hidrofílicas (FIEP, 2019). Devido a essas características, as hemiceluloses são suscetíveis à hidrólise em ácidos diluídos, solúveis em soluções alcalinas diluídas e reagem de forma semelhante à celulose. Contudo, são mais reativas por apresentarem maior acessibilidade às hidroxilas livres presentes em sua cadeia molecular (Yuan et al. 2021; Ngene et al. 2022). Após passar pelo processo, as hemiceluloses sofrem modificações como perda de ramificações e hidrólises. Com isso, neste trabalho, essas hemiceluloses serão denominadas de xilanas. Dessa forma, as hemiceluloses, de forma geral, apresentam potencial químico reativo devido às suas características moleculares, conferindo-lhes perspectivas promissoras para sua utilização como matéria-prima em aplicações industriais, visando à sua valorização (Mendes et al. 2021a; Gomes et al. 2020a). O potencial industrial das hemiceluloses para serem empregadas nas cadeias produtivas se justifica pela amplitude dos processos químicos em escala global e, também, pela expectativa de crescimento dos produtos químicos de fontes renováveis (Foelkel, 2015; BRACELL, 2023; LD CELULOSE, 2023).

Um destaque dentro dessas cadeias produtivas é a aplicação das hemiceluloses como aditivo de reforço em filmes poliméricos para a produção de polímeros semiflexíveis (Araújo et al., 2021). Os filmes poliméricos são produzidos a partir de polímeros e solventes, utilizando a técnica *casting*, com a possibilidade de adição de plastificantes (Kabir et al., 2020). Durante o processo de fabricação dos filmes, as macromoléculas, componentes que formam a matriz polimérica, criam uma rede tridimensional semi-rígida com os componentes da formulação, envolvendo interações inter e intramoleculares, responsáveis por influenciar as propriedades dos materiais produzidos, enquanto o solvente é evaporado. A inclusão de hemiceluloses nos

filmes tem o propósito de modular as propriedades do material, como resistência à tração; flexibilidade; barreira contra umidade, gases e óleos; solubilidade em água; opacidade, e biodegradabilidade, proporcionando maior proteção ao produto e podendo desempenhar a função de plastificante na matriz polimérica (Liu; Shi; Sun, 2023a). Neste sentido, a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias tendo as hemiceluloses como plataforma apontam para uma nova abordagem de aplicação, desenvolvimento e aprimoramento de materiais poliméricos e para promover a sustentabilidade de processos e produtos (Macedo et al., 2022; Sukumaran et al., 2021). Com base nas informações apresentadas acima, o propósito desta pesquisa consistiu em avaliar as hemiceluloses, tipo xilanas, extraídas de três polpas, originadas do processo kraft, obtidas em diferentes etapas do processo de produção de polpa branqueada de eucalipto, e avaliar o comportamento desses extratos em matrizes de carboximetilcelulose.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo principal

Extrair xilanas por via alcalina de polpas kraft de eucalipto obtidas em três diferentes etapas do processo industrial (marrom, pré-O₂ e branqueada) e avaliar seu potencial de aplicação em matrizes de carboximetilcelulose.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1 Determinar o rendimento das etapas envolvidas na obtenção de hemiceluloses das três polpas;

2.2.2 Caracterizar as xilanas obtidas por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), difração de raios-X (DRX), análise termogravimétrica (TGA) e espalhamento dinâmico de luz (EDL);

2.2.3 Avaliar os três tipos de xilanas e o efeito do teor dos extratos em matriz de carboximetilcelulose (CMC) e caracterizá-los por termogravimétrica (TGA); raios-X; espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR); aspecto visual; cor e transmitância de luz; espessura, gramatura e densidade; tensão, elasticidade e deformação; intumescimento, solubilidade e permeabilidade ao vapor d'água.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

3.1.1 Composição química da biomassa lignocelulósica

As biomassas lignocelulósicas são uma das principais fontes renováveis de carbono, capazes de compensar e substituir matérias-primas derivadas da indústria petroquímica, bem como de contribuir para o sequestro de carbono e para a produção de bioenergia e de bioprodutos (Câmara et al., 2021). Esses recursos naturais podem ser convertidos numa variedade de produtos, promovendo a sua valorização, fazendo parte de uma abordagem integrada de biorrefinaria, para inclusão na economia circular. A biomassa lignocelulósica pode ter origem em resíduos agrícolas e florestais, resíduos orgânicos sólidos de fábricas de processamento, papel, madeira, celulose e estações de reciclagem (Liu et al., 2019; Gan et al., 2023). De acordo com a literatura, a produção anual de biomassa lignocelulósica, em todo o mundo, atinge cerca de 181,5 bilhões de toneladas, equivalente a 90% da biomassa total, da qual apenas 3% são utilizadas de forma eficaz e integrada na economia circular (Magalhães Jr et al., 2019). Esse baixo aproveitamento, ocorre devido à complexa estrutura da biomassa lignocelulósica, que dificulta sua separação e conversão em produtos de alto valor agregado. Além disso, os processos de fracionamento ainda são economicamente e energeticamente onerosos, o que limita sua aplicação em escala industrial.

As plantas possuem biomassa composta principalmente por fibras e células estruturais, além de outros componentes celulares presentes em menores quantidades, cada um com funções específicas. A parede celular dessas fibras é formada basicamente por três tipos biomoléculas: celulose, hemiceluloses, lignina e pectina (Augusto et al., 2022). A composição química da biomassa vegetal, em termos estruturais, não pode ser precisamente definida, uma vez que varia de acordo com a espécie, as partes constituintes (raízes, tronco, galhos e casca) e as condições ambientais, incluindo localização geográfica, clima e tipo de solo (Zhang et al., 2022a). No Brasil, há uma ampla variedade de fontes de fibras vegetais com diferentes características físicas, químicas e mecânicas. A composição desses elementos em uma matriz lignocelulósica varia conforme a origem da fibra (Banu et al. 2021), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química de algumas biomassas lignocelulósicas

Fonte	Biomassa lignocelulósica	Composição química, %				Referência
		Celulose	Hemicelulose	Lignina	Cinzas	
Madeira mole	Pinus	43,74	16,2	29,14	0,31	Funda et al., (2020), v. 54, p. 289-311
	Mângio	44,69	22,30	27,91	0,52	Solirat et al. (2022), v. 14, n. 3, pág. 491
Madeira dura	Eucalipto urograndis	48,92	24,5	31,08	0,46	De Paula Protásio et al. (2021), v. 1, pág. 175-189
	Bétula	54,22	28,14	11,13	1,39	Przybysz Buzala et al (2019), v. 12, n. 15, pág. 2952

Fonte: Banu et al. (2021), v. 302, pág. 121086, adaptado pela autora (2024).

Visto que as características dos materiais lignocelulósicos variam conforme a presença e a proporção dos componentes químicos (Tabela 1), a identificação e a quantificação desses elementos são de suma importância para o aprimoramento e o desenvolvimento de bioprodutos (Araújo et al. 2021). Por esse motivo, as empresas estão constantemente buscando melhorar as técnicas analíticas para essa finalidade. Por outro lado, considerando as fábricas de polpa celulósica como uma biorrefinaria, as madeiras originadas de fontes comerciais são as mais importantes a serem consideradas, visto que são usadas em maiores quantidades pela indústria brasileira.

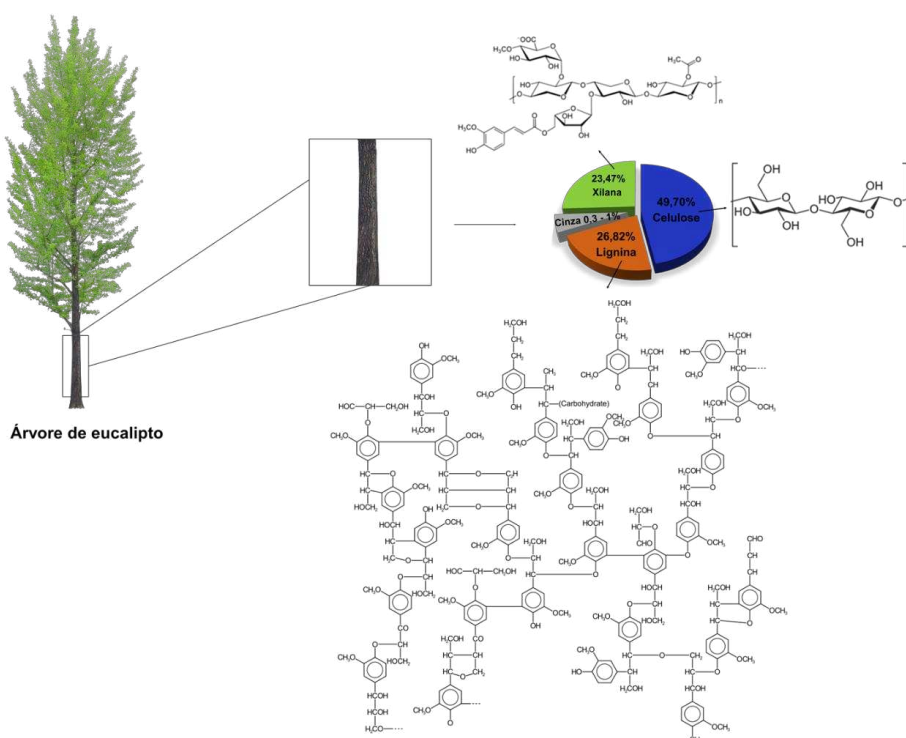
3.1.2 Componentes químicos da parede celular da madeira de eucalipto

Dentre os materiais de fonte biológica, a madeira se destaca por ser amplamente conhecida e utilizada. De acordo com o relatório anual de 2022 da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), o plantio de árvores no Brasil se tornou uma prática comum, contribuindo para o crescimento da cadeia produtiva da madeira, da celulose kraft branqueada e, ou solúvel, as quais estão sendo progressivamente desenvolvidas e introduzidas no mercado (SUZANO, 2022; BRACELL, 2023). Até o final de 2021, a área total de plantio, colheita e replantio atingiu 9,93 milhões de hectares, um aumento de 1,9% em relação a 2020, que registravam 9,75 milhões de hectares. De acordo com a Embrapa, em 2019, o Brasil possuía cerca de 9,5 milhões de hectares de florestas plantadas, distribuídos em 3.507 municípios. Desses, aproximadamente, 7,3 milhões de hectares eram ocupados por plantios de eucalipto, representando cerca de 76,9% da área total de florestas plantadas no país. A produtividade média de madeira foi estimada em 41 m³/ha/ano (EMBRAPA, 2022). Isto se deveu às condições climáticas e de solo favoráveis, bem como, de décadas de investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação; técnicas de manejo

florestal; melhorias genéticas e práticas sustentáveis. O cultivo do eucalipto se destaca por sua elevada produtividade de madeira, aliada a custos reduzidos e maiores retornos financeiros, tornando seus produtos altamente competitivos tanto no mercado interno quanto no externo.

De forma geral, em países de clima predominantemente tropical, as espécies de eucalipto são frequentemente escolhidas devido ao seu crescimento acelerado, à facilidade de adaptação a diferentes regiões e ao valor econômico, considerando a ampla gama de aplicações possíveis de sua madeira. As árvores de eucalipto possuem uma variedade de substâncias que as tornam matérias-primas estratégicas em quase todos os setores tecnológicos. A composição química da madeira é influenciada diretamente por fatores como o tipo de solo, as condições climáticas, a espécie vegetal, a idade e a posição da planta na área de plantio (IBÁ, 2022). Além dos polímeros celulose, hemicelulose e lignina, a biomassa possui outros componentes em proporções menores, como pectina e extrativos (gorduras, proteínas, lipídeos, resinas, sais orgânicos e compostos fenólicos), que exercem funções de armazenamento e proteção. O consumo específico da madeira pode variar dependendo de uma série de fatores, sendo os principais a eficiência da fábrica de celulose e o seu nível tecnológico, além da finalidade de aplicação da madeira. Na Figura 1, pode ser observada uma ilustração da composição química média de seis espécies de eucalipto (Magaton et al., 2006).

Figura 1. Composição estrutural da madeira de eucalipto.

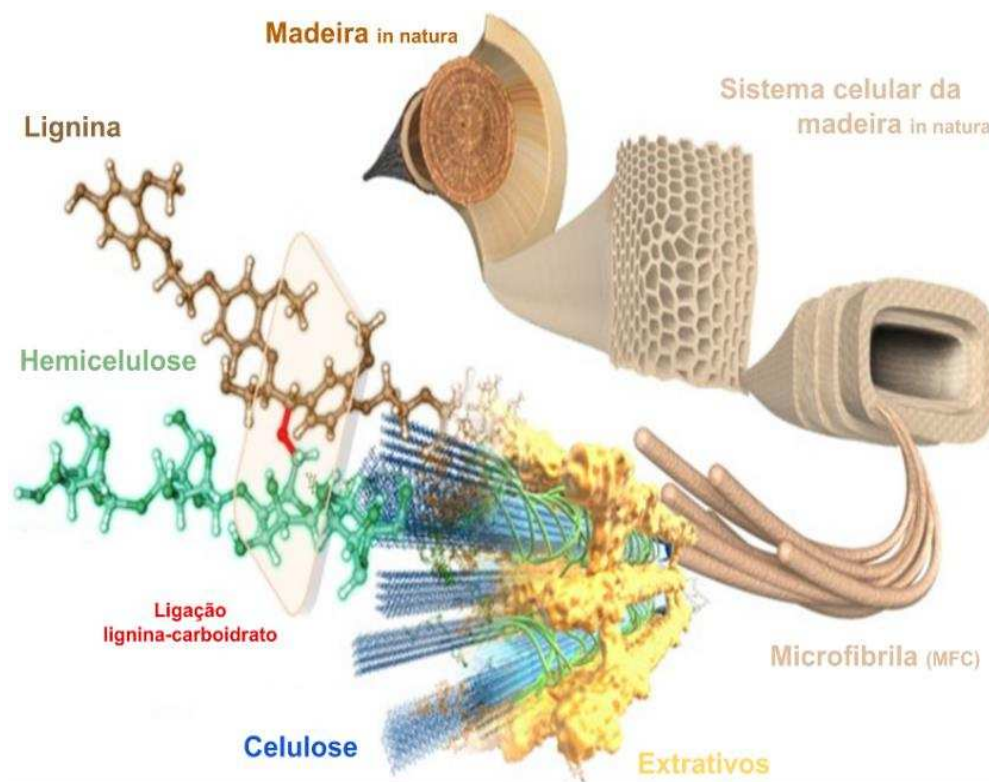


Fonte: Própria autora (2024).

A madeira apresenta uma matriz tridimensional complexa, conforme ilustrado na Figura 1. Sua organização estrutural dificulta a ação dos reagentes químicos sobre seus componentes, celulose, hemicelulose e lignina, durante o processo de polpação, demandando condições rigorosas de temperatura, pressão e quantidade de reagentes para produzir produtos comerciais de alta qualidade de forma economicamente viável. Na Figura 2, são mostradas tanto a estrutura microscópica hierárquica da madeira quanto a disposição molecular de seus principais constituintes químicos.

Na Tabela 2, são mostradas a composição estrutural e as características químicas da parede celular da madeira destinada à biorrefinaria madeireira e, posteriormente, como matéria-prima para a produção de produtos químicos, biopolímeros e outros materiais de base biológica. Dentre os componentes da madeira que têm despertado interesse global, as hemiceluloses se destacam, pois, são consideradas a segunda biomassa mais abundante do mundo, sendo um dos principais constituintes presentes juntamente com as fibras de celulose na parede celular (Gao et al., 2023).

Figura 2. Ilustração da estrutura microscópica da madeira.



Fonte: Nishimura et al. (2018), p. 2, adaptado pela autora (2024).

Tabela 2. Principais características estruturais dos componentes da madeira de eucalipto

Relato	Estrutura		
	Hemicelulose	Lignina	Celulose
Descrição da molécula	Menor grau de polimerização e sem cristalinidade	Polímero aromático reticulado, polímero policristalino heterogêneo tridimensional,	Cadeia polimérica agrupada ordenadamente e alta cristalinidade
Composição do polímero	Pentoses: xilose e arabinose Hexoses: glicose, manose e galactose	p-hidroxifenil (H); Guaiacil (G); Siringil (S)	β -D-glicose
Grau polimérico	<200	4000	100 – 10.000
Interação	Hidrofílica	Hidrofóbica	Hidrofílica
Estrutura	Amorfa	Amorfa	Semicristalina
Tipo de ligação entre os componentes	Químico:	Químico:	Hidrogênio:
	Ligação glicosídicas β -1,4; Ligação glicosídica glicosídicas β -1,2,3,6.	β -O-4; 5-5 ou ligação bifênil; β -5; α -O-4	Ligação glicosídicas β -1,4 Redes de ligação de hidrogênio.

Fonte: Banu et al. (2021), v. 302, pág. 121086, adaptado pela autora (2024).

Na madeira, a fração de hemicelulose atua como um agente lignate, unindo as frações de celulose e lignina, conferindo maleabilidade à matriz da biomassa de forma geral. Diferentemente da celulose, as hemiceluloses são mais suscetíveis à quebra em unidades monoméricas em função do baixo grau de polimerização e à natureza amorfa, além de sua heterogeneidade e presença de ramificações laterais, o que resulta em uma maior acessibilidade e reatividade quando comparadas à celulose. Contudo, pode ser funcionalizada e modificada quimicamente para adaptar suas propriedades e expandir suas aplicações em uma variedade de bioprodutos (Kim et al., 2019). Portanto, dada a diversidade estrutural e reatividade das hemiceluloses, diferentes métodos de extração vêm sendo desenvolvidos, os quais serão abordados na seção seguinte.

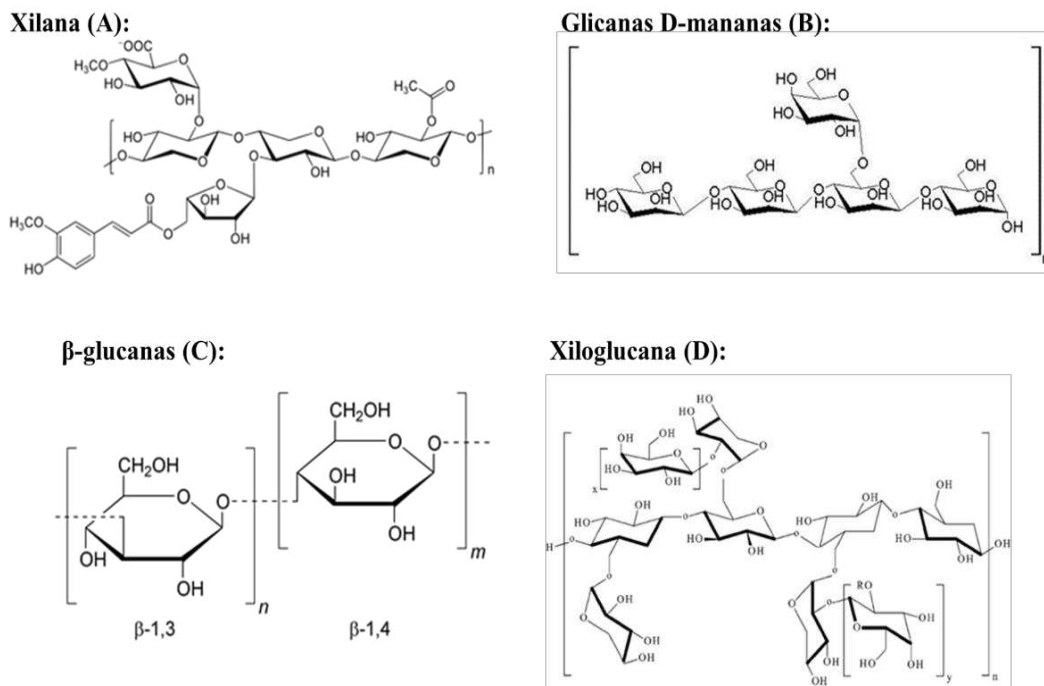
3.1.2.1 Hemiceluloses

O termo hemiceluloses é utilizado para nomear uma variedade de polissacarídeos, designados de polioses, encontrados nas paredes celulares de diferentes tipos de madeira e espécies de árvores (Todorovic et al., 2021). Esses polissacarídeos são compostos por

esqueletos de glucano conectados por ligações β -1,4, que possuem diferentes grupos glicosilados como substituintes, como exemplo do glucuronoxilano, principal estrutura de hemicelulose nas espécies de madeira dura (Figura 3A). As hemiceluloses têm a capacidade de interagir entre si e com as estruturas de celulose (fibrilas, microfibrilas e nanofibrilas), por meio de ligações de hidrogênio, que são conhecidas como interações não covalentes (ilustração na Figura 3). Ao contrário da celulose, que forma microfibras densamente compactadas, as hemiceluloses têm uma estrutura amorfa e são solúveis em soluções alcalinas aquosas. As hemiceluloses se distinguem da celulose por serem formadas por diferentes tipos de unidades de açúcar e apresentarem cadeias moleculares mais curtas e ramificadas (Zhu et al., 2020).

Devido ao fato de as hemiceluloses se apresentarem em grande quantidade na natureza, representando cerca de 20% a 30% do peso de materiais lignocelulósicos, existe atualmente um grande interesse na produção de biocombustíveis e outros compostos químicos a partir desses polissacarídeos (Miki et al., 2020). As hemiceluloses são classificadas em quatro categorias moleculares com estruturas distintas: xilanas, glicanas D-mananas, β -glucanas e xiloglicanas. Essas quatro estruturas de hemiceluloses possuem arranjos e distribuições diferentes, bem como outras características relevantes, como o grau de ramificação das cadeias laterais, a composição variada de monossacarídeos (xilose, arabinose, manose, galactose e glicose), a presença de grupos acetilados ou urônicos que influenciam a solubilidade e a reatividade química, além da heterogeneidade estrutural e da capacidade de interagir com celulose e lignina na parede celular vegetal, que contribuem para a sua utilização como matéria-prima (Huang et al., 2021; Yoshimi; Tryfona; Dupree, 2025). É importante destacar que o termo hemicelulose não se refere a um composto químico específico, mas sim a uma classe de componentes poliméricos encontrados em vegetais fibrosos, cada um com suas propriedades intrínsecas, sendo constituídos por açúcares de cinco carbonos, também denominadas por pentoses, como arabinose e xilose, e açúcares de seis carbonos, ou seja as hexoses, como manose, glucose e galactose, e os ácidos urônicos, como os ácidos α -D-glucurônico, α -D-galacturônico e α -D-4-O-metilgalacturônico. As várias estruturas dos principais açúcares podem ser visualizadas na Figura 3, ressaltando o potencial das hemiceluloses como matéria-prima para produção de diversos produtos. As hemiceluloses presentes nas madeiras macias diferem em estrutura daquelas nas madeiras duras. As galactoglucomananas são as principais hemiceluloses nas madeiras macias, enquanto o glucuronoxilana (xilanas) é a principal hemicelulose nas espécies de madeira dura (Hu et al. 2020).

Figura 3. Classificação das hemiceluloses.



Fonte: Tovar (2013) (A); Sousa et al. (2017) (B); Channell et al. (2018) (C); Mazzarino (2013) (D).

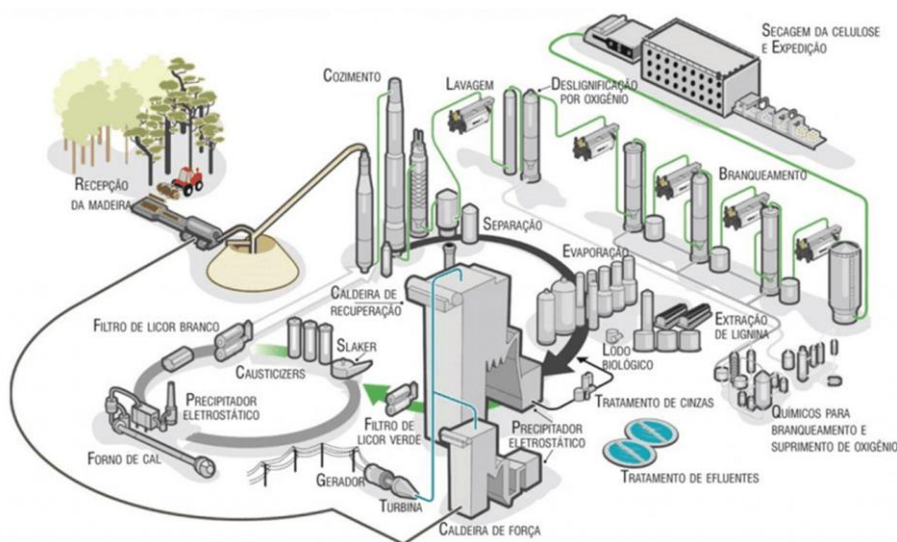
A vasta gama de possibilidades da química dos carboidratos (Figura 3) oferece amplas oportunidades para a modificação dos grupos hidroxila nas hemiceluloses, por meio de eterificação (carboximetilação, metilação, hidroxilaquilação, benzilação), esterificação (acetilação, succinilação, benzoilação), copolimerização por enxerto e modificação de reticulação, nas quais diferentes grupos funcionais são adicionados às posições de grupo hidroxila reativos, resultando em aprimoramento do desempenho e da processabilidade da matéria-prima, além de facilidade a hidrólise, biodegradação e modificação química (Xiang et al., 2022; Zhang et al., 2020b; Vena et al., 2013; Sikora et al., 2022). Devido à alta solubilidade das hemiceluloses, comumente sua modificação e funcionalização são realizadas em larga escala, para aprimorar a hidrofobização, solubilidade, estabilidade térmica e flexibilidade. Elas possuem características únicas, como massa molar relativamente baixa em relação à celulose, natureza não iônica e não tóxica. Além disso, são carboidratos compostos por diferentes unidades de açúcares, possuem cadeias curtas, são ramificadas e amorfas, o que lhes confere maior acessibilidade e reatividade em comparação à celulose (Ruiz et al., 2022). Dessa forma, atribuem-se características específicas aos seus derivados, ampliando as possibilidades de aplicação industrial.

3.2 BIORREFINARIA COM FOCO NAS HEMICELULOSES

3.2.1 Biorrefinaria madeireira

A indústria de papel e celulose, atualmente em fase de expansão, transformação e adaptação como biorrefinaria lignocelulósica, desempenha um papel fundamental na economia global. Tal relevância decorre dos lucros gerados pelo setor, dos elevados investimentos em novos projetos, do impacto em outros setores econômicos antes e depois da implantação de sua cadeia produtiva, bem como dos efeitos positivos na produção e consumo de energia, assim como nos aspectos sociais e ambientais (De Jesus et al., 2022; Diez et al., 2022). Nos últimos anos, essa indústria tem sido considerada uma biorrefinaria, caracterizada pelo uso da árvore como matéria-prima para a produção de vários produtos comerciais de alto valor agregado e outros potenciais. Nesse sentido, em virtude das intensas atividades florestais, o Brasil se manteve como o maior exportador de polpa celulósica do mundo em 2024, consolidando sua posição de liderança no mercado global. Em 2022, a produção nacional de celulose atingiu 25 milhões de toneladas, registrando um aumento de 10,9% em relação ao ano anterior. Em 2024, a produção alcançou 25,5 milhões de toneladas, um crescimento de 5,2% em comparação com 2023. O volume de exportação se manteve expressivo: em 2022, chegou a 19,1 milhões de toneladas; já em 2024, o total exportado alcançou 18,57 milhões de toneladas, um crescimento de 2,8% em relação a 2023 (IBÁ, 2024). Na Figura 4 ilustra fluxo do sistema Kraft na fabricação de celulose, ressaltando a valorização de subprodutos e a eficiência energética.

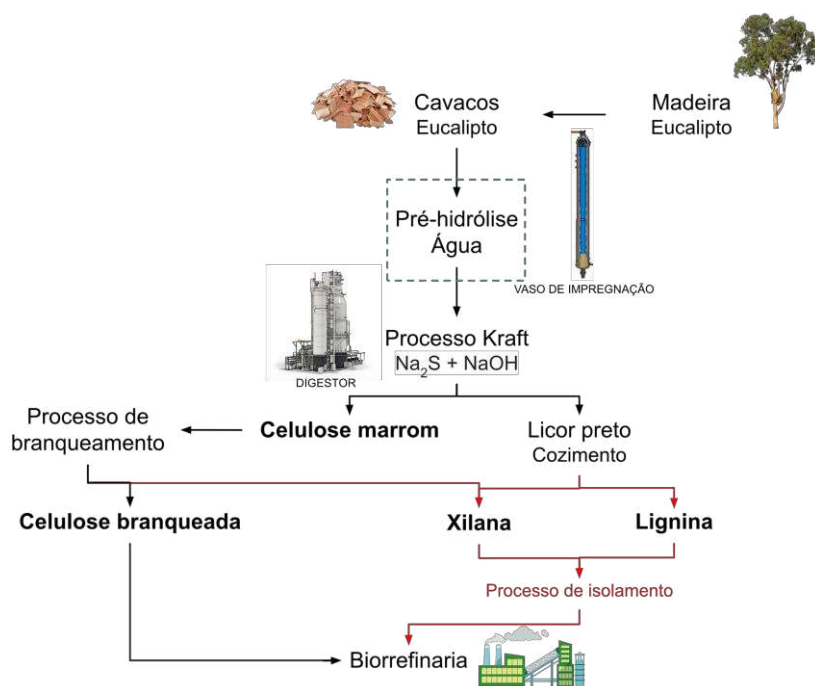
Figura 4. Fluxo do sistema Kraft na fabricação de celulose.



Fonte: TermoBlog (2023).

É importante ressaltar que a produção de celulose kraft branqueada e de celulose solúvel branqueada (Figura 5) ocorrem em fábricas de grande porte, com capacidade anual de produção de cerca de um a dois milhões de toneladas, e é caracterizada pela alta tecnologia. O processo de produção envolve vários pré-tratamentos físicos e químicos, bem como cozimento químico da madeira, resultando em um licor de cozimento (hidróxido de sódio e sulfeto de sódio), rico em compostos inorgânicos, um licor negro (Balkissoon et al., 2022), rico em compostos orgânicos proveniente da madeira (extrativos, lignina, hemicelulose e parte da celulose), e polpa de mercado, produto principal destinado à cadeia produtiva da celulose do tipo *commodity*. O processo de fabricação de polpa de dissolução é bastante semelhante ao processo convencional kraft. No entanto, uma etapa adicional de pré-hidrólise dos cavacos é realizada em uma torre adjacente ao digestor, enquanto, normalmente, o cozimento dos cavacos é feita em digestores do tipo batelada (Batch) (Kim et al., 2019). Esse pré-tratamento auxilia na remoção seletiva das hemiceluloses do material lignocelulósico, consideradas impurezas no processo produtivo de polpa celulósica com alto teor em alfa-celulose (Kärkkäinen et al. 2021; Ngene et al. 2022). Na Figura 5, é apresentada a valorização de materiais lignocelulósicos em uma biorrefinaria, considerando a produção de polpa celulósica branqueada.

Figura 5. Diagrama esquemático da biorrefinaria integrada à fábrica de celulose.



Legenda: via que distingue o processo de celulose kraft branqueada da celulose solúvel branqueada.

Fonte: Própria autora (2024).

Diante do cenário de alta produtividade de polpa de celulose, bem como de elevada geração de subproduto durante o processo de polpação, com alto potencial para o desenvolvimento e aprimoramento de bioprodutos de valor agregado, como é o caso da lignina, o setor florestal tem promovido a sustentabilidade por meio de pesquisas, desenvolvimento e inovação (PD&I), com o objetivo de ampliar seu mercado e fornecer soluções sustentáveis relevantes para a sociedade e o meio ambiente (Chaturvedi et al., 2020). Nesse contexto, as biorrefinarias madeireiras, que utilizam polímeros como lignina, celulose e hemiceluloses, têm desempenhado um papel estratégico na pesquisa, mobilizando recursos e esforços tanto do setor público quanto do privado para o aproveitamento máximo da biomassa, agregando valor à cadeia produtiva e reduzindo o impacto ambiental do setor. Os principais produtos da biorrefinaria já disponíveis no mercado estão apresentados na Tabela 3.

Avanços recentes em biorrefinarias integradas às fábricas de celulose têm ampliado a utilização de componentes químicos da madeira para a produção de produtos químicos, polímeros e outros materiais de base biológica para diversas aplicações, Tabela 3. Um dos componentes químicos de grande relevância é a hemicelulose, considerada um subproduto do processo de polpação (Germano et al., 2021). A hemicelulose é um recurso natural renovável, biodegradável, e com alto potencial como matéria-prima no contexto de biorrefinaria. Portanto, tem sido desenvolvidos processos, bioprodutos, biocombustíveis e biomateriais a partir de hemiceluloses, proporcionando perspectivas de aplicação em embalagens para alimentos, medicamentos, no setor agrícola, para tratamento de águas residuais, como agente de retenção de água no solo e como fertilizante de liberação controlada (Fu et al., 2022; Conteratto et al., 2021). Nesse sentido, diversos estudos estão sendo conduzidos para encontrar soluções otimizadas para aplicações industriais.

Tabela 3. Produtos Comerciais da Biorrefinaria

Bioproduto/Produto comercial	Matéria-prima/origem	Aplicações
Microcelulose / Celulose fibrilada (MFC, Biofiber™)	Celulose de eucalipto	Compósitos, embalagens, papel de alto desempenho, revestimentos
Lignina técnica (“Ecolig®”)	Licor negro Kraft de eucalipto	Aditivo em borrachas, resinas, pigmentos, dispersantes; antioxidante; absorção UV
Celulose / Polpa (hardwood, softwood, fluff)	Madeira de eucalipto e pinus	Papel, papelão, têxteis, absorventes higiênicos
		Aditivos para concreto, dispersantes, aglutinantes,

Lignosulfonatos e derivados lignínicos	Lignina de madeira (processos sulfito)	produtos químicos de base renovável
Ácido acético, xilose, furfural	Frações hemicelulósicas da madeira	Solventes, plásticos, resinas, alimentos, biocombustíveis

Fonte: autora (2024).

3.2.2 Métodos de extração de hemicelulose

A viabilidade do emprego de hemiceluloses como matéria-prima em processos químicos ou biotecnológicos depende da redução da interação existente entre os principais componentes da biomassa (celulose, hemicelulose e lignina), a qual apresenta uma estrutura altamente integrada. Por essa razão, na maioria das situações, recorre-se a um tratamento prévio da biomassa, com o intuito de modificar ou eliminar barreiras estruturais, simplificando a separação e a extração dos componentes desse material (Gao et al., 2023; Qaseem et al., 2021). Além disso, diferentes madeiras e métodos de extração levam à obtenção de distintos tipos de cadeias e conteúdo de hemiceluloses (Lu et al., 2021; Hu et al., 2020). Todavia, a extração de hemiceluloses a partir da madeira de eucalipto tem despertado grande interesse no desenvolvimento de aplicações industriais. Isso se justifica, pois, esse tipo de madeira é largamente utilizado como matéria-prima em fábricas de polpa de celulose branqueada de fibra curta, seja como *commodity*, ou como polpa solúvel.

A quebra das ligações de hidrogênio entre hemiceluloses e a celulose e das ligações químicas entre hemiceluloses e a lignina são responsáveis pela separação e obtenção dos componentes da parede celular de forma parcialmente individualizada (Arzami, Ho e Mikkonen, 2022; Xie et al., 2020). Normalmente, as hemiceluloses são parcial ou completamente solubilizadas durante o pré-tratamento da madeira. Com base em métodos laboratoriais e, ou comerciais para extração de hemiceluloses (Tabela 4), o tratamento alcalino se destaca por ser uma operação simples, de baixo custo e compatível com o processo existente de produção de polpa. As extrações assistidas por ultrassom e micro-ondas, por sua vez, podem potencializar o método alcalino, reduzir a poluição ambiental e otimizar a separação dos solventes orgânicos, além de diminuir o tempo de extração. Por outro lado, as hemiceluloses obtidas pelo processo organosolv, em geral, apresenta uma estrutura mais preservada, ou seja, mais próxima da biomassa original (Jin et al., 2019; Razali et al., 2022). Entretanto, essas abordagens ainda não atendem à produção industrial em larga escala, como citado anteriormente. Assim, a definição do método de separação e de extração deve considerar a aplicação das hemiceluloses e a capacidade tecnológica disponível.

A extração alcalina é um método amplamente utilizado para extrair hemicelulose da madeira de eucalipto. A composição das hemiceluloses encontradas em eucalipto consiste principalmente de xilanas (unidades de β -D-xilose) que são solúveis em álcali e, portanto, podem ser facilmente removidas por meio de uma simples extração (Cabrera et al., 2025). O estágio de extração alcalina é empregado na produção de celulose de alta pureza (α -celulose), com o propósito de eliminar as hemiceluloses remanescentes e as frações de celulose degradada presentes em polpas celulósicas. Durante esse processo, as ligações de hidrogênio entre hemicelulose e moléculas de celulose, assim como as ligações químicas entre hemicelulose e lignina, são rompidas. Isso resulta no inchaço da celulose e na extração das hemiceluloses, o que potencializa a dissolução dessas últimas, permitindo a obtenção de hemicelulose com elevado grau de pureza. O mecanismo envolve a quebra da ligação éster entre o ácido ferúlico presente na lignina e o açúcar da hemicelulose da parede celular. As hemiceluloses obtidas da biomassa lignocelulósica por meio alcalino apresentam uma elevada taxa de extração, pureza e grau de polimerização, características que contribuem para a ampliação da utilização de alto valor. Na Tabela 4, estão reunidos os principais métodos de extração de hemiceluloses utilizados em escala laboratorial e industrial.

Tabela 4. Métodos de extração das hemiceluloses

Pré-tratamento	Método de extração	Taxa de rendimento, %
Físico	Hidrotérmica	40 – 80
	Explosão de vapor	50 – 80
Químico	Alcalina	50 – 90
	Ácida	70 – 85
	Organosolv	20 – 97
	Líquido iônico	20 – 80
	Eutético profundo	40 – 70
	CO₂ /H₂O de alta pressão	45 – 80
Físico-químico	Ultrassom	10 – 40
	Microondas	20 – 40

Fonte: Lu, Yuchan et al., p. 779-804, 2021., adaptado pela autora (2024).

Após o processo de extração, o potencial químico reativo das hemiceluloses, devido à existência de cadeias laterais em sua formação, proporciona uma conformação espacial menos

restrita, em comparação com a estrutura da celulose, para ocorrência de reações nas hidroxilas das unidades de β -D-xilose, principal polissacarídeo encontrado na madeira de eucalipto (Yan et al., 2020;). As hemiceluloses da polpa de celulose solúvel de eucalipto geralmente possuem duas hidroxilas por unidade de β -D-xilose disponível para a eterificação, um processo que adiciona um grupo funcional acetila na molécula (Okolie et al., 2021). As hemiceluloses extraídas e solubilizadas durante a produção de polpa solúvel podem ser segregadas e utilizadas como matéria-prima para outros produtos no setor de fertilizantes, geração energia térmica, combustíveis, polímeros e produtos químicos que visam o desenvolvimento sustentável. Isso contribui para uma nova perspectiva de aplicação, desenvolvimento e aprimoramento de materiais.

3.2.3 Potencial de aplicações industriais das hemiceluloses

No cenário da produção de celulose kraft branqueada, as hemiceluloses desempenham um papel essencial. Preservar essas substâncias não só aumenta o rendimento na fabricação da celulose, mas também facilita a produção de papel, possibilitando melhor hidratação das fibras e resultando em economia de energia durante o refino da celulose (Rullifank et al. 2020). Entretanto, na produção de celulose solúvel de alta pureza, composta majoritariamente por α -celulose, os demais polissacarídeos são considerados impurezas e devem ser removidas para atender às especificações técnicas e futuras aplicações (Mamo et al. 2019). Todavia, as hemiceluloses extraídas e solubilizadas durante a fabricação da polpa solúvel podem ser funcionalizadas e, ou modificadas quimicamente devido ao seu elevado teor de hidroxilas livres, visando adequar suas propriedades e ampliar suas aplicações, resultando assim na obtenção de bioprodutos com potencial valor agregado. O enorme potencial econômico da biorrefinaria decorre do fato de que o mercado de produtos químicos abrange todo o mundo e tem um crescimento esperado de 3% ao ano até 2050, com uma estimativa de crescimento da demanda pelos renováveis (Singh et al. 2022).

Os produtos químicos desenvolvidos a partir de hemiceluloses têm maior potencial de agregar valor à cadeia produtiva da indústria de celulose, pois a indústria química está estrategicamente envolvida no fornecimento de insumos e produtos finais para diversos setores da economia como petroquímica, farmacêutica, automobilística, construção, agronegócio, cosméticos, polímeros etc. (Zhang et al., 2020b; Rathour et al., 2023). A conversão da hemicelulose em novos biomateriais baseia-se em diversos processos químicos, bioquímicos, mecânicos, termomecânicos ou termoquímicos complexos. De acordo com Foelkel (2015), é possível extrair entre 10.000 e 20.000 toneladas de hemiceluloses de cavacos de madeira ou

licor negro em uma fábrica com produção anual de 1 milhão de toneladas de celulose kraft. Neste contexto, hemiceluloses de madeira vêm sendo estudada como fonte de matéria-prima para a obtenção de produtos de alto valor agregado. Portanto, as biorrefinarias convertem hemiceluloses em uma variedade de produtos para atender às diversas necessidades do mercado por meio da alta integração de processos e da baixa geração de resíduos. Em geral, os produtos da biorrefinaria podem ser classificados em diferentes categorias, conforme ilustrado na Tabela 5.

Os produtos de biorrefinarias madeireiras apresentam vantagens ambientais em relação aos derivados petroquímicos, com reduções de 60 a 80% nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) decorrentes da valorização de resíduos lignocelulósicos. Avaliações do ciclo de vida (ACV) indicam que insumos como ácidos orgânicos, lignina, açúcares fermentescíveis e biopolímeros de origem madeireira podem substituir eficazmente equivalentes fósseis, reduzindo o impacto ambiental. Além disso, a produção de coprodutos de alto valor agregado, como nanocelulose, resinas, aditivos funcionais e bioenergia, fortalece a competitividade do setor (EMBRAPA, 2020; BRASIL, 2010). A ampla disponibilidade de resíduos florestais e a crescente demanda por alternativas renováveis projetam um crescimento acelerado da indústria de biomateriais e químicos bio-based, consolidando a biorrefinaria madeireira como eixo estratégico da bioeconomia e da substituição gradual de insumos petroquímicos (Martín et al., 2023; Pérez-Almada et al., 2023).

Tabela 5. Classificação dos produtos finais, por categoria, derivados de biorrefinarias lignocelulósica

Natureza dos produtos	Tipo de produtos
Energéticos	• Calor e vapor para processo e aquecimento; • Eletricidade.
Insumos químicos	• Produtos químicos - química fina, blocos de construção civil, produtos químicos; • Ácidos orgânicos - succínico, láctico e outros; • Polímeros e resinas - Plástico à base de amido, resinas fenólicas e de furanos; • Biomateriais - painéis de madeira.
Biocombustíveis	• Gasosos – biogás, gás de síntese, metano, hidrogênio; • Líquidos - etanol, biodiesel, butanol, bio-óleos, FT-combustíveis;

	• Sólidos - granulados, de lignina e de carvão.
Nutrição	• Alimentos – açúcar, ração animal; • Fertilizantes – vinhaça, amônia, ureia.

Fonte: Furtado Junior (2017), adaptado pela autora (2024).

É possível utilizar resíduos da biorrefinaria madeireira, como lignina, hemiceluloses e celulose, entre outros resíduos do processo de polpação para o desenvolvimento e aprimoramento de biopolímeros de valor agregado (Singh et al., 2022). Além de serem biodegradáveis, os produtos originados desse processo não dependem do petróleo, o que torna sua produção menos nociva ao meio ambiente. Dessa forma, a valorização de resíduos da biorrefinaria madeireira, principalmente das hemiceluloses, representa uma estratégia promissora para a produção de biopolímeros sustentáveis de alto valor agregado, capazes de substituir materiais de origem fóssil e contribuir para a redução do impacto ambiental associado à indústria química.

3.2.4 Polímeros de fontes fóssil e renovável

3.2.4.1 Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes

Nos últimos anos, tem havido um considerável interesse na comercialização de bioplásticos como uma possível solução para as preocupações crescentes sobre os resíduos plásticos e seu impacto no meio ambiente. Os biopolímeros são resinas que se degradam naturalmente e cujos componentes são extraídos de matérias-primas provenientes de fontes sustentáveis (Pei et al., 2023).

A demanda por alternativas que reduzam os impactos dos resíduos plásticos tem levado as indústrias a adotarem cada vez mais operações e práticas sustentáveis com o objetivo de mitigar aspectos prejudiciais ao meio ambiente. Dessa forma, há um crescente interesse na procura por materiais com propriedades semelhantes aos tradicionais, que possam se apresentar como uma opção aos polímeros convencionais de fontes fósseis (Macedo et al., 2022; Sukumaran et al., 2021). Além disso, investir em materiais biodegradáveis, sustentáveis e matérias-primas de fonte renovável para a produção de polímeros se tornou um diferencial competitivo para as empresas, pois os consumidores ao redor do mundo estão cada vez mais conscientes da importância da sustentabilidade e abertos à ideia dos plásticos renováveis.

Conforme mencionado pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), no ano de 2023, a indústria brasileira de transformação e reciclagem de plásticos alcançou uma

produção física de 7,04 milhões de toneladas, representando um aumento de 4,8% em relação a 2022. Entre 2022 e 2024, o sistema de logística reversa coletou mais de 800 mil toneladas de embalagens vazias e, ou com sobras de agrotóxicos (defensivos agrícolas), destinando 90% à reciclagem e o restante, que contém resíduos, à incineração. Embora esse indicador não substitua diretamente os números de produção física da indústria de polímeros, ele reflete um avanço importante no manejo de resíduos plásticos pós-consumo. Com o objetivo de diminuir o descarte na natureza e o acúmulo de plástico pós uso, os quais são considerados problemas ambientais persistentes, cresce a busca por materiais de fonte renovável e, ou biodegradáveis, com propriedades semelhantes aos polímeros convencionais, para mitigar esses impactos ambientais (Jha et al., 2024). A curto e médio prazo, esses novos materiais não representarão uma ameaça às indústrias petroquímicas, já que sua demanda é menor do que 5% do total de plásticos comercializados. Logo, os polímeros convencionais são mais utilizados em aplicações de baixo custo e que demandam melhor desempenho técnico, com propriedades mecânicas e térmicas superiores (Mehmood et al., 2023). Por outro lado, os biopolímeros, ou seja, polímeros proveniente de fonte renovável, são em grande maioria, materiais hidrofílicos, influenciando as propriedades de barreira a gases e ao vapor de água, bem como a resistência mecânica (González-López et al., 2023).

Muitos dos biopolímeros são biodegradáveis, que, de acordo com a norma ABNT 15.448, são polímeros que se decompõe em ambientes naturais por microrganismos na presença de oxigênio, gerando água, dióxido de carbono e biomassa. O objetivo da produção de biopolímeros biodegradáveis é valorizar os resíduos plásticos pós-consumo, destacando suas propriedades de biodegradação aeróbia, seguida de desintegração e influência no processo de compostagem (Nanda et al., 2022; Dallaev et al., 2025).

Entre os polímeros biodegradáveis, os provenientes de fontes renováveis se destacam, devido ao seu menor impacto ambiental, ao balanço positivo de dióxido de carbono (CO_2) após a degradação e à possibilidade de se estabelecer um ciclo de vida sustentável (Jha et al., 2024). Entretanto, os biopolímeros são limitados por serem difíceis de serem processados, o que restringe a produção de plásticos. Dessa forma, pesquisas tem sido conduzidas para identificar alternativas capazes de modificar a estrutura dos biopolímeros, com o objetivo de viabilizar seu processamento e ampliar sua aplicabilidade. Porém, o mercado brasileiro ainda é incipiente e enfrenta muitas dificuldades como o alto custo e as propriedades mecânicas inferiores comparado aos de fonte petroquímica (Dziuba et al., 2021). Dessa forma, ressalta-se que novas pesquisas devem ser conduzidas com o objetivo de adaptar a cadeia produtiva com vistas na

sustentabilidade, apontando para uma nova abordagem de aplicação, desenvolvimento e aprimoramento dos materiais.

3.2.4.2 Filmes poliméricos

Os filmes são materiais estruturais que atuam como barreira contra agentes externos, como umidade, gases e óleos. A formulação de filmes pelo método *casting*, amplamente utilizado em escala laboratorial, consiste na dispersão do polímero em um solvente (etanol, água, entre outros), podendo ser adicionado de agentes plasticizantes (polióis) e regulador de pH (ácido acético, hidróxido de amônio) (Santos, 2018; Shao et al., 2019). De modo geral, os polímeros derivados de recursos renováveis podem ser classificados em três categorias: polímeros naturais, como amido, proteínas e celulose; polímeros sintéticos obtidos a partir de monômeros naturais, como o poli(ácido lático); e polímeros produzidos por microrganismos durante processos de fermentação, como o poli(hidroxibutirato) (Balart et al., 2021).

Todavia, muitos filmes produzidos a partir de biopolímeros são rígidos e precisam de ser adicionados de compostos plastificantes para adquirirem maior flexibilidade. Dessa forma, a inclusão de hemiceluloses em matrizes poliméricas, obtidas de fontes naturais, tem sido objeto de estudo na literatura como uma alternativa para melhorar propriedades mecânicas (resistência e flexibilidade), de barreira (permeabilidades ao vapor de água, oxigênio e dióxido de carbono), ópticas (opacidade/transparência), térmicas e de solubilidade em água desses materiais (Zhao et al., 2020a). Dessa forma, com o emprego da hemicelulose, novos materiais e tecnologias têm sido desenvolvidos (Kabir et al., 2020).

Por outro lado, tem-se utilizado hemiceluloses como material de reforço em matrizes poliméricas, as quais, devido a alta densidade e propriedades únicas, podem ser utilizadas em matrizes de metilcelulose, acetato de celulose e carboximetilcelulose (Seydibeyoglu, 2023), entre outras. Dentre as várias possibilidades de matrizes para preparação de compósitos, a carboximetilcelulose é um polímero de grande importância comercial, que apresentam baixo custo e é de fonte renovável. Em estudo realizado por Abu Hassan et al. (2024), investigou-se a influência da hemiceluloses nas propriedades químicas, térmicas, mecânicas e morfológicas de filmes à base de carboximetilcelulose (CMC). A hemicelulose, isolada do tronco de palma, foi incorporada à matriz de CMC em diferentes proporções. Os resultados indicaram que a adição de Hc produziu filmes opacos, com melhorias significativas nas propriedades mecânicas, demonstrando o potencial da hemicelulose como aditivo reforçador em matrizes poliméricas. Outra pesquisa promissora foi conduzida por Weerasooriya et al. (2020) que investigou o efeito da hemicelulose nas características do filme de carboximetilcelulose para produção de

embalagem sustentável, no qual a adição de 60% de hemicelulose, em massa, proporcionou melhores propriedades ao material. Além do mais, um estudo realizado por Hoque et al. (2023) concluiu que a quantidade adequada de hemicelulose à matriz de carboximetilceluloso (CMC) poderia ser equivalente a 70% da massa. Portanto, estudos indicam o potencial de aplicação da hemicelulose como agente plastificante e de reforço em matrizes poliméricas.

Apesar dos avanços recentes em pesquisas sobre hemiceluloses de biomassas lignocelulósicas, ainda existe uma lacuna na compreensão de como as condições de extração das xilanas de madeira de eucalipto e suas características estruturais impactam diretamente o desempenho de filmes poliméricos biodegradáveis (Nechita et al., 2023b; Cabrera et al., 2025). A maior parte dos trabalhos concentra-se em aspectos isolados, extração ou aplicação, sem estabelecer conexões sólidas que possibilitem otimizar propriedades-chave, como intumescimento, solubilidade e permeabilidade ao vapor d'água, fundamentais para a competitividade das embalagens sustentáveis frente aos polímeros fósseis (Hussain et al., 2024). Essa falta de integração limita não apenas o avanço tecnológico, mas também o alinhamento estratégico entre o setor de embalagens biodegradáveis e o setor de celulose e papel, que possui infraestrutura consolidada, em processamento de fibras e capacidade industrial para impulsionar inovações em larga escala. Este trabalho propõe preencher essa lacuna ao correlacionar os níveis de deslignificação e as propriedades funcionais das xilanas, fornecendo subsídios técnicos que favoreçam a convergência entre esses setores. Dessa forma, contribui para o fortalecimento de uma bioeconomia integrada, capaz de gerar soluções de alto valor agregado e ampliar a participação de materiais renováveis no mercado global.

4. MATERIAL E MÉTODO

A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Processos Industriais e Materiais (LABPIM), do Departamento de Química (DEQ), bem como no Laboratório de Celulose e Papel, do Departamento de Engenharia Florestal, e no Laboratório de Embalagens de Alimentos, do Departamento de Tecnologia de Alimentos, da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

4.1 MATERIAIS

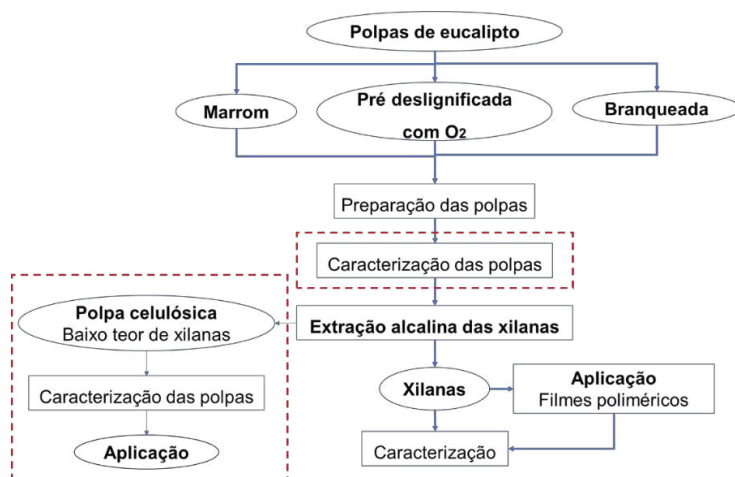
Os materiais utilizados na confecção dos filmes poliméricos seguiram Prates et al. (2022). Foram empregadas xilanas extraídas de polpas de eucalipto (marrom, pré-deslignificada e branqueada), fornecidas por uma empresa do setor de celulose. Para a extração alcalina utilizaram-se NaOH 18% (Impex), ácido acético 99,7% (Sigma Aldrich) para neutralização e

etanol 95% (Neon) para precipitação. A carboximetilcelulose de sódio (CMC-Na, grau farmacêutico, viscosidade ~42 cP em solução 2%, grau de substituição 0,75, 0,30% NaCl, MM ~90.000 g·mol⁻¹) foi fornecida pela Blanver Farmoquímica S.A. Também foram preparados filmes com glicerol P.A. (Proquímios, 99,5%) para comparação. Água destilada foi usada como solvente em todas as etapas. Os métodos adotados basearam-se em TAPPI (2000), Silva et al. (2011), Prates (2022), Meirelles et al. (2021) e Batalha et al. (2015). Considerando que a principal hemicelulose da madeira de eucalipto é a xilana, este termo foi utilizado ao longo do trabalho.

4.2 MÉTODOS

De modo geral, as xilanas foram extraídas das polpas por tratamento alcalino (NaOH 18% m/v), razão polpa/solução 1:9 m/v, com posterior precipitação em etanol. As xilanas brutas obtidas foram concentradas por centrifugação até gel com teor seco de aproximadamente 20% m/m e armazenadas sob refrigeração (4±1 °C) até uso na caracterização e na preparação das matrizes poliméricas com CMC. Foram estudados os efeitos de xilanas (2%, 6% e 10%) e glicerina (GL) (2%, 6% e 10%) em base de CMC. Os filmes foram caracterizados quanto às propriedades ópticas (aspecto visual, cor, transmitância e cristalinidade), estruturais (espessura, gramatura, densidade e grupos funcionais), mecânicas (tensão, alongamento e deformação), hídras (solubilidade e intumescimento) e de barreira (permeabilidade ao vapor d'água). A caracterização das xilanas e dos filmes foi realizada por FTIR, DRX, TGA e EDL, sendo FTIR analisado de forma descritiva. A sequência da pesquisa é apresentada, de forma simplificada, na Figura 6.

Figura 6. Etapas de desenvolvimento da pesquisa.



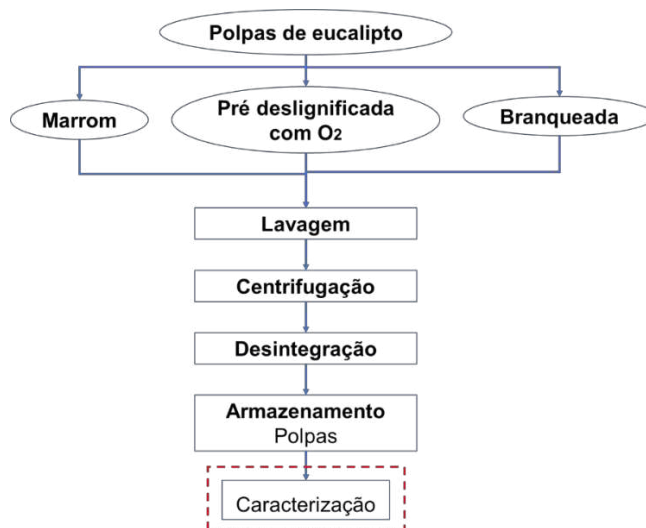
Legenda: etapas não abordadas neste trabalho.

Fonte: Própria autora (2024).

4.2.1 Preparação das amostras de polpas

As amostras de polpas de celulose foram coletadas na fábrica após as etapas de polpação, pré-branqueamento e branqueamento, com consistência de aproximadamente 30% de sólidos na saída dos filtros-prensa. Foram obtidos cerca de 6,7 kg de cada amostra, correspondendo a 2 kg em base seca (a.s.), considerando os tempos de retenção das etapas para minimizar variações do material fibroso. As polpas foram lavadas com água corrente para remoção do excesso de licor, centrifugadas em sacos de cetim, desintegradas para uniformização das fibras e armazenadas em sacos de polietileno para uso posterior. A preparação foi realizada no Laboratório de Celulose e Papel/DEF/UFV, em equipamentos específicos, seguindo a rotina do laboratório. O teor de umidade das polpas foi determinado em triplicata, sendo adotada a média aritmética, conforme TAPPI T421 om-02. As etapas estão representadas, de forma simplificada, na Figura 7.

Figura 7. Processo de preparação das polpas de eucalipto.



Legenda: etapas não abordadas neste trabalho.

Fonte: Própria autora (2024)

4.2.2 Extração alcalina quantitativa e qualitativa das xilanas

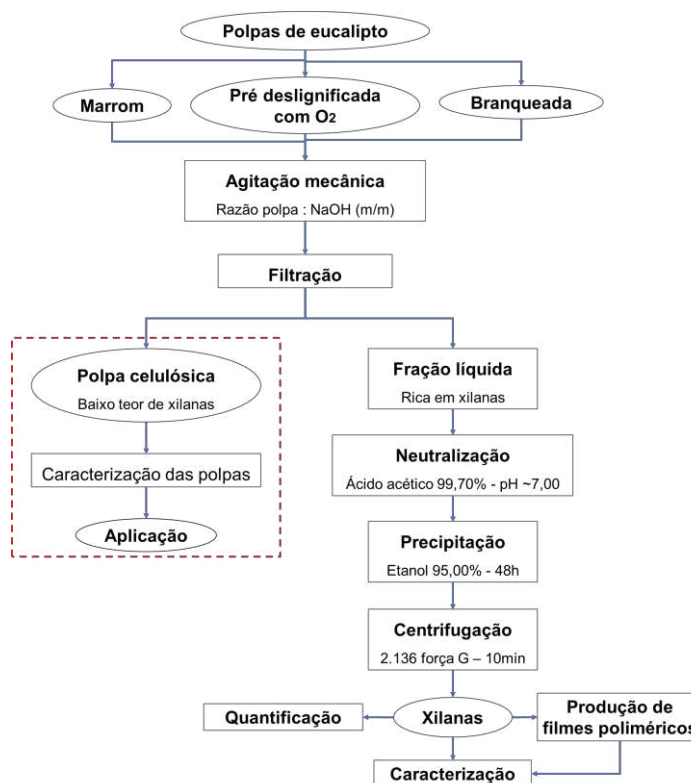
4.2.2.1 Extrações quantitativas

A extração alcalina das xilanas foi realizada adaptando os métodos de Silva, D’Almeida e Koga (2011a) e Ribeiro Neto et al. (2020). Dez gramas de polpa seca foram tratadas com 300 mL de solução de NaOH 18% (m/v) sob agitação magnética por 5 h a 25 ± 2 °C. A suspensão foi filtrada a vácuo, lavando-se o resíduo com água destilada. O filtrado rico em xilanas foi neutralizado com ácido acético (pH ~7) e precipitado com etanol 95% (volume dobrado). Após

48 h, as xilanas precipitadas foram separadas por centrifugação (10 min, 2.136 força G) e secas em placas de Petri para determinação da massa e cálculo do rendimento com base na polpa seca. O teor de umidade do gel foi também avaliado, com três repetições para cada amostra. A extração das xilanas das polpas seguiu as etapas apresentadas, de forma simplificada, na Figura 8. Para cada polpa, a determinação da quantidade de xilanas, foi realizado em triplicata conforme a Equação 1.

$$Xilana, \% = \frac{Massa\ da\ xilana(g)}{Massa\ da\ polpa\ de\ partida(g)} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Figura 8. Processo de extração de xilanas das polpas de eucalipto.



Legenda: etapas não abordadas neste trabalho.

Fonte: Própria autora (2024)

4.2.2.2 Extrações qualitativas

De acordo com o rendimento da extração, foram realizadas novas extrações, de forma qualitativa, para obtenção de quantidade de xilanas suficientes para serem utilizadas em etapas posteriores. Conforme dados de projetos anteriores executados no LABPIM, a quantidade necessária para caracterização das xilanas e obtenção dos filmes foi de ~220 g a.s. de cada polpa, determinada segundo a norma TAPPI. T 203 cm-99.

4.2.3 Confeção dos filmes poliméricos

Os filmes foram produzidos utilizando a técnica *casting*. Diferentes níveis de xilanas, correspondentes aos teores 2%, 6% e 10%, base polímero, foram adicionados às dispersões de CMC 2% (m/v) em água. Em seguida, a dispersão foi vertida em uma placa de vidro e submetida à etapa de secagem, à temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por, aproximadamente, 3 dias (Queirós et al., 2017; Yang et al., 2019). Os filmes secos foram removidos da placa e armazenados em embalagens de polietileno/nylon em condições de vácuo até o momento de sua utilização. Para efeito de comparação, foram confeccionados filmes de carboximetilcelulose, contendo glicerol, correspondentes aos mesmos níveis de xilanas, 2%, 6% e 10%, base polímero. Este procedimento foi realizado tanto para as xilanas extraídas dos três tipos de polpa quanto para o glicerol, a fim de permitir a comparação entre xilanas e glicerol nos filmes.

4.2.4 Métodos de caracterização das xilanas e dos filmes poliméricos

Os materiais da pesquisa, sendo estes, as xilanas extraídas das polpas de eucalipto (marrom, pré-deslignificada com O_2 e branqueada), e os filmes poliméricos de carboximetilcelulose produzidos (com xilanas e com glicerol), foram caracterizados de acordo com a Tabela 6 e estão descritas nos tópicos seguintes.

Tabela 6. Técnicas de caracterização dos materiais da pesquisa

Caracterização	Xilanas	Filmes	Método
EDL	X	–	ISO 22412 (2017)
Aspecto visual	–	X	Rawashdeh et al. (2023)
Espessura	–	X	Teixeira et al. (2017)
Gramatura e densidade	–	X	ASTM D6988-13; D792-13
Propriedades de resistência mecânica	–	X	ASTM D882-18
Solubilidade e Intumescimento	–	X	ASTM D570-98
PVA	–	X	ASTM E-96-95 (1996)
Cor e transmitância de luz	–	X	ASTM D2244
FTIR	X		ASTM E1252
TGA	X		Mendes et al. (2017)
Raios-X	X		Segal et al. (1959)

4.2.4.1 Análise termogravimétrica (TGA)

A perda de massa das xilanas em função de um gradiente de temperatura foi investigada por termogravimetria (TGA-DTA), de acordo com o descrito por Mendes et al. (2017b), adaptado, em um aparelho DTC-60 SHIMADZU. Cerca de 3 mg de cada amostra de xilana foram adicionados em recipientes de alumina nas seguintes condições de análise: atmosfera inerte de nitrogênio (N₂), fluxo de gás de 50 mL/min, taxa de aquecimento de 10°C/min e faixa de temperatura de 0 a 700 °C.

4.2.4.2 Espalhamento dinâmico de luz (EDL)

A distribuição do tamanho de partícula (size) foi determinada por espalhamento de luz, conforme as diretrizes definidas na norma ISO 22412:2017. As amostras foram preparadas dispersando-se 50 mg de xilanas em 100 mL de água destilada, seguido de sonicação por 10 minutos para garantir a uniformização da suspensão. Para a análise do tamanho de partículas, as medições foram realizadas a temperatura de 25 ± 2 °C. O tamanho médio das partículas foi expresso como diâmetro hidrodinâmico (nm). Todas as análises foram realizadas em triplicata, e os dados foram processados pelo software do equipamento (Zetasizer Nano ZS).

4.2.4.3 Aspecto visual

Todos os filmes produzidos passaram por análises visuais e táteis qualitativas, com o objetivo de selecionar apenas aqueles que apresentaram coloração uniforme e não continham partículas insolúveis ou bolhas de ar em sua estrutura (Rawashdeh et al., 2023, adaptado). Filmes que exibiram rupturas ou áreas frágeis foram descartados.

4.2.4.4 Espessura

As espessuras dos filmes foram medidas com o auxílio de um micrômetro digital de alta precisão de 0,001 mm (Mitutoyo Corporation, Japão). Foram realizadas medições em 10 pontos no corpo de prova, (12,5 x 2,0) cm², selecionados aleatoriamente em cada amostra, tomando-se a média aritmética como o valor mais provável da medida (Teixeira et al., 2017, adaptado).

4.2.4.5 Determinação da gramatura e densidade dos filmes

A partir da medição da espessura, foi possível determinar a densidade e a gramatura dos filmes. Quatro amostras foram recortadas em retângulos com dimensões de (12,5 × 2,5) cm². Em seguida, cada amostra foi pesada em uma balança analítica com resolução de 1 mg, e suas espessuras foram registradas (ASTM D6988-13; ASTM D792-13). Com esses dados, as densidades dos materiais foram calculadas conforme a Equação 2, enquanto a gramatura foi obtida pela Equação 3.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{A \times e} \quad \text{Equação 2} \qquad G = \frac{m}{A} \quad \text{Equação 3}$$

Em que, ρ = densidade (g/cm³); m = massa da amostra pesada (g); A = área da amostra (m²); e = espessura da amostra (m); G = gramatura do material (g/m²).

4.2.4.6 Propriedades de resistência mecânica

As propriedades mecânicas foram determinadas em função da tensão na carga máxima (MPa), força máxima (N), módulo de young (MPa) e alongamento na ruptura (%) utilizando máquina universal de ensaios (Instron Series IX Automated Materials Testing System 1.01), em conformidade com a norma ASTM D882-18. As amostras de CMC foram cortadas em tiras de (12,5 x 2,0) cm² e fixadas por duas garras com separação inicial de 50 mm e velocidade de tração de 10 mm.min⁻¹.

4.2.4.7 Índice de intumescimento e de solubilidade

A determinação do índice de intumescimento e da solubilidade dos filmes foi realizada com baseadas na norma ASTM D570-98, com adaptação. Amostras dos filmes (2 x 2) cm² foram previamente secas em dessecador utilizando sílica gel como agente dessecante, por 24 h, e pesadas (massa inicial seca: m_0). Em seguida, foram imersas em 40 mL de solvente orgânico (etanol, 92%), a 25 ± 2 °C, e colocadas sob agitação de 150 rpm por 12 h. Após esse período, as amostras foram cuidadosamente retiradas, o excesso de solvente orgânico foi removido com papel absorvente, e as amostras foram novamente pesadas (massa úmida: m_1). Após a pesagem úmida, as amostras foram secas em estufa a 25 ± 2 °C, por 24 h, e pesadas (massa residual seca: m_2). O índice de intumescimento (II) e a solubilidade em solvente orgânico foram calculados conforme a Equação 4 e a Equação 5, respectivamente.

$$II, \% = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{Solubilidade, \%} = \frac{m_0 - m_2}{m_0} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

4.2.4.8 Teste de permeabilidade ao vapor d'água (PVA)

Foi realizado o teste de permeabilidade ao vapor d'água com base na metodologia da ASTM E-96-95 (1996), com adaptação. Os filmes foram cortados no tamanho da abertura circular da célula de permeação, cerca de 3,46 cm de diâmetro, e fixados hermeticamente para permitir a

migração de umidade somente através do filme. Uma solução de nitrato de cálcio supersaturada [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - 52 % UR] foi adicionada no interior da célula de permeação dos filmes, criando um gradiente de 23% UR entre os ambientes, no qual no exterior da célula continha uma solução supersaturada de cloreto de sódio (NaCl – 75 % UR. Durante 12 h, o ganho de massa das células dos filmes, resultante da absorção de água pela solução saturada de nitrato, foi monitorado a cada 60 min por meio de pesagens em balança analítica (SHIMADZU, modelo ATY-224, precisão de 0,0001g). Os dados de ganho de massa em função do tempo foram utilizados para calcular a taxa de permeabilidade ao vapor de água (TPVA) por meio de uma regressão linear com $R^2 > 0,99$, conforme Equação 6.

$$TPVA(g.m^{-2}h^{-1}) = \left(\frac{m}{t}\right) \cdot \left(\frac{1}{A}\right) \quad \text{Equação 6}$$

Em que, $\left(\frac{m}{t}\right)$ é o coeficiente angular da reta ($g.h^{-1}$) e A é a área de permeação da amostra de filme (m^2). Em seguida, os valores de permeabilidade ao vapor d'água (PVA) ($g.Pa^{-1}s^{-1}m^{-2}$) dos filmes foram calculados de acordo com a Equação 7.

$$PVA(g.Pa^{-1}s^{-1}m^{-2}) = \frac{TPVA.e_{média}}{P_{sat}.(UR_1 - UR_2)} \quad \text{Equação 7}$$

Em que: $e_{média}$ é a espessura média (m), P_{sat} é a pressão de saturação de vapor d'água a 25 °C (Pa) = 3.169 Pa, UR_1 é a umidade relativa no interior do dessecador e UR_2 é a umidade relativa do interior da célula de permeação.

4.2.4.9 Cor e transmitância de luz

As propriedades de cor dos filmes foram analisadas por meio da medição das coordenadas L^* (luminosidade, do preto ao branco), a^* (cromaticidade, do verde ao vermelho) e b^* (cromaticidade, do azul ao amarelo) utilizando o colorímetro Colorquest® XE (HunterLab, EUA). O índice de saturação (C^*) e o ângulo de tonalidade (h^*) foram calculados conforme as Equações 8 e 9, respectivamente (ASTM D2244, com adaptação).

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad \text{Equação 8}$$

$$h^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad \text{Equação 9}$$

4.2.4.10 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A análise qualitativa das xilanas extraídas da polpa de celulose e dos filmes poliméricos formulados foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Os espectros foram obtidos no intervalo de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} , utilizando-se uma média de 32 varreduras por amostra (ASTM E1252). Essa análise permitiu identificar os principais grupos funcionais presentes nas xilanas e verificar alterações químicas decorrentes do processo de extração, da deslignificação e da incorporação das xilanas nos filmes.

4.2.4.11 Raios-X

O padrão de cristalinidade das xilanas e dos filmes foram realizadas em difratômetro de Raios-X (X'pert Powder, PANalytical), equipado com carregador automático de amostras e operando com radiação de Cu K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), a 40 kV e 30 mA. Os difratogramas foram obtidos na faixa de 5° a 60° e velocidade de varredura de 4°. min^{-1} . O índice de cristalinidade (X_C) de todas as amostras foi calculado pelo método Segal et al. (1959). A fração cristalina, das amostras, foi medida usando a Equação 10.

$$X_C, \% = \frac{I_{200} - I_{am}}{I_{200}} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

Em que, I_{200} é a intensidade máxima correspondente ao conteúdo cristalino e I_{am} é o pico para a porção amorfa.

4.2.5 Análise estatística

4.2.5.1 Planejamento Experimental

Foi realizado um experimento fatorial (4 x 3) +1, em um delineamento inteiramente casualizado com três repetições, no qual, totalizam 39 unidades experimentais. O primeiro fator correspondeu aos tipos de aditivo incorporados à matriz de carboximetilcelulose (CMC): três tipos de xilanas (marrom, pré-deslignificada e branqueada) e glicerol, totalizando quatro níveis. O segundo fator foi a concentração do aditivo, aplicada em três níveis, 2%, 6% e 10%, em relação à massa de CMC. Além dessas combinações, foi incluído um tratamento adicional, constituído pelo filme de CMC puro, sem aditivos, utilizado como controle.

4.2.5.2 Análise de variância e teste de média

As análises do experimento fatorial, excluindo o controle, foram realizadas seguindo o modelo estatístico:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad \text{Equação 11}$$

Em que, y_{ijk} é a variável resposta, μ é o efeito da média geral, α_i é o efeito do i-ésimo aditivo, β_j é o efeito da j-ésima dose, $\alpha\beta_{ij}$ é o efeito da interação aditivo x dose e ε_{ijk} é o efeito do erro aleatório. Incluindo o controle, o modelo estatístico para a análise de variância foi:

$$y_{ijk} = \mu + t_i + \varepsilon_{ijk}, \quad \text{Equação 12}$$

Em que, t_i é o efeito do i-ésimo tratamento.

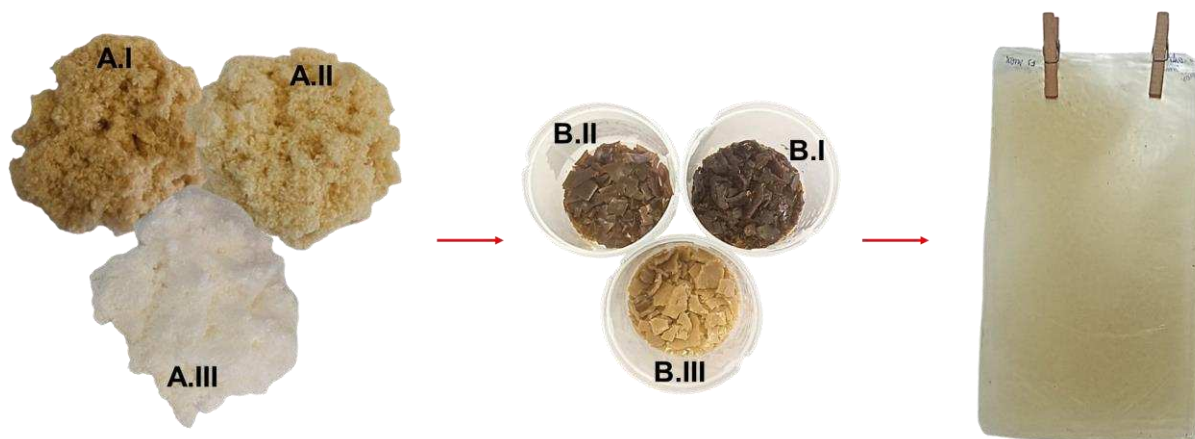
Os resultados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e os efeitos médios dos tratamentos foram comparados pelo teste de Scott-Knott (1974), a 5 % de probabilidade. Todas as análises estatísticas e gráficos foram feitas no *software* R (R Core Team, 2025). As análises de caracterização das xilanas e dos filmes por FTIR e raios-X foram avaliados de forma descritiva.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RENDIMENTO

Os resultados indicam que o rendimento de extração das xilanas varia conforme o tipo de polpa utilizada. A polpa pré-deslignificada apresentou o maior rendimento ($4,12\% \pm 0,0002$), possivelmente em função da remoção parcial da lignina, que facilita o acesso às hemiceluloses e reduz a obstrução estrutural da matriz fibrosa (Gomes, 2020b; Matos et al., 2023). A polpa marrom apresentou rendimento intermediário ($3,26\% \pm 0,0001$), enquanto a polpa branqueada apresentou o menor valor ($2,01\% \pm 0,0003$), o que pode estar associado à degradação ou à remoção das xilanas durante as etapas mais severas do processo de branqueamento, o que também influencia as propriedades ópticas e o brilho final da polpa (Trismawati et al., 2024; Song et al., 2024). Na Figura 9, estão apresentadas as imagens dos três tipos de polpas de celulose de eucalipto (A), das respectivas xilanas extraídas (B) e do filme de CMC incorporado com 10% de xilana marrom.

Figura 9. Representação das polpas de celulose, das xilanas e dos filmes de carboximetilcelulose com xilana marrom.



Legenda: Polpas de celulose de eucalipto: marrom (A. I), pré-deslignificada (A. II) e branqueada (A. III); xilanas: marrom (B. I), pré-deslignificada (B. II) e branqueada (B. III); Filmes de carboximetilcelulose incorporados com hemiceluloses, tipo xilanas.

A coloração das xilanas está diretamente relacionada à sua pureza e à presença de fragmentos de lignina residual, conforme a sua origem (Fengel; Wegener, 1989). As xilanas extraídas da madeira apresentam tonalidade branca, caracterizando seu estado nativo e a ausência de impurezas cromóforas adquiridas durante o processamento (Silva et al., 2022). Por outro lado, xilanas provenientes de polpas, marrom, pré-deslignificada e mesmo após o branqueamento, podem exibir tonalidades mais escuras, atribuídas à presença de fragmentos de lignina residual e/ou produtos de oxidação ainda associados à sua estrutura, conferindo-lhes o aspecto colorido observado na Figura 9 (Lu, 2021).

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICAS DAS XILANAS

5.2.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A análise por FTIR das xilanas extraídas das polpas de celulose de eucalipto marrom (M), pré-deslignificada (P) e branqueada (B) por NaOH permitiu a identificação de grupos funcionais característicos das xilanas, confirmando sua estrutura química e modificação ao longo do processo, conforme ilustrado na Figura 10 e descrito na Tabela 7.

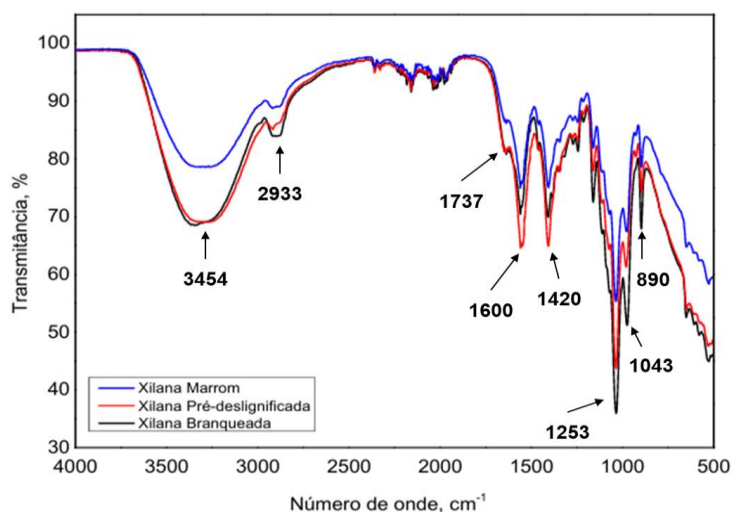
As etapas de pré-deslignificação e branqueamento promoveram alterações químicas específicas nas xilanas, principalmente evidenciadas pela redução dos grupos acetilados e ácidos urônicos, refletida na diminuição da intensidade das bandas (Nechita; Iana-Roman; Nastac, 2025a). Além disso, observa-se uma redução na quantidade de água adsorvida, sugerindo maior pureza e menor hidrofobicidade após o processamento. Apesar dessas

modificações, a estrutura polimérica principal das xilanas, representada pelas ligações éter e conformação β -glicosídica, é mantida ao longo do processo (Zhang et al., 2016c).

A banda em 3454 cm^{-1} , atribuída ao estiramento O-H, está presente em todas as amostras, indicando a presença contínua dos grupos hidroxílicos nas estruturas das xilanas e de água adsorvida, além de interações por ligação de hidrogênio (Ottah et al., 2022). Entretanto, a variação na intensidade e na largura dessa banda sugere que a hidrofobicidade e a capacidade de interação com água são alteradas ao longo do processo, possivelmente devido à remoção de componentes (lignina, grupos acetilados, ácidos urônicos, impurezas e extrativos), favorecendo, possivelmente, a interação com moléculas de água.

A vibração simétrica C-H, observada na região de 2933 cm^{-1} , confirma a manutenção das ligações alifáticas características das cadeias laterais das xilanas (Faria; Guimarães; Duran, 2023). Pequenas diferenças na intensidade dessa banda podem refletir modificações sutis nas cadeias laterais durante as etapas de pré-deslignificação e branqueamento.

Figura 10. Espectros no infravermelho (FTIR) das xilanas.



Na amostra marrom, observa-se a banda em 1737 cm^{-1} , atribuída ao estiramento C=O de grupos acetilados e ácidos urônicos. Essa banda apresenta maior intensidade na xilana pré-deslignificada, o que pode estar relacionado à remoção parcial da lignina e consequente maior evidência desses grupos funcionais. Já na xilana branqueada, a intensidade é reduzida, possivelmente devido a oxidações e à quebra de algumas ligações ésteres das xilanas, o que pode impactar suas propriedades químicas e físicas (Bouramdane et al., 2022).

Entre $1600\text{--}1510\text{ cm}^{-1}$, observam-se bandas atribuídas ao estiramento C=C de anel aromático conjugados com grupos oxigenados, características da lignina residual, cuja

intensidade é mais pronunciada na amostra marrom e reduzida nas etapas subsequentes, refletindo a remoção gradual dessa fração (Díaz et al., 2025). Essa observação indica que a intensidade da banda em 1600 cm^{-1} pode ser utilizada como um marcador espectroscópico para monitorar a degradação ou remoção de lignina durante o processamento de hemiceluloses e polpas.

A absorção em $\sim 1420\text{ cm}^{-1}$, atribuída à deformação do grupo CH_2 presente em lignina e celulose, apresentou redução com as etapas de purificação, indicando a remoção gradual de constituintes lignocelulósicos e modificações estruturais associadas à diminuição da fração de lignina residual nas xilanas (Chen et al., 2015).

A banda em $\sim 1253\text{ cm}^{-1}$, atribuída ao estiramento assimétrico C-O em ligações éter (C-O-C), apresenta intensidade semelhante entre as amostras, embora pequenas variações sejam observadas, indicando que a estrutura éter se mantém presente nas diferentes xilanas, confirmando que a estrutura polimérica fundamental das xilanas é preservada durante o processamento (Kostyukov, S. G. et al., 2023).

Finalmente, os picos em 1043 cm^{-1} e 890 cm^{-1} , atribuídos aos estiramentos C-O das ligações glicosídicas, confirmam a conformação β -glicosídica, reforçando que houve conservação da estrutura primária das xilanas, mesmo após as etapas de pré-deslignificação e branqueamento (Li, X. et al., 2018). Na Tabela 7 são apresentadas as principais bandas características observadas nos espectros de FTIR das xilanas, permitindo a identificação dos grupos funcionais presentes.

Tabela 7. Bandas características identificadas nos espectros FTIR das xilanas

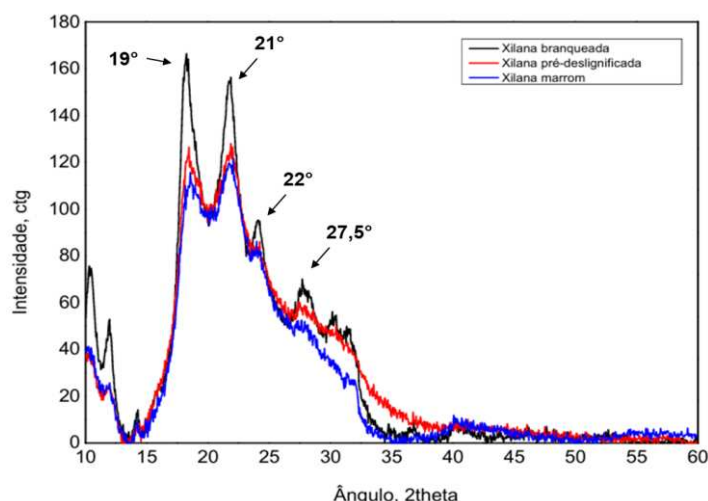
Número da onda, cm^{-1}	Grupo funcional
3454	Estiramento OH , grupos hidroxílicos
2933	Vibração simétrica C-H , ligações alifáticas
1737	Estiramento das ligações C=O , carbonila
1600	Estiramento C=C ligado a grupo oxigenado , anel aromático
1420	Deformação CH₂ , lignina/celulose
1253	Estiramento assimétrico C-O em ligações éter, estrutura principal das xilanas
1043	Estiramento C-O , conservação da estrutura primária das xilanas
890	Deformação C-H em configuração β-glicosídica

Dessa forma, as etapas químicas de purificação ajustam o perfil funcional das xilanas sem comprometer sua integridade estrutural fundamental, o que pode influenciar diretamente suas propriedades físico-químicas e potenciais aplicações (Javier-Astete, R. et al., 2021). As etapas de purificação alteram as propriedades físico-químicas das xilanas, aumentando a pureza e a solubilidade em água, reduzindo a coloração por meio do branqueamento e modificando características estruturais que impactam hidrofobicidade, estabilidade térmica e cristalinidade (Kostyukov, S. G. et al., 2023). Essas mudanças refletem diretamente nas aplicações potenciais, xilanas pouco purificadas, com lignina residual, apresentam maior opacidade e rigidez, sendo adequadas para embalagens sustentáveis e compósitos (Lucena et al., 2025; Huang et al., 2021; Hussain et al., 2024); as moderadamente purificadas equilibram pureza, cor e propriedades mecânicas, favorecendo o uso em filmes biodegradáveis e revestimentos (He et al., 2024; Zhao et al., 2020c), já as altamente purificadas destacam-se pela transparência, compatibilidade e uniformidade, possibilitando aplicações de maior valor agregado, como filmes transparentes, hidrogéis, biomateriais e formulações farmacêuticas e cosméticas (Waqar et al., 2025; Pires et al., 2022; Tang et al., 2023; Pereira et al., 2025; Gautam et al., 2025).

5.2.2 Raios-X

Os difratogramas de Raios-X das xilanas extraídas das polpas de celulose de eucalipto nas etapas de polpação marrom, pré-deslignificação e branqueamento estão apresentados na Figura 11. Os espectros evidenciaram características estruturais predominante amorfas e semi-cristalinas das xilanas, com padrões difusos típicos de materiais pouco ou parcialmente ordenados, que variam ao longo dos diferentes tratamentos químicos empregados no processo.

Observa-se, que todas as amostras apresentam padrões típicos de xilanas com predominância de regiões amorfas e semi-cristalinas, evidenciadas por bandas difusas ou parcialmente definidas. Embora haja sinais de frações parcialmente organizadas, a intensidade e a largura dessas regiões variam conforme as etapas de processamento, refletindo mudanças estruturais nas cadeias polissacarídicas das xilanas e sua pureza, evidenciadas na variação da intensidade e largura das bandas difusas, indicando mudanças no empacotamento molecular, na proporção entre regiões amorfas e semi-cristalinas e na heterogeneidade das cadeias polissacarídicas em função da remoção de lignina e outras impurezas. No entanto, a amostra branqueada apresenta um padrão semi-cristalino, com picos observados em aproximadamente 19° e 21° (2θ), evidenciando regiões parcialmente organizadas na estrutura.

Figura 11. Difratoograma de Raios-X das xilanas.

Nas amostras P e M, os picos observados entre 22° e 30 (2 θ) apresentam maior largura, indicando caráter predominantemente amorfo. Essa característica sugere menor ordenação das cadeias polissacarídicas e a possível presença de resíduos de celulose em estado desorganizado. Diferentemente da celulose cristalina, que gera picos estreitos e bem definidos, a celulose amorfa ou parcialmente desorganizada contribui para um halo difuso no DRX, Figura 10, refletindo a baixa regularidade do empacotamento molecular e aumentando a desordem estrutural das xilanas. A intensidade, posição e largura dos picos diferem entre as amostras, refletindo variações na cristalinidade parcial (Li; Xinag, 2022).

Do ponto de vista das interações químicas, a estrutura das xilanas é estabilizada por ligações de hidrogênio intermoleculares e interações de van der Waals que influenciam sua organização estrutural e contribuem para a formação das regiões cristalinas. A predominância das regiões amorfas está relacionada à disposição estrutural menos ordenada, decorrente da heterogeneidade da cadeia polimérica e das ramificações laterais (grupos acetil, 4-O-metilglucurônico e arabinose) características dessas hemiceluloses, o que dificulta a formação de regiões cristalinas e aumenta a porção amorfa da xilana (Mon, 2022). Os resultados da análise de difração de raios X (DRX) das xilanas, incluindo área cristalina, área total e fração cristalina, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros de DRX das xilanas

Amostra	I ₂₀₀ , ctg°	I _{am} , ctg°	X _C , %
Xilana marrom	206,39	1012,65	16,93
Xilana pré-deslignificada	120,09	1303,57	8,43
Xilana branqueada	405,64	935,18	30,25

Legenda: ctg°, contagem; I₂₀₀, região cristalina; I_{am}, região amorfa; X_C, fração cristalina

Os valores de fração cristalina (X_c) obtidos para as xilanas mostram variação significativa em função do tratamento: a xilana pré-deslignificada apresentou a menor cristalinidade (8,43%), a xilana marrom um valor intermediário (16,93%) e a xilana branqueada a maior cristalinidade (30,25%). Esses resultados são compatíveis com relatos na literatura que indicam que hemiceluloses, tipo xilanas, apresentam baixos índices de cristalinidade, variando de 4 a 21% dependendo da origem e do método de extração (Smith et al., 2020). Além disso, estudos mostram que o processo de purificação pode elevar o índice cristalino ao remover frações amorfas, enquanto etapas de deslignificação podem induzir maior desordem estrutural, reduzindo a cristalinidade (Wang et al., 2021). Assim, a elevação da cristalinidade observada na xilana branqueada indica maior organização estrutural decorrente do branqueamento, ao passo que a pré-deslignificação, conforme aplicada neste trabalho, parece ter introduzido ou mantido maior desordem na cadeia polissacarídica.

Esses estudos confirmam que a extração alcalina permite a obtenção seletiva de hemiceluloses, preservando parcialmente a organização estrutural da xilana branqueada, enquanto as demais amostras apresentam caráter predominantemente amorfo, favorecendo diferentes aplicações em hidrogéis, matrizes para liberação controlada de fármacos ou ativos cosméticos, filmes biodegradáveis, adesivos, cápsulas e materiais funcionais que exigem compatibilidade química e adaptação conformacional. Além disso, a diferença no grau de cristalinidade pode ser explorada em biomateriais inteligentes, sensores biodegradáveis e embalagens ativas, onde a manipulação da estrutura amorfa influencia propriedades como permeabilidade, absorção de água e estabilidade química.

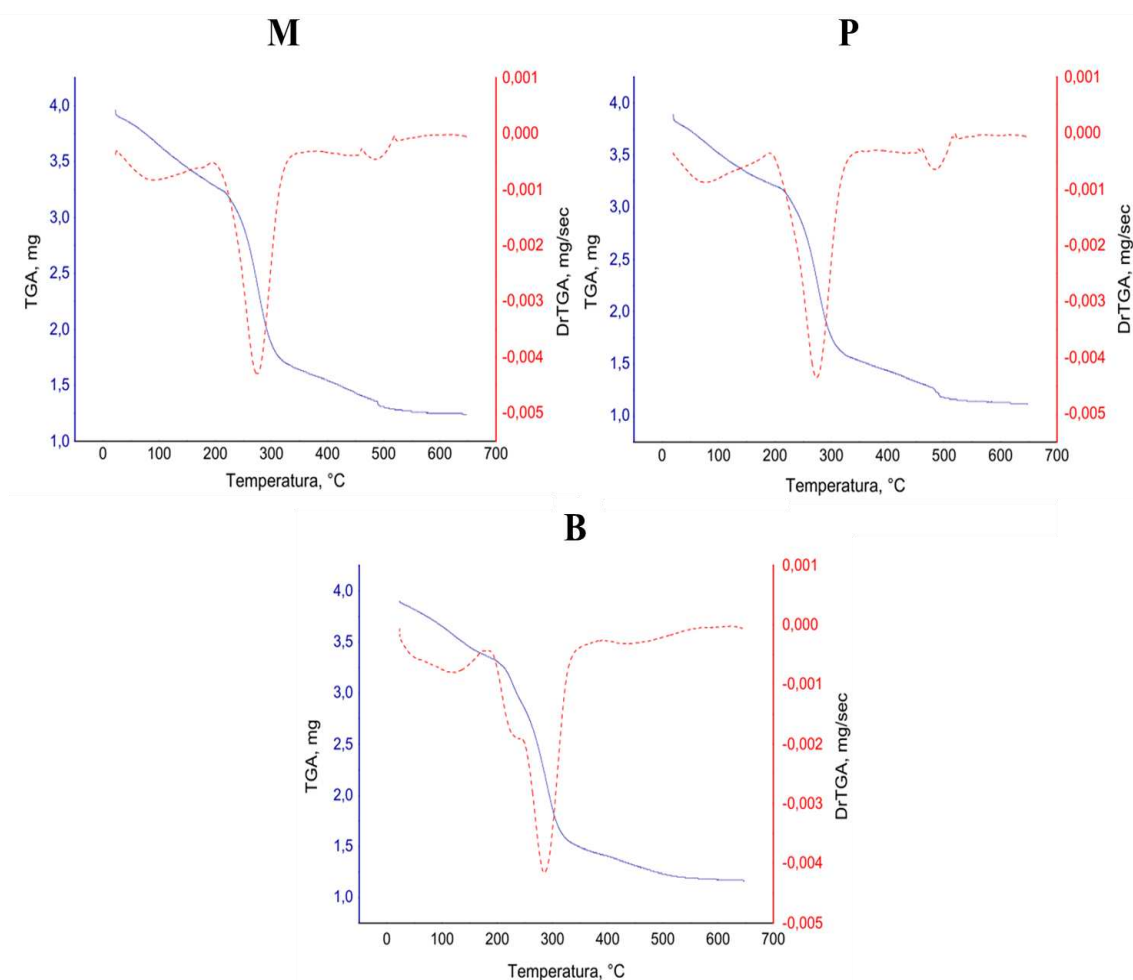
5.2.3 Análise termogravimétrica (TGA)

Na Figura 12, são apresentadas as curvas de perda de massa (TGA) em função do aumento gradual de temperatura e sua derivada (DTG) das amostras de xilanas marrom (M), pré-deslignificada (P) e branqueada (B), obtidas em atmosfera inerte de nitrogênio. Observa-se um comportamento térmico típico de polímeros naturais com três estágios principais de degradação.

Por meio da análise das curvas da derivada termogravimétrica (DrTGA) das xilanas marrom (M), pré-deslignificada (P) e branqueada (B) foi constatado diferenças associadas ao grau de purificação. Em todas as amostras, observou-se um evento térmico que ocorreu abaixo de 150 °C, correspondente à perda de água adsorvida ou álcool residual do processo (Lv; Almeida; Perré, 2015). A xilana marrom apresentou um perfil de degradação mais complexo, com um pico principal amplo entre 200-350 °C (máximo em 270 °C), relacionado à decomposição da

xilana, lignina residual e grupos acetilados, resultando em maior quantidade residual de compostos carbonáceo (Fan, 2022; Beall, 1969). A xilana pré-deslignificada, por sua vez, apresentou o pico principal levemente deslocado para temperaturas mais altas, na faixa de 250-320 °C, máximo em 280 °C, e de menor intensidade, indicando a remoção parcial de lignina, o que conferiu maior homogeneidade e menor resíduo térmico em comparação à xilana marrom (Shen, 2015). A xilana branqueada exibiu o perfil mais simples e definido, com um pico acentuado entre 250-300 °C, próximo a 290 °C, característico de materiais mais purificados, predominantemente compostos por xilanas. Esta amostra apresentou a menor quantidade de resíduo carbonáceo, evidenciando a eficácia do branqueamento na remoção de lignina e outras impurezas termoestáveis (Martínez, 2022). Assim, o tratamento químico progressivo resultou em degradação térmica em faixas semelhantes.

Figura 12. Curva termogravimétrica (TGA) das xilanas.



Legenda: xilanas marrom (M), xilana pré deslignificada (P) e xilana branqueada (B)

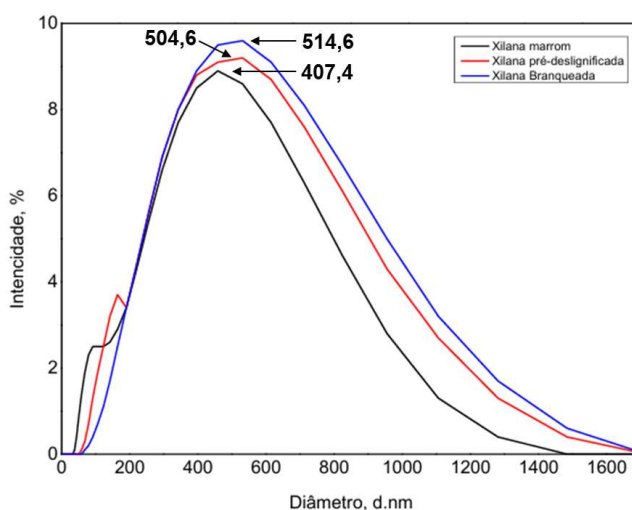
Esses resultados evidenciam que o tratamento de deslignificação e branqueamento altera a composição química das amostras, mas mantém as temperaturas de degradação em faixas semelhantes. Dessa forma, todas as amostras poderiam ser utilizadas na indústria, pois suportam as altas temperaturas típicas da maioria dos processos de produção de plásticos, apresentando ainda potencial para aplicação em sistemas que exigem estabilidade térmica e desempenho reprodutível, como em filmes poliméricos biodegradáveis.

5.2.4 Espalhamento dinâmico de luz (EDL)

A análise do tamanho de partícula das xilanas, Figura 13, foi feita para avaliar a influência dos processos na dimensão desse composto. As características dimensionais das partículas, como diâmetro médio, são determinantes para avaliar a homogeneidade do sistema e sua estabilidade, além de estarem diretamente relacionadas à interação entre as cadeias poliméricas por meio de forças físico-químicas, como ligações de hidrogênio.

O tamanho de partícula das xilanas indicou que o processo de purificação impactou diretamente suas características morfológicas. A xilana marrom (M) apresentou partículas com diâmetro médio de 407,4 nm, refletindo uma distribuição heterogênea típica de materiais pouco purificados (Melati et al., 2023). A pré-deslignificação (P) resultou em partículas com diâmetro médio em torno de 504,2 nm, enquanto a xilana branqueada (B) apresentou o maior diâmetro médio de 514,6 nm. Apesar das diferenças nos valores médios, todas as amostras mostraram ampla faixa de diâmetro hidrodinâmico, evidenciando distribuições heterogêneas (Anarado et al., 2022). A heterogeneidade indica a presença de partículas de diferentes tamanhos, bem como de agregados formados na etapa de precipitação das xilanas em suspensão no filtrado, ao longo do processo de extração (Abena; Simachew, 2024).

Figura 13. Diâmetro hidrodinâmico das xilanas.



As xilanas destinadas à aplicação em biopolímeros e materiais poliméricos devem apresentar baixo teor de lignina e extrativos, massa molecular adequada e grupos funcionais ativos, como hidroxilas, que favorecem a formação de ligações de hidrogênio e a miscibilidade com outras matrizes. Estruturas menos ramificadas contribuem para filmes contínuos e resistentes, enquanto solubilidade em água e viscosidade controlada asseguram processabilidade em soluções aquosas. A estabilidade térmica é igualmente essencial para suportar etapas de secagem ou extrusão sem degradação significativa. Associadas à possibilidade de modificação química e à baixa sensibilidade à umidade, essas propriedades físico-químicas viabilizam a produção de filmes e compósitos homogêneos, com desempenho mecânico, óptico e de barreira ajustável (Silva et al., 2018). Assim, a seleção criteriosa de xilanas com tais atributos é determinante para o êxito de sua incorporação em matrizes poliméricas. Neste contexto, os resultados das caracterizações físico-químicas das hemiceluloses, tipo xilana, confirmam que o processo de deslignificação e branqueamento altera as propriedades químicas das xilanas extraídas, o que é essencial para compreender a qualidade e as potenciais aplicações desses biopolímeros na indústria de materiais sustentáveis.

5.3 CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DOS FILMES DE CARBOXIMETILCELULOSE INCORPORADOS COM XILANAS E COM GLICEROL

As análises de caracterização indicaram que as xilanas apresentam potencial como aditivo na indústria de polímeros, podendo modificar propriedades mecânicas, térmicas e de barreira, ampliando a funcionalidade dos materiais. Neste contexto, este estudo avaliou matrizes de carboximetilcelulose de sódio (CMC–Na) incorporados com xilanas e com glicerol em quatro concentrações (0%, 2%, 6% e 10%), analisando a influência das xilanas na estrutura e nas propriedades físicas e funcionais dos filmes.

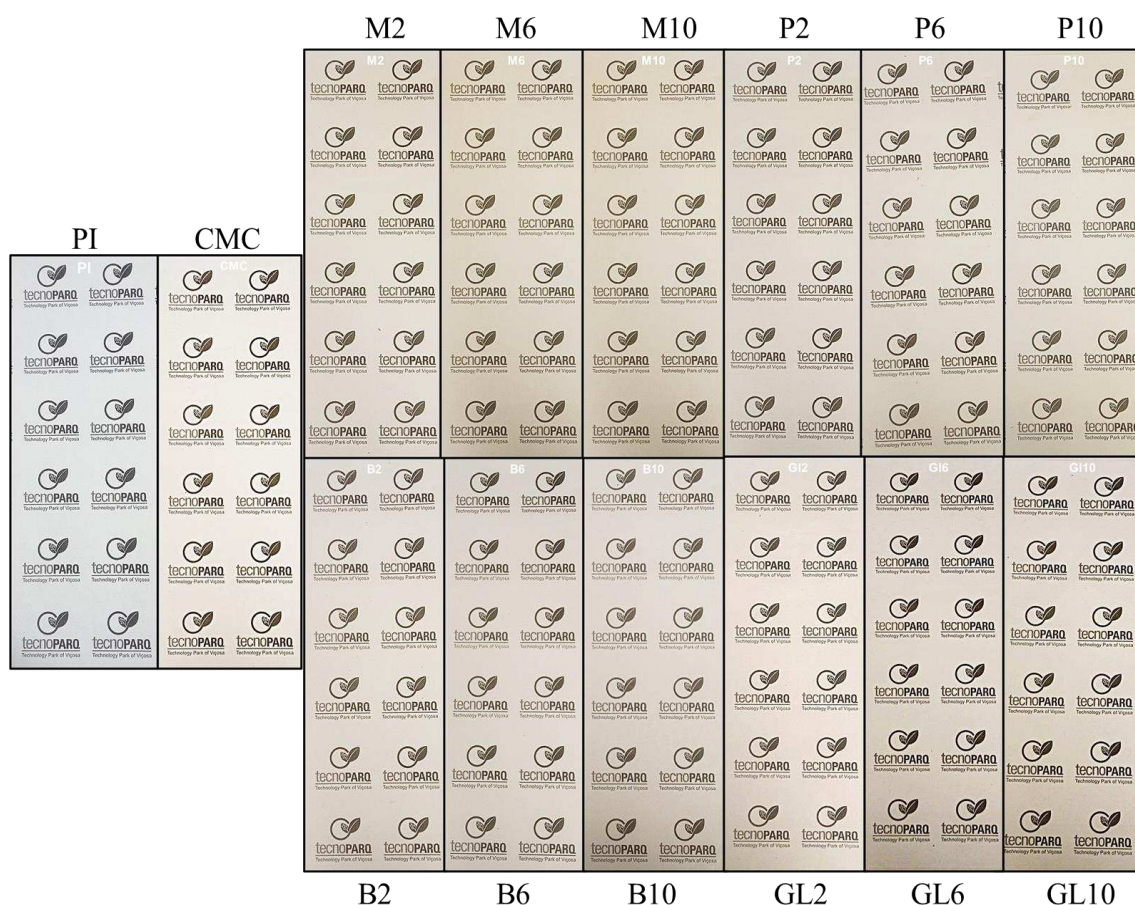
5.3.1 Avaliação das propriedades dos filmes de carboximetilcelulose

5.3.1.1 Aspecto visual

Na Figura 14, pode-se observar a diferença entre a transparência e a coloração dos filmes poliméricos, dependendo da concentração do tipo de aditivo. Para facilitar a avaliação do aspecto visual, as amostras foram posicionadas sobre um papel impresso, permitindo melhor observação de sua transparência, homogeneidade e coloração.

A presença de xilanas influenciou tanto a cor quanto a uniformidade dos filmes. Os materiais com xilana marrom apresentaram tonalidade amarelada e aspecto opaco (Fig. 13: M2, M6, M10), devido à presença de lignina. Já os filmes com xilana pré-deslignificada apresentaram aparência intermediária (Fig. 16: P2, P6, P10), refletindo a remoção parcial da lignina. Apesar do caráter parcialmente hidrofóbico dessas xilanas, observou-se boa interação com a carboximetilcelulose, indicando compatibilidade estrutural entre os polímeros, atribuída à formação de ligações de hidrogênio. Por sua vez, os filmes com xilana branqueada exibiram maior transparência e uniformidade (Fig. 16: B2, B6, B10), atribuídas à maior afinidade hidrofílica com a matriz de CMC. Independentemente da formulação, todos os filmes apresentaram superfície homogênea, sem partículas insolúveis ou bolhas de ar visíveis em sua superfície, corroborando observações de Zhang et al. (2022d), Silva et al. (2023c) e Pereira et al. (2023), que relacionaram o teor de lignina e a pureza das xilanas à aparência visual de filmes à base de CMC.

Figura 14. Fotografias do papel impresso (PI) e da matriz polimérica.



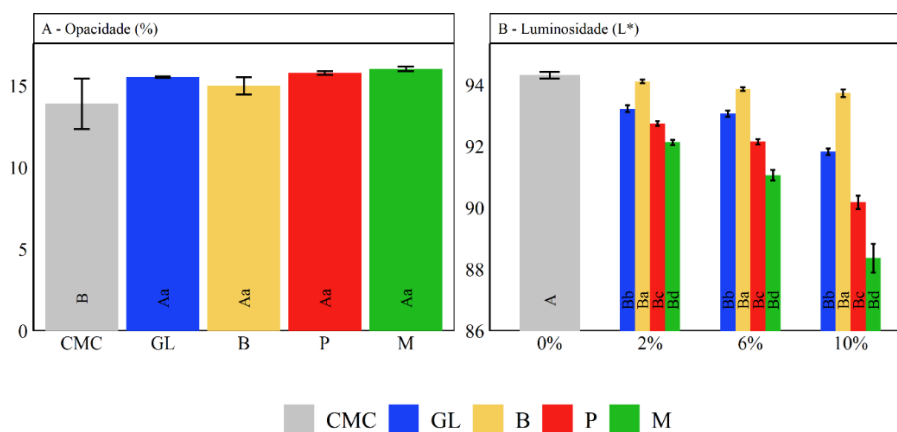
Legenda: matriz de carboximetilcelulose (CMC) e incorporados com xilanas marrom (M2; M6; M10), pré deslignificada (P2; P6; P10), branqueada (B2; B6; B10) e glicerol (GL2; GL6; GL10)

5.3.1.2 Cor e transmitância de luz

A opacidade e os parâmetros de cor (L^* , C^* e h°) dos filmes foram significativamente influenciados pela presença e concentração dos aditivos, glicerol e xilanas ($p < 0,05$). Os efeitos dos aditivos sobre a transmitância de luz dos filmes poliméricos podem ser observados na Figura 15. Esses efeitos refletem a interação da luz com a microestrutura e a composição química da matriz polimérica. A opacidade, Figura 15A, aumentou em relação ao filme controle (CMC, 13,90%), apresentando valores médios semelhantes entre as formulações com aditivos: 14,96% (GL), 15,54% (B), 15,79% (P) e 16,04% (M). Esses resultados indicam que os aditivos aumentaram a absorção da luz, tornando os filmes menos translúcidos.

A luminosidade (L^*), Figura 15B, apresentou tendência de redução com o aumento da concentração dos aditivos. O filme controle apresentou o maior valor (94,50), enquanto as amostras com 2%, 6% e 10% de aditivos apresentaram valores decrescentes. Para a xilana marrom (M), observaram-se os menores valores, variando de 90,21 (2%) a 87,81 (10%). As formulações com glicerol (GL), xilana pré-deslignificada (P) e xilana branqueada (B) também apresentaram reduções, embora menos acentuadas. No caso da xilana branqueada, a luminosidade manteve-se relativamente mais alta em comparação às outras xilanas devido à menor presença de lignina residual, resultando em maior transmitância de luz e aspecto mais claro do material. Essa diminuição geral está associada à presença de compostos cromóforos, como a lignina residual, que absorvem parte da luz incidente e conferem aspecto mais escuro às amostras que contêm xilanas menos branqueadas.

Figura 15. Resultados transmitância da luz da matriz polimérica.



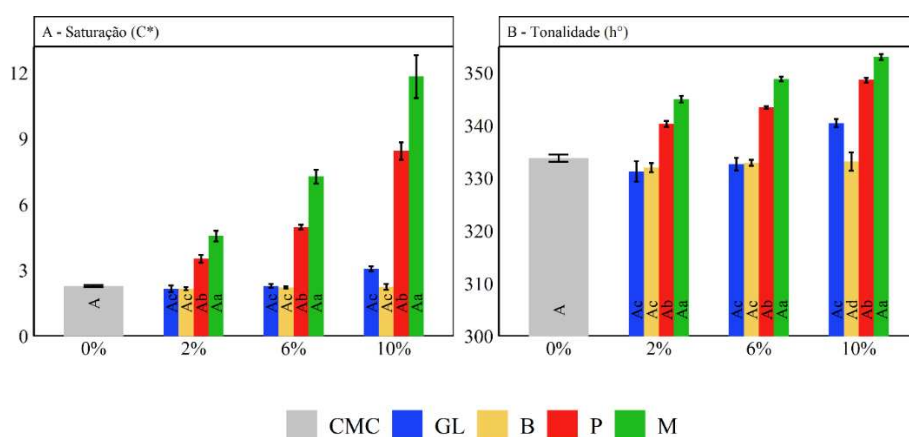
Legenda: matriz de carboximetilcelulose (CMC) e incorporados com xilanas marrom (M), pré deslignificada (P), branqueada (B) e glicerol (GL). Letras maiúsculas indicam comparação com o controle, e letras minúsculas indicam comparação entre os tratamentos. Letras diferentes na mesma coluna representam diferença estatística

significativa entre as médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), enquanto letras iguais indicam ausência de diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

A saturação (C^*), Figura 16A, do filme controle foi de 2,29 com tendência a aumentar com a maior concentração da xilana. Essa tendência indica intensificação da cor, resultado provável da interação dos aditivos com a matriz polimérica e da retenção de pigmentos naturais da lignina. A análise estatística pelo teste de Scott-Knott evidenciou diferenças entre os tipos de aditivos, a xilana marrom (M) apresentou saturação maior em relação às demais xilanas e ao glicerol (GL), enquanto a xilana pré-deslignificada (P) apresentou valores intermediários, e a xilana branqueada (B) e o GL exibiram os menores valores. Os efeitos dos aditivos sobre a cor dominante e intensidade dos filmes poliméricos podem ser observados na Figura 16.

A tonalidade (h°), Figura 16B, variou em função do tipo e da concentração dos aditivos, apresentando valores mais altos para M, seguido por P, B e GL, com diferenças estatísticas significativas detectadas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). O controle apresentou valor próximo de 330° , enquanto as amostras com xilana marrom (M) e pré-deslignificada (P) registraram valores mais elevados, chegando a 355° na formulação M com 10% de aditivo. Isso indica deslocamento do matiz para tons mais amarelados/marrons, o que está diretamente relacionado à presença de lignina residual e outros componentes fenólicos.

Figura 16. Resultados da cor percebida da matriz polimérica.



Legenda: matriz de carboximetilcelulose (CMC) e incorporados com xilanas marrom (M), pré deslignificada (P), branqueada (B) e glicerol (GL). Letras maiúsculas indicam comparação com o controle, e letras minúsculas indicam comparação entre os tratamentos. Letras diferentes na mesma coluna representam diferença estatística significativa entre as médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), enquanto letras iguais indicam ausência de diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Em síntese, a coloração dos filmes de CMC foi influenciada pela incorporação do glicerol e das xilanas, cuja intensidade das modificações ópticas foi proporcional à concentração e dependente do tipo do aditivo, reforçando o potencial das xilanas como moduladores naturais das propriedades ópticas dos filmes de carboximetilcelulose (Fang et al., 2016). De forma geral, a adição de glicerol e xilanas conferiu aos filmes maior opacidade, menor luminosidade, maior saturação e alteração de tonalidade. Essas mudanças podem estar associadas às modificações microestruturais e químicas provocadas pelos aditivos, intensificada presença de lignina residual nas xilanas marrom e pré-deslignificada, corroborando com os resultados de FTIR. Ademais, a heterogeneidade morfológica das xilanas, associada ao grau de purificação, impactaram diretamente na transparência e na coloração dos filmes, item 5.2 deste documento, o que pode ser vantajoso em aplicações onde a proteção à luz seja desejada, como embalagens para alimentos fotossensíveis (Emiroglu et al., 2020).

5.3.1.3 Espessura, gramatura e densidade

A espessura, a gramatura e a densidade dos filmes poliméricos foram influenciadas pela adição dos aditivos, conforme representado na Figura 17. O filme controle (CMC) apresentou maior espessura, gramatura e densidade, com diferenças estatisticamente significativas em relação às demais amostras. As amostras aditivadas com glicerol (GL) e xilanas branqueada (B) tiveram espessuras intermediárias, enquanto os filmes de xilanas pré-deslignificada (P) e marrom (M) apresentaram menores valores de espessura, indicando uma possível compactação das cadeias poliméricas, Figura 17A.

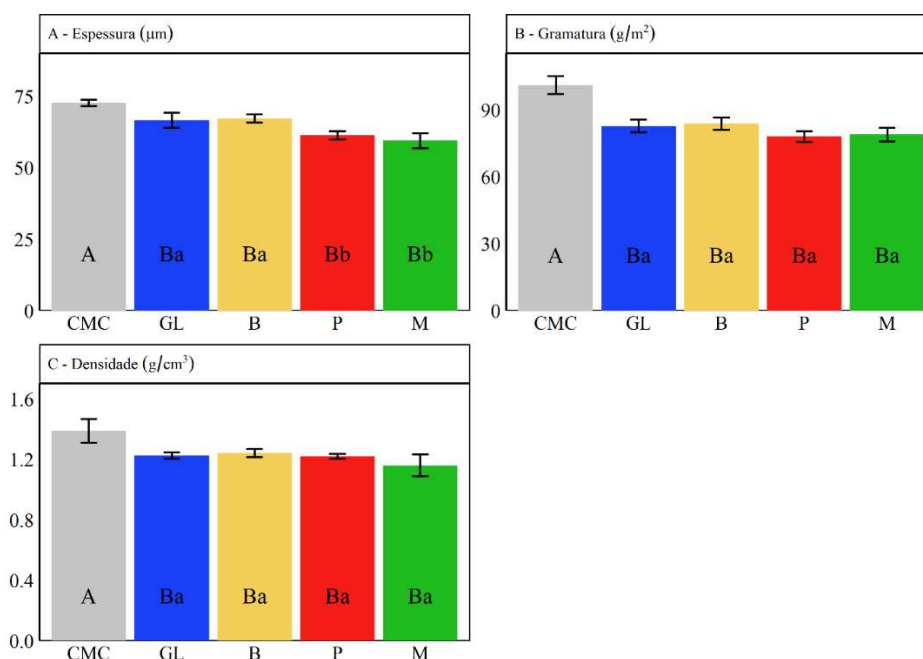
Quanto aos valores de gramatura e densidade, Figura 17B e Figura 17C, não houve diferenças significativas entre os aditivos. Uma vez que os filmes foram produzidos em placas com mesma área e massa inicial, era de se esperar que a gramatura fosse similar para todos os filmes. Contudo, foram observados menores valores de espessura, gramatura e densidade nos filmes aditivados em comparação com o controle, o que pode ser atribuído a possível perda de massa durante o processo e/ou menor retenção de umidade.

A espessura, a gramatura e a densidade dos filmes de carboximetilcelulose (CMC) apresentaram os maiores valores entre as formulações. Nos filmes com glicerol (GL) observou-se redução desses parâmetros, enquanto os filmes contendo xilanas, marrom (M), pré-deslignificada (P) e branqueada (B), apresentaram resultados semelhantes entre si, com menores valores de espessura e gramatura em relação ao controle, mas sem diferenças significativas na densidade. Esses resultados indicam que a incorporação de xilanas contribui para a formação de filmes mais finos e leves, mantendo, contudo, uma densidade próxima à dos

demais tratamentos, em concordância com estudos anteriores (Zhao et al., 2021b; Silva et al., 2020b).

Portanto, a técnica casting permite o controle das propriedades de espessura, gramatura e densidade dos filmes, sendo essas propriedades afetadas pela perda de compostos, pela retenção de umidade e pela compactação das cadeias.

Figura 17. Resultados das propriedades estruturais da matriz polimérica.



Legenda: matriz de carboximetilcelulose (CMC) e incorporados com xilanas marrom (M), pré deslignificada (P), branqueada (B) e glicerol (GL). Letras maiúsculas indicam comparação com o controle, e letras minúsculas indicam comparação entre os tratamentos. Letras diferentes na mesma coluna representam diferença estatística significativa entre as médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), enquanto letras iguais indicam ausência de diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

5.3.1.4 Tensão, elasticidade e deformação

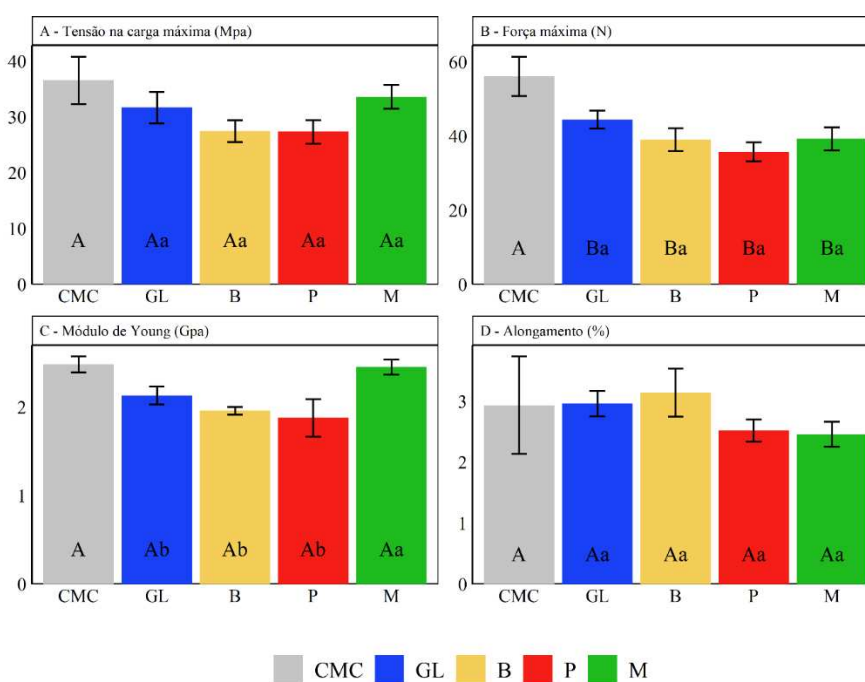
A resistência mecânica dos filmes, avaliada por meio da tensão na carga máxima, força máxima, módulo de Young e alongamento, apresentou variações em função do tipo de aditivo, Figura 18. O filme controle (CMC) apresentou valores médios de 36,56 MPa para tensão na carga máxima, 56,11 N de força máxima, 2,485 GPa de módulo de Young e 2,933% de alongamento. Com a adição de glicerol (GL), os valores médios foram reduzidos para 25,44 MPa, 35,11 N, 1,927 GPa e 3,052%, respectivamente, indicando um comportamento mais flexível. As formulações com xilana marrom (M) apresentaram médias de 26,96 MPa, 33,33 N, 2,133 GPa e 2,548%, enquanto as com xilana pré-deslignificada (P) resultaram em 31,33 MPa,

47,22 N, 2,561 GPa e 2,852%, e a xilana branqueada (B) apresentaram valores com médias de 29,33 MPa, 39,89 N, 2,294 GPa e 2,756%.

A incorporação de xilanas e de glicerol nos filmes de CMC não alterou a tensão na carga máxima nem o alongamento, Figura 18A e Figura 18D, mas reduziu a força máxima suportada pelos filmes aditivados, Figura 18B. Esse resultado pode ser explicado por meio da definição da tensão na carga máxima, que é a relação da força de tração máxima suportada pela área da seção transversal do filme, ou seja largura versus espessura. Logo, embora a força máxima resistida pelos filmes aditivados sejam menores, a área da seção transversal também é menor, visto que a espessura foi menor. Portanto, pode-se inferir que a resistência dos filmes é a mesma.

A xilana marrom (M) foi a única a aumentar significativamente o módulo de Young, Figura 18C, indicando maior rigidez do filme de CMC. Esse efeito está associado à presença de lignina e grupos acetilados, que atuam como elementos estruturais rígidos, restringindo a mobilidade das cadeias e promovendo empacotamento mais eficiente via interações físicas. Embora o FTIR não evidencie novas ligações químicas, essas interações estéricas elevam a rigidez do material sem alterar significativamente a deformação máxima ou o alongamento.

Figura 18. Resultados das propriedades mecânicas da matriz polimérica.



Legenda: matriz de carboximetilcelulose (CMC) e incorporados com xilanas marrom (M), pré deslignificada (P), branqueada (B) e glicerol (GL). Letras maiúsculas indicam comparação com o controle, e letras minúsculas indicam comparação entre os tratamentos. Letras diferentes na mesma coluna representam diferença estatística

significativa entre as médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), enquanto letras iguais indicam ausência de diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

O módulo de Young, indicativo da rigidez, foi reduzido com a adição dos aditivos, especialmente nos tratamentos GL, B e P, indicando que os filmes se tornaram mais flexíveis. Apesar disso, o alongamento não variou drasticamente entre as formulações, mantendo valores próximos ao do controle, sugerindo que esses aditivos não atuaram como plastificantes, mas promoveram modificações estruturais impactando a maleabilidade. Ao se avaliar o efeito do teor de aditivos, nas concentrações estudadas (2%, 6% e 10%), não se observou uma variação nos parâmetros mecânicos, reforçando que o impacto está mais relacionado à presença do aditivo do que à sua quantidade. Essa performance mecânica reforça o potencial das xilanas como aditivos multifuncionais e sustentáveis para filmes poliméricos (Abe, Branciforti e Brienzo, 2021; Mujtaba et al., 2023).

Ainda assim, as alterações observadas nas propriedades mecânicas podem ser adequadas para aplicações como embalagens de alimentos frescos, rótulos e revestimentos, onde uma certa maleabilidade é desejável sem comprometer a integridade do material (Mendes et al., 2022c; Fonseca et al., 2019).

5.3.1.5 Intumescimento, solubilidade e permeabilidade ao vapor d'água

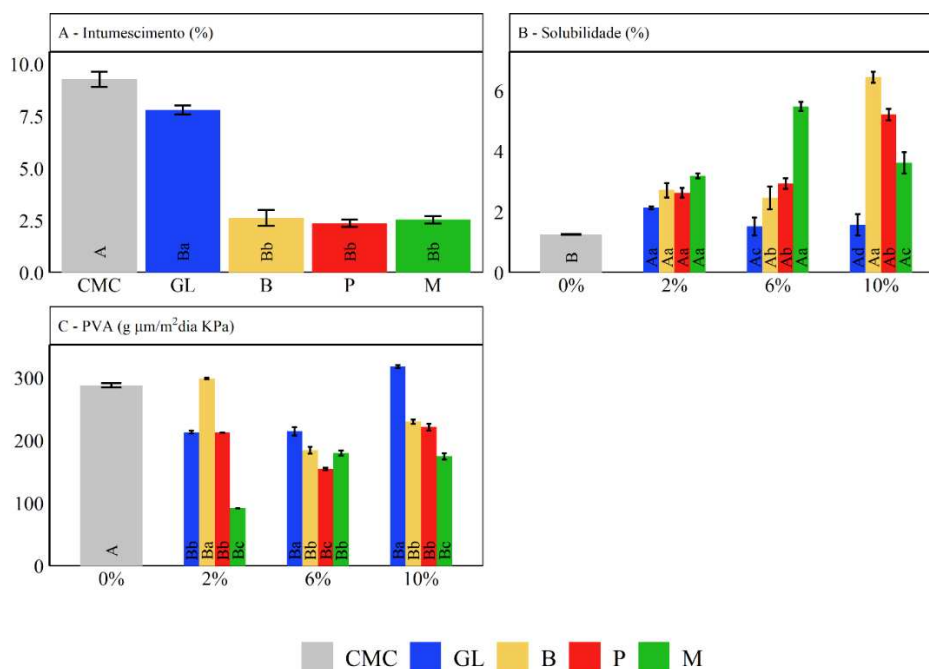
As interações dos filmes com a umidade, avaliadas pelo intumescimento, solubilidade e permeabilidade ao vapor de água (PVA), foram moduladas pela adição de GL, B, P e M (Figura 19). O intumescimento e a PVA foram reduzidos nos filmes aditivados em relação ao controle, enquanto a solubilidade aumentou com a concentração dos aditivos, indicando que a matriz polimérica é ajustável por esses parâmetros.

O intumescimento, Figura 19A, em etanol dos filmes foi significativamente reduzido nas formulações contendo xilanas, especialmente nas amostras com xilana marrom (M) e pré-deslignificada (P), que apresentaram os menores valores de inchaço. Esse comportamento indica maior resistência ao intumescimento em meio aquoso quando comparado às formulações com glicerol (GL) e ao controle de CMC, que exibiram os maiores valores. A redução do intumescimento nas amostras com xilanas está associada à menor disponibilidade de grupos hidrofílicos expostos, à maior densidade de reticulação da rede polimérica e à menor mobilidade das cadeias devido à presença de frações lignificadas, que tornam a matriz mais rígida. Além disso, regiões mais cristalinas dificultam a penetração do solvente, restringindo a expansão do filme. Consequentemente, o menor intumescimento das formulações com xilanas está

diretamente relacionado à sua menor solubilidade, evidenciando maior estabilidade estrutural e resistência à absorção de etanol em comparação com os filmes contendo apenas glicerol ou o controle de CMC (Nechita, Roman e Ciolacu 2021).

Em contraste, a solubilidade dos filmes, Figura 19B, em etanol aumentou progressivamente com a concentração dos aditivos, sendo mais acentuada nas formulações com 10% de xilanas e glicerol, conforme evidenciado pelo gráfico. Esse comportamento indica maior afinidade desses componentes com o solvente, resultado da capacidade das frações poliméricas de se dispersarem completamente em etanol. Fatores como forças intermoleculares (quando as interações polímero-etanol superam as interações polímero-polímero), grau de substituição química (como os grupos carboximetil da CMC), peso molecular (cadeias mais curtas se dissolvem mais facilmente) e cristalinidade (regiões amorfas se solubilizam mais facilmente) influenciam esse processo. Assim, a presença de xilanas e glicerol favorece a dissolução, promovendo maior solubilidade em relação ao filme controle (Avelino, 2019; Poloni, 2022).

Figura 19. Resultados das propriedades hídras e de barreira da matriz polimérica.



Legenda: matriz de carboximetilcelulose (CMC) e incorporados com xilanas marrom (M), pré deslignificada (P), branqueada (B) e glicerol (GL). Letras maiúsculas indicam comparação com o controle, e letras minúsculas indicam comparação entre os tratamentos. Letras diferentes na mesma coluna representam diferença estatística significativa entre as médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$), enquanto letras iguais indicam ausência de diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

A permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes, Figura 19C, aumentou com a incorporação de aditivos, apresentando comportamento dependente do tipo e da concentração. Observa-se que, em 2% de aditivos, a xilana branqueada apresentou o maior valor de PVA, enquanto a marrom e a pré-deslignificada apresentaram valores intermediários, indicando que pequenas adições já impactam a barreira à umidade. Com concentrações mais altas (6% e 10%), o glicerol promoveu os maiores aumentos na PVA, refletindo seu efeito plastificante e hidrofílico, que aumenta a mobilidade das cadeias poliméricas. As xilanas, apesar de aumentarem a retenção de água na matriz, não comprometem completamente a barreira devido à coexistência de regiões rígidas e reticuladas com regiões amorfas que permitem difusão parcial de vapor. Esses resultados indicam que a modulação da PVA depende da natureza química dos aditivos e da interação estrutural com a matriz de CMC, sendo possível ajustar a permeabilidade ao vapor de água conforme a formulação (Silva; Santos; Oliveira, 2020; Rodrigues; Lima, 2020).

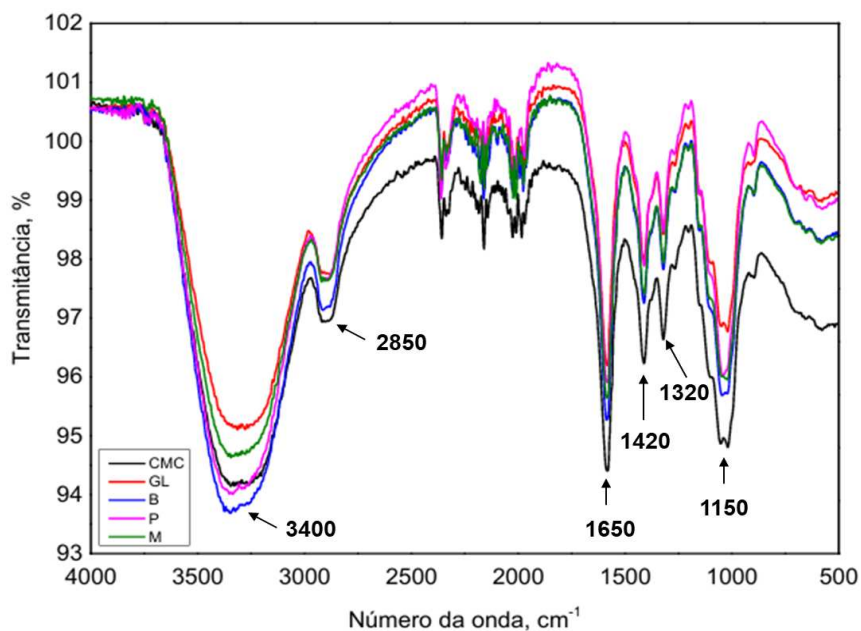
Dessa forma, os efeitos dos aditivos sobre as propriedades hídricas e de barreira indicam que os filmes apresentam baixo intumescimento e alta solubilidade em etanol, enquanto em soluções aquosas saturadas a permeabilidade e a absorção de água são influenciadas pela matriz polimérica e pelos aditivos. Esses resultados sugerem que a escolha do tipo e da concentração de xilana deve ser feita de forma estratégica, considerando o solvente e a aplicação desejada (Zhang et al., 2022d; Monteiro et al., 2023). Em vista disso, para aplicações industriais como sachês solúveis, materiais para encapsulamento ou embalagens para produtos secos, as formulações testadas podem ser vantajosas (Hosseini et al., 2022; Freitas et al., 2023).

5.3.2 Caracterização dos filmes de carboximetilcelulose

5.3.2.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), Figura 20, foi empregada para identificar os grupos funcionais presentes na matriz polimérica e investigar possíveis interações químicas entre os constituintes, complementando as análises das propriedades estruturais, item 5.3.1.3 deste documento.

Figura 20. Espectros no infravermelho (FTIR) da matriz polimérica.



Legenda: matriz de carboximetilcelulose (CMC) e incorporados com xilanas marrom (M), pré deslignificada (P), branqueada (B) e glicerol (GL) na concentração 10%.

Por meio da análise de FTIR na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , foi possível identificar as principais bandas características da matriz de CMC e dos aditivos incorporados, conforme apresentado na Tabela 9 e na Figura 14. Na região de 3200–3600 cm^{-1} , observou-se uma banda larga atribuída ao estiramento axial de grupos hidroxila (O–H), presente em todos os filmes. Essa banda apresentou maior intensidade nas formulações contendo xilanas, em especial nos filmes com xilana branqueada (B) e pré-deslignificada (P), sugerindo maior densidade de grupos hidroxila e formação de ligações de hidrogênio entre os constituintes da matriz polimérica (Suryanto et al., 2025).

Na faixa de 2800–3000 cm^{-1} , associada ao estiramento axial de C–H alifático, foram observadas variações de intensidade entre os filmes, o que indica a contribuição de cadeias metilênicas provenientes do glicerol e de xilanas com menor grau de purificação. Já na região de 1510–1650 cm^{-1} , atribuída ao estiramento assimétrico de grupos carboxilato (COO^-) e a vibrações de carbonilas, a intensificação dessas bandas nos filmes contendo xilanas P e M sugere maior presença de grupos carboxílicos, possivelmente relacionados a ácidos urônicos das hemiceluloses, e evidencia interações químicas mais pronunciadas com a matriz de CMC (Atta et al., 2022). Por fim, as bandas na faixa de 1000–1200 cm^{-1} , típicas dos estiramentos de C–O e C–O–C em polissacarídeos, foram intensificadas nos filmes contendo aditivos em comparação ao CMC puro. Esse comportamento confirma a boa miscibilidade entre CMC,

xilanas e glicerol, além de evidenciar interações estruturais eficazes na formação dos filmes (Zhang et al., 2022d).

Tabela 9. Bandas características identificadas nos espectros FTIR da matriz de carboximetilcelulose

Número da onda, cm^{-1}	Grupo funcional
3400	Estiramento O–H (hidroxilas)
2850	Estiramento C–H (alifático)
1600	Estiramento assimétrico COO⁻ ; água ligada
1420	Estiramento simétrico COO⁻ + deformação C–H
1320	Estiramento C–O fenólico; grupos metoxila (lignina)
1000	Estiramentos C–O–C (ligações glicosídicas β -1,4) e C–O (álcoois primários/secundários)

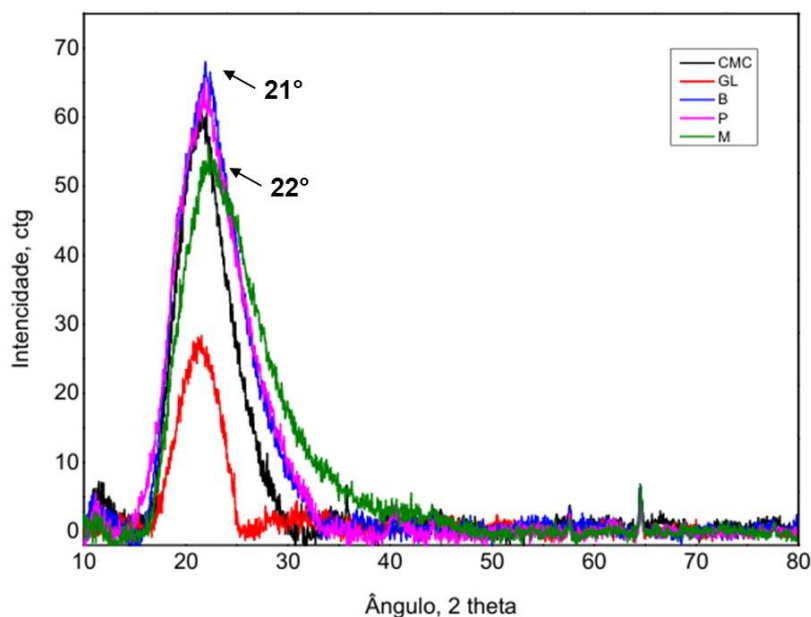
A análise de FTIR evidenciou que a incorporação do glicerol e das xilanas promoveu alterações na matriz de carboximetilcelulose, com intensificação das bandas atribuídas a grupos hidroxila, carboxilato e ligações glicosídicas. Esses resultados confirmam a boa miscibilidade entre os constituintes e a ocorrência de interações estruturais, principalmente por ligações de hidrogênio e associações entre grupos carboxílicos e polissacarídicos, reforçando o potencial das formulações para aplicações em matrizes poliméricas sustentáveis (Palasingh et al., 2021).

5.3.2.2 Raios-X

A técnica do DRX foi utilizada para investigar a organização estrutural dos filmes, com foco no índice de cristalinidade. Esse parâmetro é relevante por influenciar propriedades ópticas e mecânicas, como translucidez e rigidez. O método baseia-se na interação dos Raios-X com os planos cristalinos do material, permitindo distinguir regiões ordenadas e amorfas. Dessa forma, o perfil difratométrico obtido fornece informações sobre a proporção relativa dessas fases, conforme pode ser observado na Figura 21.

Na Figura 21, observa-se que todas as amostras apresentaram perfis difratométricos típicos de polímeros predominantemente amorfos, evidenciados por halos largos e pouco definidos característicos da carboximetilcelulose. Em torno de $\sim 21\text{--}22^\circ$ (2θ) aparecem regiões associadas à fração cristalina, sendo que variações na intensidade e largura dos picos refletem alterações na organização estrutural das cadeias polissacarídicas em função dos aditivos incorporados.

Figura 21. Difratoograma de Raios-X da matriz polimérica.



Legenda: matriz de carboximetilcelulose (CMC) e incorporados com xilanas marrom (M), pré deslignificada (P), branqueada (B) e glicerol (GL) na concentração 10%.

O filme controle de CMC apresentou pico mais intenso e relativamente estreito, indicando a presença de pequenas regiões cristalinas (Abdulhameed et al., 2019). A incorporação da xilana marrom (M) reduziu esse sutil grau de organização, provavelmente devido à presença de ramificações e resíduos de lignina que dificultam o empacotamento ordenado. Comportamento semelhante foi observado na amostra com glicerol (GL), em que o afastamento entre as cadeias e a redução das interações por ligações de hidrogênio explicam a maior desordem, em concordância com os resultados de FTIR (Carà et al., 2013). Já as xilanas pré-deslignificada (P) e branqueada (B) exibiram perfis intermediários, sugerindo que a remoção gradual de grupos laterais e lignina durante o processo de purificação favorece ligeiro aumento da organização estrutural. Na Tabela 10 é apresentado os parâmetros de DRX obtidos para a matriz polimérica, destacando as variações de intensidade dos picos e da fração cristalina em função dos diferentes aditivos incorporados.

A Tabela 10 e a Figura 21 evidenciam que a intensidade dos picos varia em função dos aditivos incorporados, refletindo diretamente na proporção entre regiões cristalinas e amorfas. As xilanas (M, B e P) promoveram aumento da cristalinidade em relação à CMC pura, especialmente para P (110,59%) e B (91,75%), sugerindo maior empacotamento das cadeias e redução da desordem estrutural. Em contrapartida, o glicerol (GL) reduziu a cristalinidade (63,13%) em razão do seu efeito plastificante, que amplia a mobilidade segmentar e dificulta a

organização regular. Esses resultados confirmam que a escolha do aditivo exerce papel central na organização estrutural da matriz, impactando diretamente suas propriedades tecnológicas e permitindo estabelecer correlações entre estrutura, desempenho e aplicação da matriz polimérica.

Tabela 10. Parâmetros de DRX da matriz polimérica

Amostra	I ₂₀₀ , ctg°	I _{am} , ctg°	X _c , %
CMC	415,79	500,17	83,02
GL	135,88	215,21	63,13
M	477,65	603,77	79,09
B	543,70	592,65	91,75
P	517,57	572,42	110,59

Legenda: ctg°, contagem; I₂₀₀, região cristalina; I_{am}, região amorfa; X_c, fração cristalina

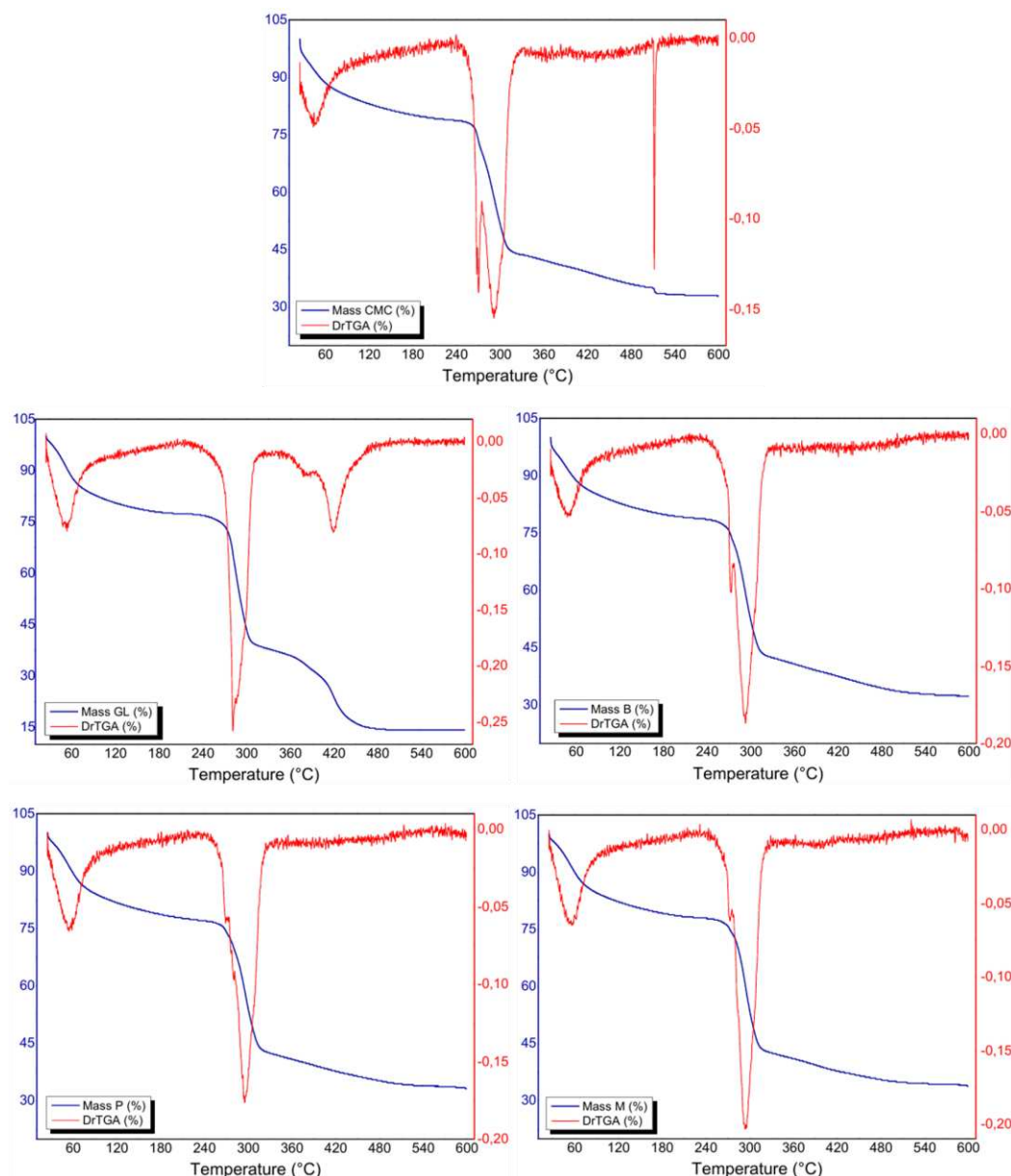
5.3.2.3 Análise termogravimétrica (TGA)

A curva termogravimétrica (TGA) e sua derivada (DTG), Figura 22, foi utilizada para avaliar a estabilidade térmica dos filmes à base de CMC, puros e incorporados com diferentes aditivos (glicerol, xilanas marrom, pré-deslignificada e branqueada). Os perfis térmicos revelaram três principais estágios de perda de massa. O primeiro evento, observado entre 30–120 °C, corresponde à perda de água livre e a volatilização de glicerol dos filmes. O segundo evento ocorreu entre 200–300 °C e está associado à degradação térmica da matriz de CMC e de seus aditivos (Andrade et al., 2019; Ramos Júnior, 2022).

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) evidenciou diferenças significativas na estabilidade térmica entre os filmes. O glicerol (GL) apresentou o pico principal de degradação em aproximadamente 290 °C, confirmando seu efeito plastificante ao reduzir a estabilidade térmica em comparação ao CMC puro, cujo pico foi observado em torno de 320 °C. Entre as xilanas, a amostra marrom (M) apresentou o pico principal em ~300 °C, indicando menor estabilidade devido à presença de lignina residual e impurezas. Já a xilana pré-deslignificada (P) apresentou comportamento intermediário, com o pico em ~310 °C, enquanto a xilana branqueada (B) apresentou maior estabilidade entre as hemiceluloses, com pico em ~315 °C, valor próximo ao do CMC puro. Esses resultados demonstram que o processo de deslignificação e branqueamento favorece a resistência térmica das xilanas, ao passo que a adição de glicerol reduz a estabilidade devido à maior mobilidade das cadeias poliméricas. Portanto, esses resultados indicam que todos os filmes podem ser agrupados como materiais capazes de suportar temperaturas típicas de processamento via casting ou exposição térmica entre 200 e 220 °C sem degradação. Isso sugere que esses filmes são compatíveis com processos industriais

como casting, extrusão e injeção, dependendo da temperatura de processamento, sendo promissores para aplicações em embalagens sustentáveis, cosméticos, fármacos e utensílios descartáveis.

Figura 22. Curvas termogravimétricas (TGA) da matriz polimérica.



Legenda: matriz de carboximetilcelulose (CMC) e incorporados com xilanas marrom (M), pré deslignificada (P), branqueada (B) e glicerol (GL) na concentração 10%.

De modo geral, os resultados evidenciam que a modulação das propriedades dos filmes pode ser estrategicamente controlada a partir da escolha do tipo e da concentração dos aditivos. Destacando-se que para as formulações com xilana pré-deslignificada e branqueada mostrando-se promissoras para aplicações em embalagens biodegradáveis que exigem flexibilidade,

resistência moderada e controle de transparência, enquanto os filmes com xilana marrom se destacam para aplicações que requerem opacidade e proteção contra luz. Assim, a valorização de coprodutos lignocelulósicos como as xilanas se mostra viável na engenharia de materiais sustentáveis, com potencial de aplicação em setores como embalagens alimentícias, revestimentos funcionais e sistemas solúveis ou controladamente degradáveis.

6. CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho, foi possível avaliar o efeito dos tipos de xilanas e do teor das mesmas nas propriedades ópticas, físicas, mecânicas e hídras de filmes à base de carboximetilcelulose, bem como foi possível avaliar o efeito de um plastificante das xilanas comparando os resultados com os alcançados com o glicerol. De acordo com os resultados, apresentou-se favorável a substituição do glicerol pelas xilanas em concentração de 10%, independente do tipo de xilana, uma vez que vão proporcionar efeito plastificante semelhante, bem como comportamento semelhante de perda de resistência máxima à tração e redução da rigidez do material. Contudo, do ponto de vista econômico, recomenda-se o emprego de xilanas marrom e, ou pré-deslignificadas em concentrações moderadas, até 6%, uma vez que essas frações exigem menor grau de purificação, apresentam maior rendimento de extração e preservam funcionalidades relevantes, reduzindo etapas e custos no processamento. Essa abordagem favorece a viabilidade de escala industrial, aliando desempenho técnico e custo-benefício. De forma geral, os resultados indicam que a modulação das propriedades dos filmes de CMC pode ser alcançada por meio do controle da concentração e do tipo de xilana, bem como da presença de glicerol, possibilitando o desenvolvimento de materiais biodegradáveis com desempenho ajustável para aplicações específicas, como embalagens sustentáveis, reforçando o aproveitamento de coprodutos da indústria de celulose dentro do conceito de economia circular.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos e da relevância tecnológica do presente estudo, diversas possibilidades de continuidade científica e aplicação prática podem ser exploradas. Entre as possibilidades se destacam:

- Determinar a concentração de hidroxila e de ácidos urônicos das xilanas, além do da concentração de hidroxila da matriz polimérica carboximetilcelulose;

- Investigação de técnicas de modificação superficial das xilanas para melhorar a compatibilidade com matrizes poliméricas e otimizar propriedades mecânicas, ópticas, hídrica e de barreira dos filmes;
- Desenvolver novas formulações de filmes com xilanas combinadas a outros biopolímeros (como quitosana, pectina e gelatina), visando melhorias nas propriedades mecânicas, de barreira e biodegradabilidade.
- Avaliar a estabilidade térmica, mecânica e funcional dos filmes em condições reais de armazenamento e uso, principalmente em aplicações alimentícias.
- Testar os filmes em embalagens reais de alimentos, para validação de suas propriedades como plastificantes e materiais biodegradáveis.
- Projetar o escalonamento da extração alcalinada das xilanas em reatores piloto, com análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental (AVTE) do processo.
- Projetar o escalonamento da aplicação das xilanas em embalagens de base sustentáveis em reatores piloto, com análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental (AVTE) do processo.
- Avaliar a biodegradação dos filmes em diferentes ambientes (solo, água doce, marinha e compostagem) e realizar análise do ciclo de vida (ACV) comparativa com materiais sintéticos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULHAMEED, Adamu; MBATHA MBUVI, Harun; CHANGAMU, Evans; MAINGI, Francis. Microwave synthesis of Carboxymethylcellulose (CMC) from Rice Husk. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/RD-of-carboxymethylcellulose_fig5_342165164. Acesso em: 5 out. 2025.

ABE, M. M.; BRANCIFORTI, M. C.; BRIENZO, M. Biodegradation of Hemicellulose-Cellulose-Starch-Based Bioplastics and Microbial Polyesters. **Recycling**, v. 6, n. 1, p. 22, mar. 2021.

ABENA, T.; SIMACHEW, A. A review on xylanase sources, classification, mode of action, fermentation processes, and applications as a promising biocatalyst. *BioTechnologia*, v. 105, n. 3, p. 273-285, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5114/bta.2024.141806>.

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Perfil das Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plásticos no Brasil – Perfil 2023. São Paulo: ABIPLAST, 2024. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/noticias/perfil-2023-industria-do-plastico-impulsiona-economia-brasileira-gerando-mais-de-370-mil-empregos/?utm_source=chatgpt.com

ANARADO, R. et al. Recent advances in xylo-oligosaccharides production and applications: A comprehensive review and bibliometric analysis. *Biotechnology Reports*, v. 47, e102608, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102608>.

ANDRADE, G. A. NETO; et al. Degradación de films de GX/CMC. *Revista Iberoamericana de Polímeros y Materiales*, v. 20, n. 2, p. 82–89, 2019. Disponível em: <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/05/2019-20-2-82-89-andrade-y-col.pdf>. Acesso em: 5 out. 2025.

ARAÚJO, B. A. et al. A aplicação de polímeros biodegradáveis como uma alternativa sustentável. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e49010918248–e49010918248, 31 jul. 2021.

ARZAMI, A. N.; HO, T. M.; MIKKONEN, K. S. Valorization of cereal by-product hemicelluloses: Fractionation and purity considerations. **Food Research International**, v. 151, p. 110818, 1 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15448-1: Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis – Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15448-2: Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis – Parte 2: Biodegradação e compostagem – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2023.

ASTM D6988-13. Standard Test Method for Film Thickness of Plastic Sheeting. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM D792-13. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

CHANNELL, G. A. et al. Use of the Extended Fujita method for representing the molecular weight and molecular weight distributions of native and processed oat beta-glucans. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 11809, 7 ago. 2018.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard Practice for Calculation of Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates*. ASTM D2244-16. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. Disponível em: <https://www.astm.org/d2244-16.html>. Acesso em: 4 out. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra of Absorbing Materials*. ASTM E1252-98(2018). West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018. Disponível em: <https://www.astm.org/e1252-98r18.html>. Acesso em: 4 out. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. ASTM D882-18. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018. Disponível em: <https://www.astm.org/d0882-18.html>. Acesso em: 4 out. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. ASTM D570-98. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1998. Disponível em: <https://www.astm.org/d0570-98.html>. Acesso em: 4 out. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. ASTM E96-95. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1996. Disponível em: <https://www.astm.org/e0096-95.html>. Acesso em: 4 out. 2025.

ATTA, A. M. et al. Development of carboxymethyl cellulose-based films incorporated with essential oils: structural, thermal and barrier properties. *Food Frontiers*, v. 3, n. 2, p. 200-215, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.342>

AUGUSTO, L.; BOČA, A. Tree functional traits, forest biomass, and tree species diversity interact with site properties to drive forest soil carbon. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 1097, 1 mar. 2022.

AVELINO, K. R. S. Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis à base de amido de milho. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/bitstream/prefix/2423/1/KelyReginadeSouzaAvelino.pdf>. Acesso em: 5 out. 2025.

AWASTHI, S. K. et al. A comprehensive review on recent advancements in biodegradation and sustainable management of biopolymers. **Environmental Pollution**, v. 307, p. 119600, 15 ago. 2022.

BALART, Rafael; ALONSO, M. V.; DURÁN, H. L.; et al. Biopolymers from natural resources. *Polymers*, Basel, v. 13, n. 15, p. 2532, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/15/2532>. Acesso em: 4 out. 2025.

BALKISSOON, S.; ANDREW, J.; SITHOLE, B. *Dissolving wood pulp production: a review. Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 13, n. 18, 2022. DOI: 10.1007/s13399-022-02442-z.

BANU, R. et al. Lignocellulosic biomass based biorefinery: A successful platform towards circular bioeconomy. **Fuel**, v. 302, p. 121086, 1 out. 2021.

BEALL, F. C. Pyrolysis of hardwood xylan: TGA analysis. *Wood and Fiber Science*, 1969. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/viewFile/714/714>. Acesso em: 5 out. 2025.

BOURAMDANE, M. et al. Impact of natural degradation on the aged lignocellulose fibers of Moroccan cedar softwood: structural elucidation by infrared spectroscopy (ATR-FTIR) and X-ray diffraction (XRD). *Fermentation*, Basel, v. 8, n. 12, p. 698, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation8120698>

BRACELL, **Bracell - Relatórios de sustentabilidade**. Bracell, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.bracell.com/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/>>. Acesso em: 23 jun. 2024

CABRERA, M. F. et al. Alkaline extraction and ethanol precipitation of high-molecular-weight xylan compounds from eucalyptus residues. *Polymers*, v. 17, n. 12, p. 1589, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17121589>.

CARÀ, Piera Demma et al. *Hemicellulose hydrolysis catalysed by solid acids*. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/ray-diffraction-pattern-of-xylan-from-beechwood_fig1_265865627. Acesso em: 5 out. 2025.

CHATURVEDI, T. et al. Developing Process Designs for Biorefineries—Definitions, Categories, and Unit Operations. **Energies**, v. 13, n. 6, p. 1493, jan. 2020.

CHEN, J. et al. Modification of xylan in alkaline treated bleached hardwood kraft pulps as classified by attenuated total-internal-reflection (ATR) FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, Oxford, v. 122, p. 392-400, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.074>

CONTERATTO, C. et al. Biorefinery: A comprehensive concept for the sociotechnical transition toward bioeconomy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 151, p. 111527, 1 nov. 2021.

DALLAEV, R. et al. Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact. *Polymers*, v. 17, n. 14, p. 1981, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17141981>.

DE JESUS, A. F. S. et al. Aspectos gerais sobre a indústria brasileira de polpa celulósica e papel General aspects about the brazilian industry of cellulose pulp and paper. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 6, p. 45984–45999, 2022.

DÍAZ, E. et al. *Assessment of the interactions between hemicellulose and kaolinite clay: Implications for lignocellulosic biomass utilization*. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 142, n. 6, p. 12299720, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.49720>

DIEZ, V. et al. B Corp certification: Why? How? and What for? A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, v. 332, p. 129933, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129933>.

DZIUBA, R.; KUCHARSKA, M.; MADEJ-KIEŁBIK, L.; SULAK, K.; WIŚNIEWSKA-WRONA, M. Biopolymers and biomaterials for special applications within the context of the circular economy. *Materials*, v. 14, n. 24, p. 7704, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247704>.

EMBRAPA. Relatório de avaliação dos impactos da solução tecnológica gerada pela Embrapa: *Eucalyptus benthamii* – tolerante a geadas severas. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em: https://bs.sede.embrapa.br/2022/relatorios/florestas_eucalyptus.pdf. Acesso em: 4 out. 2025.

EMIROGLU, Z. K. et al. Development of active packaging films based on carboxymethyl cellulose and essential oil: Evaluation of antimicrobial and optical properties. **Food Packaging and Shelf Life**, Amsterdam, v. 23, p. 100450, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100450>.

FAN, H. Kinetics of xylan pyrolysis with potassium and calcium catalysts. *Energy*, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221030656>. Acesso em: 5 out. 2025.

FANG, Z. et al. From lignocellulosic biomass to functional materials: A review on chemical composition and utilization. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 200, p. 106–114, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.017>.

FARIA, M.; GUIMARÃES, A.; DURAN, N. Integrated hemicellulose extraction and papermaking fiber production from agro-waste biomass. *Polymers*, Basel, v. 15, n. 23, art. 4597, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15234597>

FENGEL, D.; WEGENER, G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin: Walter de Gruyter, 1989.

FIEP – **Produção de celulose solúvel brasileira em expansão - Fiep - Boletins Setoriais - Florestal, celulose, papel e gráfica - Especial**. Disponível em: <<https://www.fiepr.org.br/boletins-setoriais/3/especial/>>. Acesso em: 23 jun. 2024.

FOELKEL, C. As Biorrefinarias Integradas no Setor Brasileiro de Fabricação de Celulose e Papel. [s.d.].

FONSECA, L. M. et al. Desenvolvimento de filmes biodegradáveis a partir de resíduos lignocelulósicos: propriedades mecânicas e potenciais aplicações. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 49, n. 9, p. e20180712, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180712>.

FREITAS, A. C. de et al. Filmes hidrossolúveis com aplicação potencial em sachês e embalagens de curta vida útil: desenvolvimento e caracterização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 27, n. 2, p. 134–140, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p134-140>.

FU, Y. et al. Specific lignin and cellulose depolymerization of sugarcane bagasse for maximum bioethanol production under optimal chemical fertilizer pretreatment with hemicellulose retention and liquid recycling. **Renewable Energy**, v. 200, p. 1371–1381, 1 nov. 2022.

FURTADO JUNIOR, L. S. Análise otimizada de alternativas de biorrefinarias para a produção de biocombustíveis e produtos químicos a partir de biomassa lignocelulósica. 2017. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1892/1/dissertacao_2017147.pdf. Acesso em: 2 out. 2025.

GAN, J. et al. Lignocellulosic Biomass-Based Carbon Dots: Synthesis Processes, Properties, and Applications. **Small**, v. 19, n. 48, p. 2304066, 2023.

GAO, Y. et al. Advances in extraction, purification, structural characteristics and biological activities of hemicelluloses: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 225, p. 467–483, 15 jan. 2023.

GAUTAM, D.; et al. *Hemicelluloses: A Review on Extraction and Modification for Various Applications*. *ResearchGate*, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/392978483_Hemicelluloses_A_Review_on_Extraction_and_Modification_for_Various_Applications. Acesso em: 5 out. 2025.

GERMANO, A. X. DOS S.; MELLO, J. A. V. B.; MOTTA, W. H. Contribuição das tecnologias da indústria 4.0 para a sustentabilidade: uma revisão sistemática. **Palavra Chave (La Plata)**, v. 11, n. 1, 2021.

GIOIA, C. et al. End of Life of Biodegradable Plastics: Composting versus Re/Upcycling. **ChemSusChem**, v. 14, n. 19, p. 4167–4175, 2021.

GOMES, R.; PEREIRA, F.; LIMA, A. Acessibilidade de xilanas em polpas de eucalipto branqueadas. *Holzforschung*, v. 74, n. 2, p. 123-132, 2020a. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/hf-2019-0023/html>. Acesso em: 14 set. 2025.

GOMES, T. M. P. et al. Xylan accessibility of bleached eucalypt pulp in alkaline solutions. *Holzforschung*, v. 74, n. 2, p. 141–148, 2020b. DOI: 10.1515/hf-2019-0027.

GONÇALVES, A. R. et al. Avaliação das propriedades ópticas de filmes biodegradáveis utilizando sistema CIELAB. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 28, n. 5, p. 442-448, 2018.

GONZÁLEZ-LÓPEZ, M. E. et al. Current trends in biopolymers for food packaging: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 7, p. 1225371, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1225371>.

BATALHA, L. S.; Silva, Deusanilde J. ; Soares N. F. F. ; ALMEIDA, J.M. ; Reis, E. L. ; Mendonça Neto, A. B. ; Damaceno, O. I. C. . EXTRAÇÃO DE XILANAS DE DIFERENTES BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS PARA PRODUÇÃO DE BIOFILMES. In: **49o Congresso Internacional e Exposição de Celulose e Papel ABTCP**, São Paulo – SP, 2016

HE, Y.; LI, J.; ZHANG, X.; et al. *Hemicellulose and unlocking potential for sustainable applications*. *Carbohydrate Polymers*, v. 290, p. 119604, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813024064651>. Acesso em: 5 out. 2025.

HOQUE, M.; et al. Investigating the characteristics of carboxymethyl cellulose film as a possible material for green packaging. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, v. 24, n. 3, p. 386–391, 2023. DOI: 10.30574/gscbps.2023.24.3.0386.

HOSSEINI, S. F. et al. Application of biodegradable edible films for packaging of hydrophilic compounds: A review on water sensitivity and solubility. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 124, p. 107281, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107281>.

HU, L. et al. Hemicellulose-Based Polymers Processing and Application. **American Journal of Plant Sciences**, v. 11, n. 12, p. 2066–2079, 3 dez. 2020.

HU, L. S.; WANG, Y.; LIU, Z.; ZHANG, L. Hemicellulose-Based Polymers: Processing and Application. *American Journal of Plant Sciences*, v. 11, p. 2070–2081, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1112146>.

HUANG, L. Z. et al. Recent developments and applications of hemicellulose in bioengineering and biotechnology. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 9, p. 690773, 2021. DOI: 10.3389/fbioe.2021.690773. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2021.690773/full>. Acesso em: 4 out. 2025.

HUANG, L. Z.; ZHANG, Y.; LIU, Y.; et al. *Recent developments and applications of hemicellulose*. *Frontiers in Chemistry*, v. 9, p. 759, 2021. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8258147/>. Acesso em: 5 out. 2025.

HUSSAIN, S. A.; et al. Biodegradable Food Packaging Films Using a Combination of Hemicellulose and Cellulose Derivatives. *Polymers*, v. 16, n. 22, p. 3171, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16223171>. Acesso em: 4 out. 2025.

HUSSAIN, S. A.; LI, J.; LIU, Y.; et al. *Biodegradable Food Packaging Films Using a Hemicellulose B. Polymers*, v. 16, n. 22, p. 3171, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/22/3171>. Acesso em: 5 out. 2025.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Mosaico Ibá: Produção de Celulose — Janeiro–Dezembro 2024. Brasília: Poder360, mar. 2025. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2025/03/Mosaico-Iba-producao-celulose-2024.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 1 set. 2025.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual 2024. Brasília: IBÁ, 2024. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2025/03/Mosaico-Iba-producao-celulose-2024.pdf>. Acesso em: 1 set. 2025.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório de avaliação do setor florestal brasileiro. Brasília, DF: IBÁ, 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-setor-florestal-2022.pdf>. Acesso em: 4 out. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 22412:2017 — Particle size analysis – Dynamic light scattering (DLS)*. Geneva: ISO, 2017.

JAVIER-ASTETE, R. et al. *Determination of Hemicellulose, Cellulose, Holocellulose, and Lignin in Forest Species by FTIR-ATR Spectroscopy*. PLOS ONE, v. 16, n. 7, p. e0256559, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256559>

JHA, Swarn; AKULA, Bhargav; ENYIOMA, Hannah; NOVAK, Megan; AMIN, Vansh; LIANG, Hong. Biodegradable biobased polymers: a review of the state of the art, challenges, and future directions. *Polymers*, v. 16, n. 16, p. 2262, 2024. DOI: 10.3390/polym16162262.

JIN, X. et al. Promoting the material properties of xylan-type hemicelluloses from the extraction step. *Carbohydrate Polymers*, v. 215, p. 235–245, 1 jul. 2019.

KABIR, Ehsanul; KAUR, Rajnish; LEE, Jechan; et al. Prospects of biopolymer technology as an alternative option for non-degradable plastics and sustainable management of plastic

wastes. *Journal of Cleaner Production*, v. 258, p. 120536, 10 jun. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120536. KÄRKKÄINEN, E. Industrial production of different prehydrolysis kraft dissolving pulp grades. 18 maio 2021.

KEYES, Anthony; SAFFRON, Christopher M.; MANJURE, Shilpa; NARAYAN, Ramani. Biobased compostable plastics end-of-life: environmental assessment including carbon footprint and microplastic impacts. *Polymers*, Basel, v. 16, n. 21, p. 3073, Out. 2024.

KIM, Chae Hoon; LEE, Joo; PARK, Sunkyu. Alkaline extraction and characterization of residual hemicellulose in dissolving pulp. *Cellulose*, v. 26, p. 1323–1333, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-018-2137-0>. Acesso em: 23 jun. 2024.

KOSTRYUKOV, S. G. et al. *Determination of Lignin, Cellulose, and Hemicellulose in Plant Materials by FTIR Spectroscopy*. *Journal of Analytical Chemistry*, v. 78, n. 6, p. 718–727, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061934823040093>

LD CELULOSE – **Produtos**. Disponível em: <<https://ldcelulose.com.br/nossos-produtos>>. Acesso em: 23 jun. 2024.

LI, X. et al. *Quantitative visualization of lignocellulose components in bamboo using FTIR and multivariate analysis*. *Biotechnology for Biofuels*, v. 11, n. 1, p. 1–10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1251-4>

LIU, G.; SHI, K.; SUN, H. Research progress in hemicellulose-based nanocomposite film as food packaging. *Polymers*, v. 15, n. 4, p. 979, 2023a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/4/979>. Acesso em: 14 maio 2025.

LIU, Xinxin et al. Hemicellulose from plant biomass in medical and pharmaceutical application: A critical review. **Current medicinal chemistry**, v. 26, n. 14, p. 2430-2455, 2019b.

LU, Y. et al. Extraction and modification of hemicellulose from lignocellulosic biomass: A review. *Green Processing and Synthesis*, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1515/gps-2021-0065>.

LU, Y. Extraction and modification of hemicellulose from lignocellulosic biomass. *Green Processing and Synthesis*, v. 10, p. 55–70, 2021. DOI: 10.1515/gps-2021-0040.

LUCENA, A.; RODRIGUEZ, A.; GARCÍA, M.; et al. *Hemicellulose/PVA-based bioactive films for food packaging*. *Carbohydrate Polymers*, v. 250, p. 117-126, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813025035342>. Acesso em: 5 out. 2025.

LV, P.; ALMEIDA, G.; PERRÉ, P. TGA–FTIR analysis of torrefaction of lignocellulosic components: cellulose, xylan, lignin in isothermal conditions over a wide range of time durations. *Bioresources*, 2015. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/tga-ftir-analysis-of-torrefaction-of-lignocellulosic-components-cellulose-xylan-lignin-in-isothermal-conditions-over-a-wide-range-of-time-durations/>. Acesso em: 5 out. 2025.

MACEDO, J. V. C. et al. Hemicellulose Application for the Production of Bioplastics and Biomaterials. Em: BRIENZO, M. (Ed.). **Hemicellulose Biorefinery: A Sustainable Solution for Value Addition to Bio-Based Products and Bioenergy**. Singapore: Springer Nature, 2022. p. 231–273.

MAGALHÃES JR, Antonio Irineudo et al. Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 13, n. 6, p. 1505-1519, 2019.

MAMO, G. Alkaline Active Hemicellulases. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, v. 172, p. 245–291, 2020. DOI: 10.1007/10_2019_101

MARTÍN, M.; et al. Lignocellulosic biomass-based materials: Design, fabrication, and applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 11, p. 1188168, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2023.1188168/full>. Acesso em: 4 out. 2025.

MARTÍNEZ, M. G. Thermal degradation mechanisms of cellulose, hemicelluloses and lignin during torrefaction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669021011158>. Acesso em: 5 out. 2025.

MATOS, J. M. S.; EVANGELISTA, J. A.; SOUSA, A. P. M.; CARVALHO, M. G. V. S. *Effect of xylanase-assisted treatment of oxygen-delignified eucalypt kraft pulp on ECF bleaching*. *Forests*, v. 14, n. 2, p. 396, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14020396>.

MAZZARINO, L. Nanostructured systems coated with chitosan for buccal curcumin delivery. 24 abr. 2013.

MEHMOOD, A. et al. The current status and market trend of polylactic acid as biopolymer: Awareness and needs for sustainable development. *Materials Today: Proceedings*, 2nd International Conference on Sustainable Materials, Manufacturing and Renewable Technologies 2022, v. 72, p. 3049–3055, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.387>.

MELATI, R. B. et al. Xylan solubilization from partially delignified biomass, and residual lignin removal from solubilized xylan. *Polysaccharides*, v. 4, n. 2, p. 176-188, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides4020013>.

MENDES, Gisella. **Análise termogravimétrica de filmes à base de CMC incorporados com glicerol, xilanas marrom, pré-deslignificada e branqueada**. 2017b. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/30767/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Mestrado%20-%20Gisella-%20Final.pdf>. Acesso em: 3 set. 2025.

MENDES, I. S. F.; PRATES, A.; EVTUGUIN, D. V. Production of rayon fibres from cellulosic pulps: State of the art and current developments. *Carbohydrate Polymers*, v. 273, p. 118466, 1 dez. 2021b.

MENDES, J. F. et al. Active films based on starch and natural extracts: Preparation and application in food packaging. *Food Hydrocolloids*, Amsterdam, v. 125, p. 107265, 2022c. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107265>.

MIKI, K. et al. Methylation-triggered fractionation of lignocellulosic biomass to afford cellulose-, hemicellulose-, and lignin-based functional polymers via click chemistry. *Green Chemistry*, v. 22, n. 9, p. 2909–2928, 11 maio 2020.

MON, Maria Laura; MARRERO DÍAZ DE VILLEGAS, Rubén; CAMPOS, Eleonora; SORIA, Marcelo A.; TALIA, Paola M. *Characterization of a novel GH10 alkali-thermostable xylanase from a termite microbiome*. *Bioresources and Bioprocessing*, v. 9, p. 84, 2022. Disponível em: <https://bioresourcesbioprocessing.springeropen.com/articles/10.1186/s40643-022-00572-w>. Acesso em: 5 out. 2025.

MONTEIRO, M. A. et al. Avaliação das propriedades físico-hídricas de filmes biodegradáveis de CMC com xilanas de diferentes fontes. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 33, n. 1, p. e20230014, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20230014>.

MUJTABA, M. et al. Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, v. 402, 136815, 2023.

NANDA, Sonil et al. Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: A review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 20, n. 1, p. 379-395, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01334-4>.

NECHITA, P.; et al. Green Approaches on Modification of Xylan Hemicellulose to Enhance the Functional Properties for Food Packaging Materials—A Review. *Polymers*, v. 15, n. 9, p. 2088, 2023b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/9/2088>. Acesso em: 4 out. 2025.

NECHITA, P.; IANA-ROMAN, M.; NĂSTAC, S.-M. Acetylated Xylan as Renewable Feedstock for Biodegradable Food Packaging: Synthesis, Structural Characterization and Performance Evaluation. *Polysaccharides*, v. 6, n. 3, p. 85, 2025a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4176/6/3/85>. Acesso em: 5 out. 2025.

NECHITA, P.; ROMAN, M.; CIOLACU, F. Xylan Hemicellulose: A Renewable Material with Potential Applications in Food Packaging. *Sustainability*, v. 13, n. 24, p. 13504, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/24/13504>. Acesso em: 5 out. 2025.

NGENE, G. I.; ROUX, J.-C.; LACHENAL, D. Xylan extraction strategies and the performance of the resulting high purity cellulose fiber to swelling and dissolution. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 3, p. 100196, 1 jun. 2022.

NISHIMURA, H.; KAMIYA, A.; NAGATA, T. et al. Evidência direta da ligação α -éter entre lignina e carboidratos nas paredes celulares da madeira. *Scientific Reports*, v. 8, p. 6538, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24328-9>.

OKOLIE, J. A. et al. Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 5, p. 2145–2169, 1 maio 2021.

OTTAH, V. E.; et al. *Comparative analysis of alkaline-extracted hemicelluloses from cocoa pod husk*. Heliyon, v. 8, n. 1, e10002, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844022010027>. Acesso em: 5 out. 2025.

PALASINGH, C.; et al. Polysaccharide thin film studies: Adsorption and interactions of xylan on cellulose films. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 180, p. 753–759, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.002>. Acesso em: 5 out. 2025.

PEI, Fuyun; LIU, Lijuan; ZHU, Huie; GUO, Haixin. Recent advances in lignocellulose-based monomers and their polymerization. *Polymers*, Basel; v. 15, n. 4, p. 829, 7 fev. 2023. DOI: 10.3390/polym15040829.

PEREIRA, M. J.; et al. *Sugarcane Straw Hemicellulose Extraction by Autohydrolysis*. *PMC*, 2025. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11945048/>. Acesso em: 5 out. 2025.

PEREIRA, P. H. F. et al. Polysaccharide-based films incorporated with lignocellulosic components: Effects on structural and functional properties. *Carbohydrate Polymers*, v. 297, 120016, 2022.

PEREIRA, R. C. et al. Physicochemical and morphological properties of cellulose-based films with xylan fractions. *Industrial Crops and Products*, v. 203, p. 117177, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117177>

PÉREZ-ALMADA, D.; et al. Integrated techno-economic and environmental assessment of biorefineries: A decade of research. *Sustainable Energy & Fuels*, v. 7, n. 1, p. 1–22, 2023. DOI: 10.1039/D3SE00405H

PIRES, R.; PEDROSA, S.; RIBEIRO, A. B.; MADUREIRA, A. R. *Development of Cosmetic Formulations Based on Hemicellulose from Sugarcane Bagasse*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica Portuguesa, Porto, Portugal, 2022. Disponível em: <https://ciencia.ucp.pt/en/studentTheses/development-of-cosmetic-formulations-based-on-hemicellulose-from->. Acesso em: 5 out. 2025.

PMID: 31372682. MARTÍNEZ, Á. T.; RAMÍREZ, J. Advances in understanding hemicellulose structure and its impact on biopolymer applications. *Polymers*, v. 14, n. 9, p. 1892, 2022. DOI: 10.3390/polym14091892.

POLONI, C. A. Utilização de Xilanas no fabrico de filmes/revestimentos para embalagens biodegradáveis. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifrs.edu.br/bitstream/handle/123456789/1203/1234567891203.pdf?isAllowed=y&sequence=1>. Acesso em: 5 out. 2025.

PRATES, B. G., ALTERNATIVAS DE SECAGEM E REDISPERSÃO DE NANOCRISTAIS DE CELULOSE E AVALIAÇÃO DE SUA APLICAÇÃO EM MATRIZES POLIMÉRICAS. **Locus UFV**, 2022.

QASEEM, M. F.; SHAHEEN, H.; WU, A.-M. Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110996, 1 jul. 2021.

QUEIRÓS, L. C. et al. Development of carboxymethyl xylan films with functional properties to produce edible films. *Carbohydrate Polymers*, v. 157, p. 107–114, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28242898/>. Acesso em: 4 out. 2025.

QUONIAN, L.; SOUZA-LIMA, J. E. DE; MOSER, M. P. MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE. **Relações Internacionais no Mundo Atual**, v. 1, n. 22, p. 142–160, 24 abr. 2020.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 4 out. 2025.

RAMOS JÚNIOR, Nivaldo. *Desenvolvimento e caracterização de filmes de alginato de sódio modificados com ureia e reticulados com cálcio*. Joinville: Universidade da Região de Joinville, 2022. Disponível em: https://www.univille.edu.br/account/mep/VirtualDisk.html/downloadDirect/3966953/Nivaldo_Ramos_Junior.pdf. Acesso em: 5 out. 2025.

RATHOUR, R. K. et al. Non-food crops derived lignocellulose biorefinery for sustainable production of biomaterials, biochemicals and bioenergy: A review on trends and techniques. **Industrial Crops and Products**, v. 204, p. 117220, 15 nov. 2023.

RAWASHDEH, Nathir; HAZAVEH, Paniz; ALTARAZI, Safwan. Vision-based online defect detection of polymeric film via structural quality metrics. *Management and Production Engineering Review*, v. 14, n. 1, p. 61–71, mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.24425/mper.2023.145366>. RAZALI, Nur Amirah Mamat et al.

Comparative study on extraction of cellulose fiber from rice straw waste from chemo-mechanical and pulping method. **Polymers**, v. 14, n. 3, p. 387, 2022.

RIBEIRO NETO, M. et al. Optimization of alkaline extraction of hemicelluloses from eucalyptus pulp. *Industrial Crops and Products*, v. 152, p. 112510, 2020.

RODRIGUES, F. H.; LIMA, M. A. R. Influence of hemicellulose type on the water vapor barrier of biodegradable films. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 137, n. 14, 48765, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.48765>. Acesso em: 5 out. 2025.

RUIZ, H. A. et al. Sustainable Biorefinery Processing for Hemicellulose Fractionation and Bio-based Products in a Circular Bioeconomy. Em: BRIENZO, M. (Ed.). **Hemicellulose Biorefinery: A Sustainable Solution for Value Addition to Bio-Based Products and Bioenergy**. Singapore: Springer Nature, 2022. p. 39–69.

RULLIFANK, K. F. et al. Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 845, n. 1, p. 012005, maio 2020.

RULLIFANK, M. et al. Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 845, p. 012005, maio 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/845/1/012005>.

SANTOS, Caroline Castro. Desenvolvimento de filmes poliméricos com cristais dosimétricos. Universidade Federal de Sergipe, 2018. Disponível em: https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/10738/2/CAROLINE_CASTRO_SANTOS.pdf

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, v. 30, n. 3, p. 507–512, 1974. DOI: 10.2307/2529204. Acesso em: 4 out. 2025.

SEGAL, LGJMA et al. **An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer - L. Segal, J.J. Creely, A.E. Martin, C.M. Conrad, 1959.** Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/004051755902901003>>. Acesso em: 23 jun. 2024.

SEYDİBEYOĞLU, M. Ö. Review on hybrid reinforced polymer matrix composites with nanocellulose, nanomaterials, and other fibers. *Polymers*, [S.l.], v. 15, n. 4, p. 984, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15040984>.

SHAO, H. et al. Facile and green preparation of hemicellulose-based film with elevated hydrophobicity via cross-linking with citric acid. **RSC Advances**, v. 9, n. 5, p. 2395–2401, [s.d.].

SHEN, D. Thermal decomposition of xylan-based hemicellulose: TGA study. *Carbohydrate Polymers*, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861715002805>. Acesso em: 5 out. 2025.

SHIN, K.; LEE, H. Propriedades das xilanas na polpa de eucalipto. *Eucalyptus Technical Reports*, 2003. Disponível em: <<https://www.eucalyptus.com.br/icep03/100Shin.text.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2025.

SIKORA, A.; HÁJKOVÁ, K.; JURČYKOVÁ, T. Degradation of Chemical Components of Thermally Modified *Robinia pseudoacacia* L. Wood and Its Effect on the Change in Mechanical Properties. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 24, p. 15652, jan. 2022.

SILVA, D. A.; SANTOS, R. M.; OLIVEIRA, J. V. Effect of plasticizers on the water vapor permeability of polysaccharide-based films. *Carbohydrate Polymers*, v. 245, 116524, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116524>. Acesso em: 5 out. 2025.

SILVA, D. J., D'ALMEIDA, M.L.O., KOGA, M.T., Nanocristais de celulose fibra branqueada de eucalipto. **44o Congresso Internacional ABTCP**, 2011a.

SILVA, F. A. G. et al. Physical, optical, and barrier properties of carboxymethyl cellulose films reinforced with hemicellulose and lignin. *Carbohydrate Polymers*, v. 314, p. 120963, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120963>

SILVA, J. L. da et al. Estrutura e propriedades de filmes biodegradáveis de carboximetilcelulose com adição de plastificantes. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. e12345, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.12345>.

SILVA, R. S.; TEIXEIRA, A. F.; MOTA, T. R.; SALVADOR, V. H.; MOREIRA-VILAR, F. C. Ácido ferúlico: um componente chave na recalcitrância da lignocelulose de gramíneas

à hidrólise. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 28, n. 3, p. 222–229, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2223>

SILVA, R. T. da et al. Influência de plastificantes nas propriedades mecânicas e estruturais de filmes biodegradáveis de carboximetilcelulose. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 30, n. 1, p. e2020016, 2020c. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.09919>.

SILVA, V. T. F. et al. Xylanase-solubilized GAX presents high heterogeneity and polydispersity, as well as small amounts of residual lignin contamination. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 10, p. 940712, 2022c. DOI: 10.3389/fbioe.2022.940712.

SINGH, N. et al. Global status of lignocellulosic biorefinery: Challenges and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 344, p. 126415, 1 jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126415>. Acesso em: 5 out. 2025.

SMITH, P. J.; JONES, R. S.; WANG, Y.; TAN, L. Enzymatic synthesis of xylan microparticles with tunable crystallinity. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 8, n. 15, p. 5910–5920, 2020.

SONG, F.; LI, Z.; LI, J.; LI, L.; ZHANG, Y.; LIU, Y.; LI, H.; LIU, J.; LI, Z. The effect of xylanase on the fine structure of a bleached kraft pulp and its impact on brightness and yield during ECF bleaching. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, v. 39, n. 1, p. 92-101, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1515/npprj-2024-0092>.

SOUSA, R. A. DE et al. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS FILMES DE POLISSACARÍDEOS. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 8, p. 1243–1249, 2 out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18540/jcecvl3iss8pp1243-1249>. Acesso em: 5 out. 2025.

SUKUMARAN, N. P.; GOPI, S. Overview of biopolymers: resources, demands, sustainability, and life cycle assessment modeling and simulation. In: THOMAS, S.; GOPI, S.; AMALRAJ, A. (Eds.). *Biopolymers and their Industrial Applications*. [s.l.]: Elsevier, 2021. p. 1–19. DOI: 10.1016/B978-0-12-819240-5.00001-8. SUN, J. et al. Tailoring mechanical and barrier properties of polysaccharide films through hydrogen bonding interactions: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 229, p. 197-210, 2023.

SURYANTO, H. et al. Carboxymethyl cellulose films derived from pineapple waste: fabrication and properties. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, v. 1, n. 1, p. 45-54, 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/388036299>. Acesso em: 2 set. 2025.

SUZANO S.A, **Relatório de sustentabilidade**, <https://centraldesustentabilidade.suzano.com.br/relatorios/Relat%C3%B3rio%20de%20Sustentabilidade%20Suzano%202022.pdf>, 2022

TAN, E. C. D.; LAMERS, P. Circular Bioeconomy Concepts—A Perspective. **Frontiers in Sustainability**, v. 2, 12 jul. 2021.

TANG, N.; et al. *Potential Applications of Hemicellulose*. *ResearchGate*, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/374136284_Potential_Applications_of_Hemicellulose. Acesso em: 5 out. 2025.

TAPPI. T 203 cm-99: Standard Method for Solvent Extractives of Wood and Pulp. Peachtree Corners, GA: Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1999.

TAPPI. T 412 om-06: Standard Test Method for Water in Pulp, Paper, and Paperboard. Peachtree Corners, GA: Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2006.

TEIXEIRA, C. E. F.; REBECHI, I. A.; FONTANELI, R. S. Digital micrometer used in thickness measurement of plastic film compared to standardized instrument. *Materials Sciences and Applications*, [S.l.], v. 8, n. 7, p. 577–583, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4236/msa.2017.87040>..

TERMOBLOG. Produção de Celulose e Sistema Kraft. Disponível em: <https://termoblog.com.br/producao-de-celulose-e-sistema-kraft/>. Acesso em: 01 out. 2025. TAN, Eric C. D.; LAMERS, Patrick. Circular Bioeconomy Concepts—A Perspective. *Frontiers in Sustainability*, v. 2, art. 701509, 2021. DOI: 10.3389/frsus.2021.701509.

TODOROVIC, T. et al. A fully bio-based wood adhesive valorising hemicellulose-rich sidestreams from the pulp industry. **Green Chemistry**, v. 23, n. 9, p. 3322–3333, 2021.

TOVAR, Omar. Evaluación de un material lignocelulósico para la producción de celulasas, xilanasas y lacasas por basidiomicetos del noreste de México. 2013. Tese (Mestrado em Ciências) — Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León,

Monterrey, México. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3322.8324>. Acesso em: 4 out. 2025.

TRISMAWATI, T.; WIKANAJI, D.; MARLINA, E.; PRASETYO, S. D.; BANGUN, W. B.; ARIFIN, Z. *Enhancement of pulp brightness and yield in ECF bleaching using xylanase treatment: a comparative study on different wood species. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, v. 19, n. 3, p. 899-906, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijdne.190319>.

VENA, P. F.; GARCÍA-APARICIO, M. P.; BRIENZO, M.; GÖRGENS, J. F.; RYPSTRA, T. Effect of alkaline hemicellulose extraction on kraft pulp fibers from *Eucalyptus grandis*. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, v. 33, n. 3, p. 157–173, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773813.2013.773040>.

WANG, L.; ZHOU, Y.; LIU, J.; HU, X. Functional films based on hemicelluloses: mechanical properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 234, p. 123893, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123893>. Acesso em: 14 maio 2025.

VIDAL, A. C. F. O renascimento de um mercado: o setor de celulose solúvel. [s.d.].

WANG, X.; LI, Y.; ZHOU, J.; ZHU, J. Highly stable Pickering emulsions with xylan hydrate crystals: relationship between crystallinity and emulsifying properties. *Carbohydrate Polymers*, v. 255, p. 117489, 2021.

WAQAR, I.; et al. *A Study of Pharmaceutical Applications of Hemicelluloses. International Journal of Polymer Science*, v. 2025, p. 1–10, 2025. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/ijps/8826323>. Acesso em: 5 out. 2025.

WEERASOORIYA, P. R. D.; et al. Exploring the properties of hemicellulose based carboxymethyl cellulose film as a potential green packaging. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, v. 1–2, p. 20–28, 1 fev. 2020. DOI: 10.1016/j.crgsc.2020.05.001. XIANG, Z. et al. Fabrications and applications of hemicellulose-based bio-adsorbents. **Carbohydrate Polymers**, v. 278, p. 118945, 15 fev. 2022.

XIE, Yitong et al. Efficient extraction and structural characterization of hemicellulose from sugarcane bagasse pith. **Polymers**, v. 12, n. 3, p. 608, 2020.

YAN, J. et al. Characterizing Variability in Lignocellulosic Biomass: A Review. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 22, p. 8059–8085, 8 jun. 2020.

YANG, Y. C. et al. Fabrication of antimicrobial composite films based on xylan and hydroxyethyl cellulose. *Carbohydrate Polymers*, v. 211, p. 1–8, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31071408/>. Acesso em: 4 out. 2025.

YOSHIMI, Yoshihisa; TRYFONA, Theodora; DUPREE, Paul. Structure, modification pattern, and conformation of hemicellulose in plant biomass. *Journal of Applied Glycoscience*, v. 72, n. 1, p. 7201301, 2025. DOI: 10.5458/jag.7201301.

YUAN, Q.; LIU, S.; MA, M.-G.; JI, X.-X.; CHOI, S.-E.; SI, C. The kinetics studies on hydrolysis of hemicellulose. *Frontiers in Chemistry*, v. 9, artigo 781291, 2021. DOI: 10.3389/fchem.2021.781291.

ZHANG, J. et al. High value-added monomer chemicals and functional bio-based materials derived from polymeric components of lignocellulose by organosolv fractionation. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, n. 2, p. 371–401, 2020b.

ZHANG, L. et al. Preparation and characterization of carboxymethyl cellulose/xylan composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 207, p. 305–314, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.089>

ZHANG, L. et al. Structure-property relationship of hemicellulose-based films: Effect of molecular weight and hydroxyl groups. *Polymer Testing*, v. 121, 108088, 2023.

ZHANG, M.; CHEN, X.; LIU, Y.; LI, J.; ZHOU, H. Reducing the heterogeneity of xylan through processing. *Bioresources*, v. 11, n. 3, p. 3088–3102, 2016c. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/reducing-the-heterogeneity-of-xylan-through-processing/>. Acesso em: 5 out. 2025.

ZHANG, Xun; LI, Li; XU, Feng. Chemical characteristics of wood cell wall with an emphasis on ultrastructure: A mini-review. **Forests**, v. 13, n. 3, p. 439, 2022.a

ZHANG, Y. et al. Effect of hemicellulose and glycerol on the water sensitivity and barrier properties of biodegradable films. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 287, p. 119350, 2022d. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119350>.

ZHANG, Y. et al. Optical and mechanical properties of xylan-based films reinforced with lignin nanoparticles. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 155, p. 112785, 2020c. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112785>.

ZHANG, Y. et al. Preparation and characterization of carboxymethyl cellulose films with Chinese fir essential oil. *Coatings*, v. 12, n. 97, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12010097>

ZHANG, Z. et al. Research progress of novel bio-based plasticizers and their applications in poly(vinyl chloride). **Journal of Materials Science**, v. 56, n. 17, p. 10155–10182, 1 jun. 2021.

ZHAO, Y. et al. Effects of xylan and glycerol on the physicochemical properties of cellulose-based films. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 266, p. 118119, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118119>.

ZHAO, Y.; LI, J.; LIU, Y.; et al. *Hemicellulose-Based Film: Potential Green Films for Food Packaging*. *Polymers*, v. 12, n. 8, p. 1775, 2020c. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343559348_Hemicellulose-Based_Film_Potential_Green_Films_for_Food_Packaging. Acesso em: 5 out. 2025.

ZHAO, Y.; ZHANG, L.; WANG, X.; et al. Hemicellulose-based film: Potential green films for food packaging. *Polymers*, v. 12, n. 8, p. 1775, 2020b. DOI: 10.3390/polym12081775.

ZHAO, Y.; ZHANG, X.; CHEN, X. Structural characterization and thermal properties of xylan extracted from eucalyptus wood using alkaline extraction. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 224, p. 1102–1110, 2023b. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.02.104.

ZHU, Y. et al. Revisiting Alkaline Pretreatment of Lignocellulose: Understanding the Structural Evolution of Three Components. **Advanced Sustainable Systems**, v. 4, n. 10, p. 2000067, 2020.