

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS**



TESE DE DOUTORADO

**BIPOLÍMEROS DE MACROALGAS: EXTRAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E
APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL NA ÁREA DA RESTAURAÇÃO DE PINTURAS**

LUIZA RIBEIRO SANTANA

PELOTAS, 2025

Luiza Ribeiro Santana

**Biopolímeros de Macroalgas: Extração, Caracterização e Aplicação
Sustentável na Área da Restauração De Pinturas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Neftali Lenin Villarreal Carreño

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

S231b Santana, Luiza Ribeiro

Biopolímeros de macroalgas [recurso eletrônico] : extração, caracterização e aplicação sustentável na área da restauração de pinturas / Luiza Ribeiro Santana ; Neftali Lenin Villarreal Carreño, orientador. — Pelotas, 2025.

97 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. Enchente. 2. Limpeza. 3. Restauração. 4. Biopolímeros. I. Carreño, Neftali Lenin Villarreal, orient. II. Título.

CDD 620.11063

Elaborada por Simone Godinho Maisonave CRB: 10/1733

Luiza Ribeiro Santana

**Biopolímeros de Macroalgas: Extração, Caracterização e Aplicação
Sustentável na Área da Restauração De Pinturas**

Tese apresentada, como requisito parcial, para a obtenção do grau de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 03 /11/ 25

Banca examinadora

Prof. Dr. Neftali Lenin Villarreal Carreño (Orientador)

Doutor em Química pela Universidade Federal de São Carlos

Prof^a. Dra. Andréa Lacerda Bachettini

Doutora em Memória Social e Patrimônio Cultural pela Universidade Federal de Pelotas

Prof^a. Dra. Elessandra da Rosa Zavareze

Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos pela Universidade Federal do Rio Grande

Dr. Guilherme Kurz Maron

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo incentivo aos estudos desde a infância.

À minha mãe, por cada palavra usada para me tranquilizar e me motivar.

À minha tia Nanci Ribeiro (*in memoriam*), por me inserir ainda na infância na área do patrimônio cultural, o que fez toda a diferença nas minhas escolhas acadêmicas.

Ao meu namorado Vinicius, à minha sogra Anaurelina e ao meu sogro Sérgio (*in memoriam*), por sempre acreditarem que eu seria capaz de concluir este trabalho.

Ao meu orientador, professor Neftali Carreño, pela amizade, por cada conversa e conselho, e por sempre incentivar o grupo a crescer e enfrentar os desafios. Muito obrigada pela orientação ao longo desses onze anos.

Aos meus colegas do Novonano, tudo se torna mais leve quando estamos bem acompanhados. Obrigada por todos esses anos de boa convivência no laboratório.

Aos meus professores e colegas do curso de Conservação e Restauração da UFPel, obrigada por torcerem por mim.

À Keli Scolari, pelas longas conversas, pela amizade e pelo incentivo para encerrar este ciclo.

À professora Andréa Bachettini, pela orientação na área da pintura, pela amizade, paciência e por cada ensinamento compartilhado.

Resumo

SANTANA, Luiza Ribeiro. “**Biopolímeros de Macroalgas: Extração, Caracterização e Aplicação Sustentável na Área da Restauração De Pinturas**”. 97f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

Os bens culturais inevitavelmente sofrem com processos de degradação. Além disso, estão sujeitos a inúmeros riscos relacionados aos desastres ambientais. Na última década, pesquisas envolvendo géis e hidrogéis em limpeza de pinturas foram intensificadas, principalmente com a utilização de biopolímeros. Os biopolímeros de macroalgas são um recurso interessante, pois possibilitam ampla modificação química e utilização. Neste trabalho, alginato e celulose foram extraídos da macroalga *Lessonia Flavicans* com bons rendimentos, 12% e 14% respectivamente. Os materiais obtidos foram caracterizados química e morfológicamente através de análises de DRX, FTIR, RMN, MEV e TG, além disso o alginato foi caracterizado por espectroscopia de UV-VIS e medidas reológicas foram realizadas através do viscosímetro. Em todas as análises foram obtidos resultados muito semelhantes aos padrões comerciais. Foram realizados testes de aplicação em uma obra do acervo de pinturas do MARGS, atingida pela enchente em maio de 2024. A pintura testada é de autoria do artista Ado Malagoli. A fim de avaliar a eficácia do surfactante na limpeza, foram desenvolvidas seis diferentes formulações com os biopolímeros em hidrogéis, com o Tween 80 e o TTA como surfactantes. Destas formulações, todas com o Tween 80 mostraram-se eficazes, sendo ele como único surfactante ou combinado com o TTA. Esta pesquisa é atual e promissora na área da limpeza de pinturas, principalmente quando envolve a necessidade de controle de umidade e atrito em camadas pictóricas mais fragilizadas.

Palavras-chave: enchente; limpeza; restauração; biopolímeros

Abstract

SANTANA, Luiza Ribeiro. "Macroalgae Biopolymers: Extraction, Characterization and Sustainable Application in the Area of Painting Restoration". 97f. Thesis – Postgraduate Program in Materials Science and Engineering. Federal University of Pelotas, Pelotas, 2025.

Cultural artifacts inevitably suffer from degradation processes. Furthermore, they are subject to numerous risks related to environmental disasters. In the last decade, research involving gels and hydrogels in painting cleaning has intensified, mainly with the use of biopolymers. Macroalgae biopolymers are an interesting resource because they allow for extensive chemical modification and application. In this work, alginate and cellulose were extracted from the macroalga *Lessonia Flavicans* with good yields, 12% and 14% respectively. The obtained materials were chemically and morphologically characterized through XRD, FTIR, NMR, SEM, and TG analyses. In addition, the alginate was characterized by UV-VIS spectroscopy, and rheological measurements were performed using a viscometer. In all analyses, results very similar to commercial standards were obtained. Application tests were carried out on a work from the MARGS painting collection, damaged by the flood in May 2024. The tested painting is by the artist Ado Malagoli. In order to evaluate the effectiveness of the surfactant in cleaning, six different formulations were developed with biopolymers in hydrogels, using Tween 80 and TTA as surfactants. Of these formulations, all those with Tween 80 proved effective, either as the sole surfactant or in combination with TTA. This research is current and promising in the area of paint cleaning, especially when it involves the need to control moisture and friction in more fragile paint layers.

Keywords: flood; cleaning; restoration; biopolymers

Lista de Figuras

Figura 1 Os três principais grupos de macroalgas: (a) filo <i>Chlorophyta</i> — algas verdes; (b) filo <i>Rhodophyta</i> — algas vermelhas; (c) filo <i>Ochrophyta</i> , classe <i>Phaeophyceae</i> — algas marrons.....	17
Figura 2 Exemplos de morfologia de <i>Lessonia</i> : a) <i>L. flavigans</i> ; b) <i>L. trabeculata</i> ; c) <i>L. variegata</i> ; d) <i>L. corrugata</i> ; e) <i>L. berteroana</i> ; f) <i>L. spicata</i>	19
Figura 3 Ilustração da molécula de celulose.....	21
Figura 4 Ilustração de uma fibra e esquema para a compreensão das regiões amorfas e cristalinas que a compõe.....	21
Figura 5 Esquema mostrando a composição interna de fibras de celulose.....	22
Figura 6 Estrutura química dos polissacarídeos (a) ácido β -D-manurônico (b) ácido α -L-gulurônico, (c) conformação dos blocos M e G do alginato.....	24
Figura 7 Esquema do processo de extração do alginato.....	38
Figura 8 Esquema do processo de extração de celulose.....	39
Figura 9 Esquema do processo de preparação dos hidrogéis.....	40
Figura 10 Foto da obra “A Capela” de Ado Malagoli.....	42
Figura 11a Mapa de danos.....	43
Figura 11b Legenda do Mapa de danos.....	43
Figura 12 Resultados obtidos nas análises de EDX com as amostras a) biomassa <i>L. Flavicans</i> , b) alginato comercial e em c) alginato extraído.....	48
Figura 13 Difratograma do alginato comercial e do extraído da <i>L. Flavicans</i>	49
Figura 14 Difratograma da celulose comercial e da extraída da <i>L. Flavicans</i>	51

Figura 15	Imagen de microscopia da biomassa de algas.....	52
Figura 16	Imagen de microscopia da celulose extraída da <i>L. Flavicans</i>	53
Figura 17	Microscopia eletrônica de varredura do hidrogel de celulose e alginato da <i>L. Flavicans</i>	53
Figura 18	Imagen de FEG da celulose extraída da <i>L. Flavicans</i>	54
Figura 19	Imagen de FEG, mais aproximada da celulose extraída da <i>L. Flavicans</i>	55
Figura 20	Espectro de infravermelho do alginato.....	57
Figura 21	Espectro de infravermelho da celulose.....	58
Figura 22	Espectro de infravermelho dos hidrogéis.....	59
Figura 23	TG/DTG do alginato extraído da alga <i>L. Flavicans</i>	60
Figura 24	Resultado da análise de TG/DTG das amostras de celulose comercial e extraída da alga <i>L. Flavicans</i>	61
Figura 25	RMN amostra alginato extraído da <i>L. Flavicans</i>	62
Figura 26	RMN amostra alginato comercial.....	63
Figura 27	RMN amostra celulose extraída da <i>L. Flavicans</i>	64
Figura 28	Resultado da análise de UV-VIS do alginato.....	64
Figura 29	Resultado da análise de viscosidade do alginato.....	65
Figura 30	Resultado da análise de viscosidade do alginato.....	67
Figura 31	Detalhe da lama na superfície da pintura.....	68
Figura 32	Detalhe da lama na assinatura do artista.....	68
Figura 33	Detalhe das pinceladas do artista.....	69
Figura 34	Observa-se uma gota aplicada em diferentes regiões da obra.....	69

Figura 35	Observa-se uma gota aplicada no verso e o teste de pH.....	70
Figura 36	Foto da aplicação do hidrogel.....	71
Figura 37	Foto da aplicação do hidrogel.....	71
Figura 38	Foto da aplicação do hidrogel.....	72
Figura 39	Aplicação dos hidrogéis na obra.....	72
Figura 40	Resultado da aplicação dos hidrogéis na obra.....	73
Figura 41	Resultado da aplicação dos hidrogéis na obra.....	73
Figura 42	Aplicação dos hidrogéis na frente da obra.....	74
Figura 43	Absorção da umidade após o teste.....	74
Figura 44	Resultado da aplicação dos hidrogéis na frente da obra.....	75
Figura 45	Aplicação dos hidrogéis na frente da obra.....	75
Figura 46	Aplicação dos hidrogéis no verso da obra.....	76
Figura 47	Aplicação dos hidrogéis na frente da obra.....	76
Figura 48	Aplicação dos hidrogéis na frente da obra.....	77
Figura 49	Imagen microscópica digital do verso da tela com lama, à esquerda e sem lama, à direita.....	77

Lista de Abreviaturas e Siglas

UFPEL	Universidade Federal de Pelotas
MARGS	Museu de Arte do Rio Grande do Sul
LACORPI	Laboratório de Conservação e Restauração de Pintura
<i>L. FLAVICANS</i>	<i>Lessonia Flavicans</i>
EDX	Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MEV-FEG	Microscopia Eletrônica de Varredura de alta resolução
FTIR	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier
DRX	Difração de Raios – X
TG	Termogravimetria
UV-VIS	Ultravioleta Visível

Sumário

1. Introdução.....	13
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3. Revisão Bibliográfica.....	16
3.1 Algas Marinhas	16
3.1.1 <i>Lessonia Flavicans</i>	18
3.2 Celulose	20
3.3 Alginato	23
3.4 Métodos de extração de biopolímeros	26
3.5 Biopolímeros na Conservação-Restauração	29
3.6 Critérios de Seleção de Materiais para Conservação-Restauração.....	33
3.7 Mudanças climáticas e os processos de degradação em Pinturas	34
4. Materiais e Métodos.....	37
4.1 Coleta e Preparação das macroalgas	37
4.2 Processo de extração dos biopolímeros.....	37
4.2.1 Processo de extração do alginato	37
4.2.2 Processo de extração da celulose	38
4.2.3 Preparação dos hidrogéis	39
4.3 Teste de aplicação	41
4.3.1 Diagnóstico do estado de conservação	43
6. Resultados e discussões	48
7. Considerações finais	78
8. Referências.....	80
9. Apêndice	90

10. Anexo – Laudo técnico do Museu de Arte do Rio Grande do Sul96

1. Introdução

Polímeros à base de petróleo levam à persistência de resíduos no meio ambiente e consequentemente, tem havido um crescente interesse no desenvolvimento de alternativas sustentáveis e biodegradáveis em diversas áreas do conhecimento (ELKALINY *et al.*, 2024). No campo da conservação-restauração de bens culturais esse interesse é notável, por ser uma área interdisciplinar que integra ciência dos materiais, química, arte e sustentabilidade (BANDELLI *et al.*, 2024)

A conservação da arte e do patrimônio cultural é de suma importância para a preservação da história para as futuras gerações. Contudo, a arte está sujeita a degradações por meios físicos, ambientais e biológicos, levando a sujidades superficiais indesejadas, que podem afetar o aspecto visual, a mensagem artística e a integridade física de uma obra. Pesquisas relacionadas ao uso de hidrogéis vêm crescendo devido a necessidade de controle durante a aplicação de solventes, o que pode levar a penetração excessiva causando inchaço e até descolamento da camada pictórica em pinturas (FRANCE, DE *et al.*, 2020).

Devido à complexidade e diversidade de substratos artísticos, diversos materiais de gel foram propostos para consolidar a ampla gama de questões de conservação (DONI; FIERASCU, I.; FIERASCU, R. C., 2024). Nos últimos anos, os avanços na ciência trouxeram nova geração de soluções para a conservação-restauração do patrimônio cultural. Materiais e técnicas inovadoras oferecem soluções que aprimoram a proteção, a estabilidade e a integridade estética dos objetos. Diferentemente dos métodos convencionais, esses materiais avançados podem ser adaptados para atender às necessidades específicas de diferentes tipos de artefatos, oferecendo opções reversíveis e não invasivas que atendem aos padrões éticos de conservação (DONI; FIERASCU, I.; FIERASCU, R. C., 2024).

Obras de arte que sofreram com desastres naturais, como a enchente de maio de 2024, podem apresentar fragilidade e reações diferentes as convencionais com relação aos solventes, devido as suas condições.

A adoção de materiais derivados de macroalgas, microrganismos e resíduos agroindustriais insere o campo da conservação no contexto da bioeconomia circular, reduzindo dependência de recursos fósseis e minimizando impactos ambientais (CARUSO *et al.*, 2023).

Nesta pesquisa, alginato e celulose foram extraídos através de métodos químicos com a intenção de ter um melhor aproveitamento da biomassa de alga. Caracterizações químicas, estruturais e morfológicas foram realizadas e os resultados foram biopolímeros com estrutura e comportamentos semelhantes aos padrões comerciais. O alginato e a celulose foram aplicados como hidrogéis para a utilização em limpeza de pinturas, testando Tween 80 e uma mistura de Triton-X, Trietanolamina e água (TTA) como surfactantes em diferentes formulações.

Como teste de aplicação, foi utilizada uma obra do acervo do Museu de Arte do Rio Grande do Sul (MARGS) do artista Ado Malagoli, que foi o primeiro diretor do museu, além de ter sido museólogo, restaurador e uma referência para a arte do estado. Os hidrogéis foram aplicados em diferentes localizações da tela, na frente e no verso e os resultados foram satisfatórios, pois as formulações facilitaram a remoção da lama da enchente na superfície da obra.

Por fim, esta pesquisa visa contribuir para a ciência e sustentabilidade no campo dos bens culturais móveis, apresentando mais uma opção viável para a limpeza de pinturas de cavalete, além de contribuir para a valorização e preservação do patrimônio cultural.

2. Objetivos

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta tese, é extrair biopolímeros a partir de macroalgas e utilizá-los na formulação de hidrogéis aplicáveis à limpeza de pinturas de cavalete.

2.2 Objetivos específicos

- Fazer a extração do biopolímero alginato a partir da biomassa da macroalga *Lessonia Flavicans*;
- Fazer a extração do biopolímero celulose, a partir do resíduo gerado na extração do alginato;
- Caracterizar quimicamente, estruturalmente e morfologicamente os polímeros extraídos;
- Desenvolver hidrogéis aplicáveis à limpeza de pinturas de cavalete, tendo como base o alginato, celulose e surfactantes;
- Testar a aplicação dos hidrogéis em uma pintura de cavalete atingida pela enchente de maio de 2024, no Rio Grande do Sul.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Algas Marinhas

O mundo marinho é responsável por abrigar uma enorme diversidade de espécies (SILVA, A. et al., 2020). Os ecossistemas marinhos hospedam uma variedade de formas de vida, que vão desde microrganismos até organismos complexos em diversos habitats. Essa biodiversidade é fundamental para sustentar a estabilidade e a funcionalidade do ecossistema (RAHIM et al., 2025).

As algas diferenciam-se das ervas marinhas (angiospermas) por não possuírem sistema vascular (xilema e floema). Enquanto as ervas marinhas são plantas vasculares floridas, com raízes e sistema interno de transporte, as algas marinhas possuem estruturas de suporte e realizam o transporte de nutrientes por difusão. Trata-se de um grupo autotrófico, capaz de produzir seu próprio alimento por meio da fotossíntese, e que apresenta grande diversidade quanto à morfologia, ao grau de complexidade estrutural e ao tamanho. Devido a essa variabilidade, são classificadas em microalgas (visíveis apenas ao microscópio) e macroalgas, visíveis a olho nu (PEREIRA, 2021).

As macroalgas, são grandes algas multicelulares que habitam ambientes marinhos, sendo encontradas principalmente em regiões costeiras. Assim como as microalgas e outras algas de água doce e terrestres, pertencem ao grupo de organismos fotossintéticos que possuem clorofila, pigmento capaz de absorver e canalizar a energia da luz solar. Por meio da fotossíntese, transformam energia luminosa em energia química, capturam dióxido de carbono (CO_2) para formar compostos orgânicos complexos, juntamente com água e sais minerais e liberam oxigênio gasoso (O_2), desempenhando papel essencial na produção primária e na manutenção do equilíbrio ambiental (ASWATHI MOHAN et al., 2022; PEREIRA, 2021).

Segundo Aswathi Mohan et al. (2022), as macroalgas assumem uma ampla gama de estruturas, que variam de crostas simples, formas foliáceas e filamentosas até morfologias mais sofisticadas, com capacidade para captura de luz, reprodução, flutuabilidade e fixação. O tamanho pode variar de alguns milímetros até 3 a 4 metros, e a biomassa é composta majoritariamente por polissacarídeos, entre os quais se destacam ágar, alginatos, carragenina, celulose, fucoidanos, laminarina, amido e ulvana.

Segundo Pereira (2021), a coloração observada nas macroalgas resulta da combinação dos diferentes pigmentos fotossintéticos presentes em suas células,

característica utilizada há mais de um século como critério para distinguir filos e classes. Todas as macroalgas possuem clorofila, responsáveis pela coloração verde em muitas plantas vasculares e não vasculares.

Com base na pigmentação, Pereira (2021); Elkaliny et al., (2024); e Nagarajan et al., (2024) classificam as macroalgas em:

1. Macroalgas verdes: filo *Chlorophyta*; pigmentos clorofilas *a* e *b* e carotenoides, com coloração semelhante à das plantas vasculares;
2. Macroalgas vermelhas: filo *Rhodophyta*; pigmentos clorofila *a*, fícobilinas e alguns carotenoides;
3. Macroalgas marrons: filo *Ochrophyta*, classe *Phaeophyceae*; pigmentos clorofilas *a* e *c* e carotenoides, predominando a fucoxantina, responsável pela cor amarronzada.

Uma ilustração dos três grupos pode ser observada na Figura 1 abaixo.



Figura 1: Os três principais grupos de macroalgas: (a) filo Chlorophyta — algas verdes; (b) filo Rhodophyta — algas vermelhas; (c) filo Ochrophyta, classe Phaeophyceae — algas marrons.

Fonte: Adaptado de Pereira, 2021.

As algas marinhas têm diversas aplicações, incluindo medicina, cosméticos, fertilizantes, biocombustíveis, tratamento de águas residuais, produção de papel, aquicultura etc. As macroalgas apresentam vantagens únicas para a produção de bioplástico, diferenciando-as de outras matérias-primas. Seu apelo como uma fonte de bioplástico renovável e sustentável é evidente em vários aspectos (ELKALINY et al.,

2024). Os autores ainda relatam que as macroalgas apresentam uma taxa de crescimento elevada, produzindo grande quantidade de biomassa por unidade de área em comparação com as plantas terrestres, o que resulta em um potencial competitivo para a fabricação de bioplásticos. Além disso, contêm normalmente menos de 5% de lignina, facilitando o processo de decomposição durante a produção. Diferentemente das plantas terrestres, cujas paredes celulares podem conter até 35% de lignina, esse baixo teor reduz a energia e o custo necessários para a extração dos polissacarídeos essenciais utilizados na obtenção de bioplásticos. Os bioplásticos derivados de algas apresentam ainda diversas vantagens, como renovabilidade, biocompatibilidade e biodegradabilidade, tornando-os alternativas sustentáveis aos plásticos tradicionais (ELKALINY et al., 2024)

3.1.1 *Lessonia Flavicans*

As macroalgas pardas ou marrons (Phaeophyceae) têm recebido crescente atenção devido à sua elevada produtividade, papel ecológico e potencial como fonte de biopolímeros e compostos bioativos de interesse biotecnológico. Dentre essas, a espécie *Lessonia Flavicans* Bory de Saint-Vincent destaca-se como uma macroalga de águas frias subantárticas, amplamente distribuída nas costas rochosas do sul da América do Sul, incluindo o litoral do Chile e Terra do Fogo (GUIRY, 2024) Essa espécie forma extensas florestas submersas, contribuindo para a complexidade estrutural e biodiversidade dos ecossistemas costeiros (NARDELLI et al., 2023) Exemplos de morfologia da espécie podem ser observadas na Figura 2.



Figura 2: Exemplos de morfologia de *Lessonia*: a) *L. flavicans*; b) *L. trabeculata*; c) *L. variegata*; d) *L. corrugata*; e) *L. berteroana*; f) *L. spicata*.

Fonte: NARDELLI et al., 2023

O gênero *Lessonia* apresenta reconhecida importância econômica e ecológica, sendo uma das principais fontes naturais de alginatos, fucoidanos e laminarinas, que são biopolímeros com múltiplas aplicações nas indústrias farmacêutica, alimentícia, cosmética e biomédica (BERGLUND et al., 2021; YAN et al., 2024). Na *Lessonia Flavicans*, esses compostos exibem características físico-químicas singulares associadas à adaptação da espécie a ambientes frios e de alta energia, resultando em diferenças na proporção dos blocos manuronato (M) e guluronato (G) nos alginatos, bem como em graus de sulfatação específicos nos fucoidanos (NARDELLI et al., 2023). Essas variações estruturais influenciam diretamente a viscosidade, a capacidade de gelificação e as propriedades bioativas dos polímeros, o que confere a *L. flavicans* vantagens potenciais sobre outras espécies tropicais e temperadas (BERGLUND et al., 2021).

Além dos polissacarídeos estruturais, *L. flavicans* contém polifenóis, minerais e pigmentos com atividades antioxidante, antimicrobiana e anti-inflamatória. Esses compostos, frequentemente associados a mecanismos de defesa da alga contra radiação ultravioleta e estresse oxidativo, ampliam o espectro de aplicações industriais, incluindo o desenvolvimento de biocosméticos e biofilmes funcionais.

Trata-se de uma espécie abundante e com cadeia produtiva potencialmente sustentável na região subantártica, o que favorece estratégias de biorefinaria integrada para obtenção de alginatos, fucoidanos e compostos fenólicos (NARDELLI et al., 2023). A estrutura molecular diferenciada de seus biopolímeros pode conferir propriedades mecânicas e biofuncionais exclusivas, relevantes para aplicações em hidrogéis, sistemas de liberação controlada e materiais bioabsorvíveis (BERGLUND et al., 2021; YAN et al., 2024) Por fim, observa-se uma lacuna científica quanto à caracterização físico-química detalhada dos biopolímeros dessa espécie, o que representa uma oportunidade de avanço tanto no conhecimento fundamental quanto nas aplicações industriais sustentáveis.

3.2 Celulose

A celulose é o polímero natural mais abundante da Terra (FRANCE, DE et al., 2020; FORNARI et al., 2022; CARUSO et al., 2023; SAADAN et al., 2024) seguida pela hemicelulose (Fornari Júnior, 2017). É considerada a fonte renovável mais abundante e está presente em plantas, algas, microrganismos e outros organismos marinhos (FORNARI et al., 2022; CARUSO et al., 2023). Sua produção anual é estimada em aproximadamente $1,5 \times 10^{12}$ toneladas (FORNARI et al., 2022; CARUSO et al., 2023).

A celulose é um polímero polissacarídico linear, também denominada macromolécula de cadeia longa, composta por unidades de glicose ligadas por ligações β -1,4-glicosídicas (FORNARI JÚNIOR, 2017; SAADAN et al., 2024). Sua unidade repetitiva, denominada celobiose, é formada por duas moléculas de glicose esterificadas por ligação glicosídica (FORNARI JÚNIOR, 2017). A conformação estável da unidade D-anidroglucopiranose apresenta duas bases β -D-glicose ligadas planarmente a 180° (DU, Z.; WANG, N.; DU, J., 2025).

Quimicamente, a celulose é formada por monômeros de glicose dispostos em anéis, unidos por ligações β -(1,4), e apresenta grupos hidroxila que permitem a formação de extensas ligações de hidrogênio, responsáveis por suas propriedades de resistência mecânica, estabilidade estrutural e capacidade de absorção de água (SAADAN et al., 2024). A estrutura da molécula de celulose pode ser vista na Figura 3.

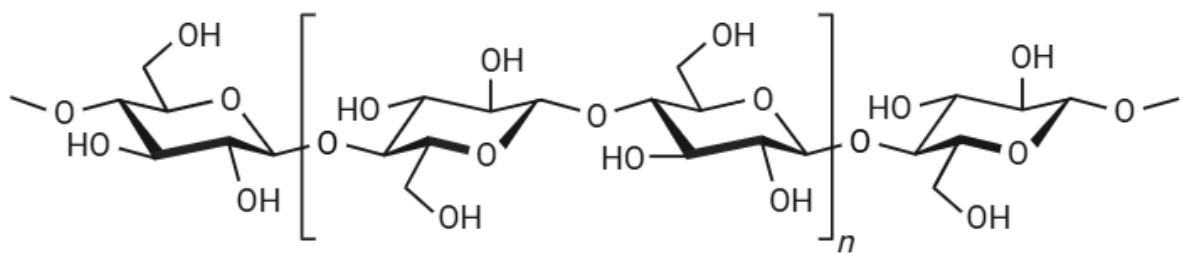


Figura 3: Ilustração da molécula de celulose.

Fonte: Autoria própria (2025).

A celulose apresenta uma estrutura hierárquica constituída por regiões alternadas de domínios cristalinos e amorfos, formando a característica estrutura fibrosa macroscópica (CARUSO *et al.*, 2023; FORNARI JÚNIOR, 2017). Os domínios cristalinos, organizados e mantidos por ligações de hidrogênio, apresentam maior resistência química, mecânica e enzimática, além de menor solubilidade em água e solventes, enquanto as regiões amorfas são mais suscetíveis à degradação (FORNARI *et al.*, 2022). Na ilustração abaixo (Figura 4), é possível analisar regiões amorfas e cristalinas que compõe a estrutura da fibra.

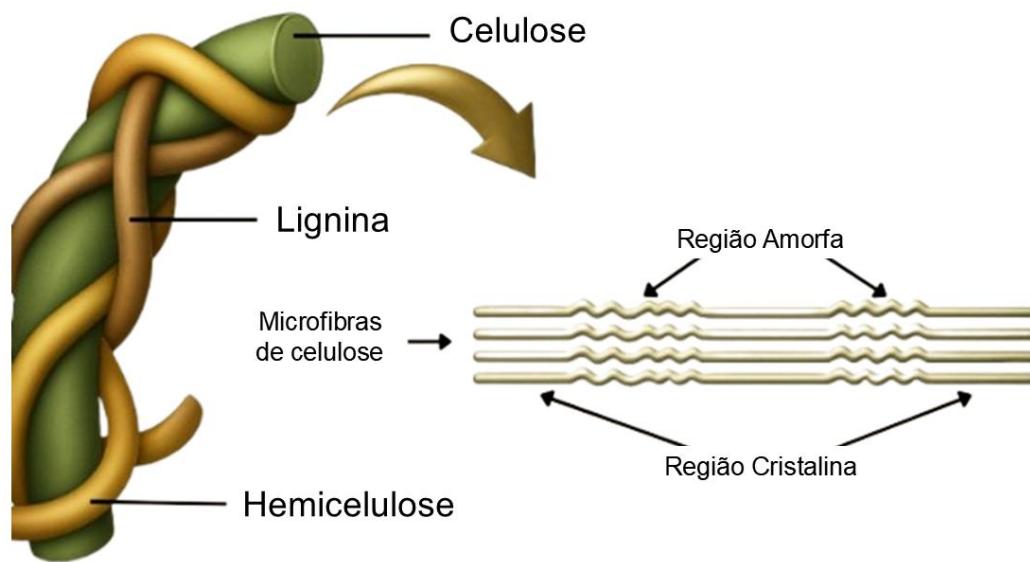


Figura 4: Ilustração de uma fibra e esquema para a compreensão das regiões amorfas e cristalinas que a compõe.

Fonte: Autoria própria (2025).

Devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo, renovabilidade e biocompatibilidade, a celulose tem despertado crescente interesse para a produção de materiais sustentáveis (FRANCE, DE *et al.*, 2020; SAADAN *et al.*, 2024). É considerada uma fonte praticamente inesgotável para obtenção de materiais nanocelulósicos, caracterizados por apresentarem pelo menos uma dimensão na faixa de 1–100 nm (FORNARI *et al.*, 2022).

A celulose pode ser extraída de diversas fontes naturais, incluindo madeira; como pode ser visto na Figura 5, bambu, algodão, palha de arroz, bagaço de cana, sementes, algas, tunicados e cepas bacterianas específicas, com variação nas propriedades físicas e químicas conforme a origem (CARUSO *et al.*, 2023; DU, Z.; WANG; DU, J., 2025). Durante o processamento, é necessário remover componentes como hemicelulose, lignina, pectina, ceras e substâncias hidrossolúveis (CARUSO *et al.*, 2023).

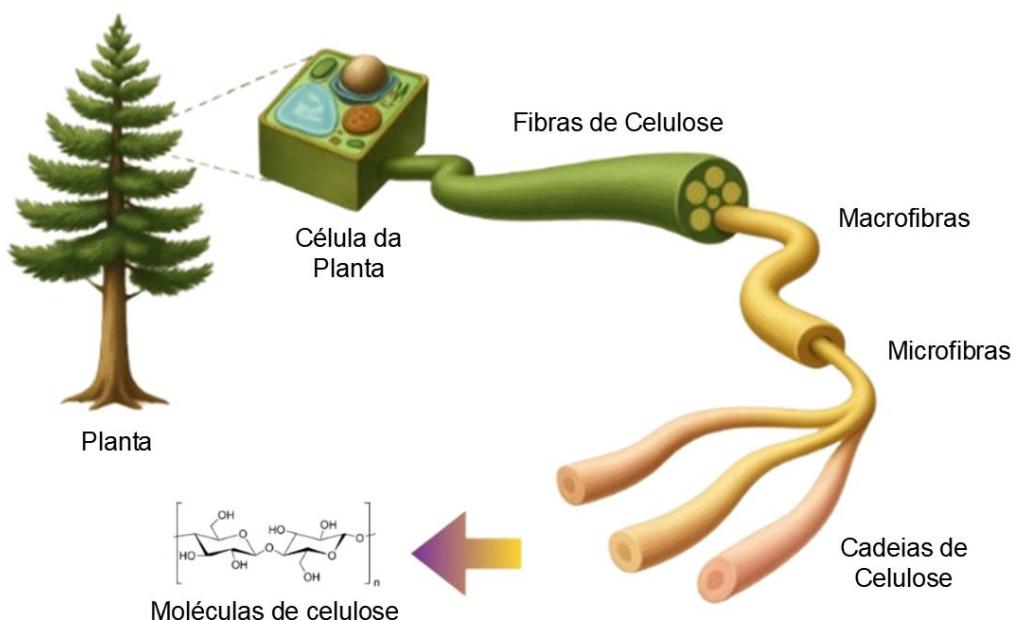


Figura 5: Esquema mostrando a composição interna de fibras de celulose.

Fonte: Autoria própria (2025).

Por suas propriedades estruturais e químicas, incluindo resistência mecânica, biodegradabilidade, biocompatibilidade e renovabilidade, a celulose se destaca como recurso estratégico para substituir materiais derivados do petróleo e para o

desenvolvimento de produtos sustentáveis, como hidrogéis, embalagens biodegradáveis, filmes protetores e compósitos funcionais (SAADAN et al., 2024; DU, Z.; WANG; DU, J., 2025).

A celulose de algas pardas apresenta algumas peculiaridades estruturais quando comparada à celulose vegetal. Estudos recentes indicam diferenças na orientação das microfibrilas, no índice de cristalinidade e no grau de polimerização, resultando em propriedades físico-químicas distintas (LI, S. et al., 2024)

Essa característica torna a celulose de origem algal atrativa para aplicações em biotecnologia, especialmente na produção de nanocelulose, que pode ser obtida sob a forma de nanocrystalos de celulose (CNC) ou nanofibrilas de celulose (CNF), a depender do método de isolamento (SAADAN et al., 2024; FORNARI et al., 2022). Os CNC são segmentos cristalinos extraídos por hidrólise ácida controlada, enquanto os CNF mantêm regiões amorfas e podem ser obtidos por processos mecânicos ou enzimáticos. Ambos exibem alta razão de aspecto, elevada resistência à tração, transparência e biocompatibilidade, o que amplia suas aplicações como reforços em compósitos, agentes estruturantes em hidrogéis e matrizes para liberação controlada (DU, Z.; WANG; DU, J., 2025; FRANCE et al., 2020).

Do ponto de vista biotecnológico e ambiental, o aproveitamento da celulose extraída de macroalgas como *Lessonia flavicans* apresenta vantagens significativas sobre as fontes lignocelulósicas tradicionais. Em macroalgas, a ausência de lignina elimina a necessidade de tratamentos químicos agressivos, como processos de deslignificação, reduzindo custos e impactos ambientais (CARUSO et al., 2023). Além disso, a alta pureza e o menor diâmetro das microfibrilas de celulose algal favorecem sua dispersão em matrizes poliméricas, o que é essencial na produção de biocompósitos e biofilmes funcionais (LI, Yanli et al., 2023)

3.3 Alginato

O alginato é um polissacarídeo natural, não ramificado e aniônico, extraído predominantemente de algas marrons (Phaeophyceae), representando até 40 % de sua massa seca (LEE et al., 2022; SAJI et al., 2022; VILLACRÉS, 2023; NESIC et al., 2023). Foi descrito pela primeira vez em 1881 pelo químico britânico E.C.C. Stanford, e desde então tem sido explorado industrialmente, com produção anual

estimada em cerca de 30.000 toneladas métricas (SAJI *et al.*, 2022).

Entre as principais fontes destacam-se gêneros como *Laminaria*, *Macrocystis*, *Ascophyllum*, *Ecklonia* e *Lessonia* (ASWATHI MOHAN *et al.*, 2022; SAJI *et al.*, 2022), cultivados em diferentes regiões do mundo, incluindo Austrália, Chile, China, Dinamarca, Espanha, França, Indonésia, Índia, Irlanda, Reino Unido, EUA e África do Sul (SAJI *et al.*, 2022).

Quimicamente, o alginato é constituído por copolímeros lineares de ácido β -D-manurônico (M) e ácido α -L-gulurônico (G), unidos por ligações glicosídicas 1 \rightarrow 4 (LEE *et al.*, 2022; CARUSO *et al.*, 2023a; VILLACRÉS, 2023; NESIC *et al.*, 2023). Essas unidades se organizam em blocos homopoliméricos (MM e GG) e blocos heteropoliméricos (MG), sendo que a proporção M/G varia conforme a espécie de alga, a parte do talo utilizada e as condições de crescimento (VILLACRÉS, 2023; NESIC *et al.*, 2023; SAJI *et al.*, 2022). Essa razão M/G influencia diretamente as propriedades do polímero: um alto teor de blocos GG confere géis mais rígidos e resistentes, enquanto uma maior proporção de blocos M resulta em soluções mais viscosas e géis mais macios; já os blocos MG tendem a gerar filmes mais elásticos (NESIC *et al.*, 2023; VILLACRÉS, 2023). A estrutura do alginato pode ser observada na Figura 6, abaixo.

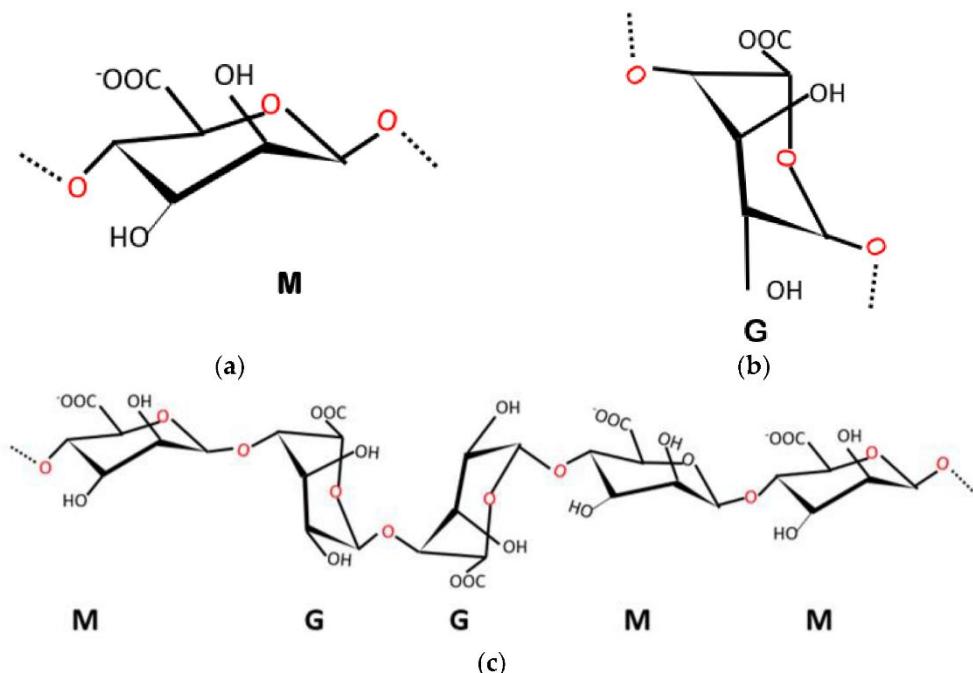


Figura 6. Estrutura química dos polissacarídeos (a) ácido β -D-manurônico (b) ácido α -L-gulurônico, (c) conformação dos blocos M e G do alginato.

Fonte: Adaptado de Saji *et al.*, (2022).

No nível molecular, o ácido manurônico forma cadeias lineares e flexíveis devido às ligações β -(1→4), enquanto o ácido gulurônico, por meio das ligações α -(1→4), adota conformações mais curvadas e rígidas, que influenciam a estabilidade e as propriedades de gelificação (NESIC et al., 2023). A gelificação ocorre principalmente pela reticulação iônica com cátions multivalentes como Ca^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} (DALAL et al., 2021; LEE et al., 2022) formando a conhecida estrutura tridimensional característica dos blocos G (NESIC et al., 2023).

O alginato existe naturalmente como sais insolúveis de cálcio, magnésio, sódio e potássio na parede celular das algas marrons (SAJI et al., 2022; NESIC et al., 2023). Seu processo de extração industrial geralmente envolve tratamento alcalino seguido de precipitação e purificação (NAGARAJAN et al., 2024). Comercialmente, o alginato de sódio é o derivado mais comum, obtido a partir do ácido algínico (CARUSO et al., 2023a). O alginato de sódio se destaca por sua baixa toxicidade, biocompatibilidade, solubilidade em água sob condições neutras e alcalinas e capacidade de formar hidrogéis e filmes funcionais (CARUSO et al., 2023a).

O polímero apresenta alta hidrofobicidade relativa, biodegradabilidade, renovabilidade e não toxicidade (ELKALINY et al., 2024; NAGARAJAN et al., 2024). Como biopolímero, é utilizado na fabricação de plásticos biodegradáveis, filmes comestíveis e embalagens ecológicas. Suas propriedades mecânicas, estabilidade e flexibilidade podem ser ajustadas por misturas com outros biopolímeros ou modificações químicas (ELKALINY et al., 2024).

Devido à sua biocompatibilidade e capacidade de encapsular moléculas bioativas, o alginato é amplamente empregado em sistemas de liberação controlada de fármacos, engenharia de tecidos, curativos para feridas, adsorventes para tratamento de águas residuais e até mesmo na conservação de patrimônio cultural, como no uso de hidrogéis de alginato para remover eflorescências de gesso em pinturas e frescos (LEE et al., 2022). Além disso, encontra aplicações consolidadas na indústria alimentícia como espessante, estabilizante e gelificante em produtos como laticínios, sobremesas, molhos, bebidas e filmes comestíveis (ELKALINY et al., 2024; NAGARAJAN et al., 2024). É também utilizado na indústria farmacêutica e cosmética como aglutinante, emulsificante, agente de liberação controlada e formador de filme (NAGARAJAN et al., 2024; ASWATHI MOHAN et al., 2022).

Historicamente usado como aditivo para caldeiras, vedantes e estabilizante de sorvetes (SAJI et al., 2022), o alginato mantém papel relevante tanto em aplicações

industriais tradicionais quanto em tecnologias inovadoras, como a produção de nanocarregadores inteligentes para liberação de fármacos responsivos ao pH e o desenvolvimento de revestimentos antimicrobianos para obras de arte (CARUSO et al., 2023a).

Do ponto de vista funcional, o alginato apresenta sinergia tecnológica com outros biopolímeros, como a celulose e a quitosana, permitindo a formação de compósitos híbridos com propriedades ajustáveis (NESIC et al., 2023; ELKALINY et al., 2024). Além disso, a modificação química do alginato permite introduzir grupos funcionais específicos, ampliando suas aplicações em sensores, nano compósitos e materiais inteligentes responsivos a estímulos ambientais (CARUSO et al., 2023).

Por fim, o alginato destaca-se não apenas pela abundância e versatilidade, mas também por sua compatibilidade com outros biopolímeros e potencial de aplicação em sistemas sustentáveis de alta performance.

3.4 Métodos de extração de biopolímeros

Os métodos de extração de biopolímeros variam conforme a biomassa, o ambiente de coleta, o grau de maturação da biomassa e a finalidade de uso do material obtido. Em geral, as rotas tecnológicas seguem o princípio da extração sequencial, que visa o aproveitamento integral da biomassa, reduzindo resíduos e otimizando o rendimento geral do processo (CARUSO et al., 2023).

A extração de biopolímeros representa uma etapa importante na valorização de recursos renováveis, pois define a eficiência, pureza e sustentabilidade do processo de obtenção de materiais como quitina, quitosana, lignina, celulose, alginatos. Nos últimos anos, o avanço de tecnologias limpas e a busca por métodos economicamente viáveis têm impulsionado o desenvolvimento de estratégias inovadoras de extração, que visam reduzir o uso de solventes tóxicos e energia, preservando as propriedades estruturais e funcionais dos polímeros naturais.

Tradicionalmente, os métodos de extração baseiam-se em processos químicos (ácido-base, alcalinos ou oxidativos) e físicos (mecânicos, térmicos, ultrassônicos ou de micro-ondas). A extração química é amplamente utilizada pela sua eficiência, mas sofre críticas quanto ao impacto ambiental e degradação parcial dos polímeros (ZHANG, M. et al., 2023). Ainda assim, é possível realizar extrações com eficiência e o menor impacto possível.

Segundo Saadan et al. (2024), a parede celular das macroalgas, por exemplo, é composta por uma matriz complexa de polissacarídeos, proteínas e compostos fenólicos. Essa estrutura apresenta elevada estabilidade química e física, o que requer tratamentos prévios para despolimerização parcial e solubilização seletiva dos componentes. Normalmente, os métodos de extração mais comuns envolvem três etapas principais, incluindo um pré-tratamento físico e secagem controlada (40–60 °C) seguida da moagem da biomassa para aumentar a área superficial e facilitar a penetração dos reagentes; extração química, que trata-se da utilizações de soluções alcalinas ou ácidas sob temperatura controlada, que rompem ligações iônicas e hidrogênio entre os polímeros da parede celular; e purificação, que inclui etapas de filtração, neutralização, diálise e precipitação seletiva, de acordo com a natureza do polissacarídeo extraído.

O processo de extração do alginato envolve geralmente etapas de pré-tratamento ácido, extração alcalina, filtração e precipitação, seguidas por conversão em sais de sódio ou cálcio. O tratamento alcalino (com Na_2CO_3 ou NaOH) solubiliza o alginato como alginato de sódio, enquanto o ácido mineral (HCl , H_2SO_4) é posteriormente utilizado para regenerar o ácido algínico (CARUSO et al., 2023a). Fatores como pH, temperatura, tempo de extração e proporção solvente/massa são determinantes na qualidade e rendimento do polímero obtido. Condições muito alcalinas ou temperaturas elevadas podem causar redução do peso molecular por degradação das cadeias, afetando a viscosidade e o comportamento de gelificação (NAGARAJAN et al., 2024).

Recentemente, vêm sendo estudadas rotas de extração mais sustentáveis, como o uso da extração assistida por ultrassom, que reduz o consumo de reagentes e aumenta o rendimento, mantendo a integridade das cadeias poliméricas (ELKALINY et al., 2024).

O alginato apresenta compatibilidade com outros biopolímeros, como a celulose e a quitosana, permitindo a formação de compósitos híbridos com propriedades ajustáveis. Enquanto a celulose contribui com rigidez, estabilidade térmica e resistência mecânica, o alginato confere flexibilidade, capacidade de intumescimento e biocompatibilidade, tornando os materiais resultantes promissores para membranas e sistemas de liberação controlada (NESIC et al., 2023; ELKALINY et al., 2024).

De acordo com Falah et al., (2024) comumente o processo de extração de celulose de biomassa inicia-se com a coleta, lavagem e secagem. A lavagem remove

sais, areia, proteínas solúveis e pigmentos residuais, sendo geralmente realizada com água destilada e solução etanólica (70%) para reduzir compostos fenólicos e lipídicos. Em seguida, a biomassa é submetida à extração sequencial de biopolímeros não celulósicos, por meio de tratamento alcalino moderado (Na_2CO_3 ou NaOH) a 60–80 °C, sob agitação (YAN *et al.*, 2024). Após a biomassa é lavada e reservada para a próxima etapa.

A segunda etapa visa eliminar fucoidanos e sais minerais associados à parede celular. Utiliza-se, para isso, um tratamento ácido leve (HCl 0,1–0,5 M) a 60 °C, por 1–2 h, que promove a desmineralização e solubilização dos polissacarídeos sulfatados, sem degradar significativamente a celulose. O resíduo sólido é novamente lavado com água destilada até pH neutro, obtendo-se um material composto predominantemente por celulose, proteínas estruturais e resíduos fenólicos.

A etapa seguinte consiste em um tratamento alcalino concentrado (NaOH 4–10%) em condições controladas de temperatura (60–90 °C), durante 2–4 h, destinado a eliminar proteínas, hemiceluloses e pectinas residuais, liberando as microfibrilas de celulose (CARUSO *et al.*, 2023; FORNARI *et al.*, 2022). Essa etapa pode ser realizada em regime contínuo ou por refluxo, seguida de repetidas lavagens até neutralização.

O branqueamento tem como objetivo remover traços residuais de pigmentos e compostos fenólicos. Métodos tradicionais empregam soluções oxidantes, como peróxido de hidrogênio (H_2O_2 3–10%), hipoclorito de sódio (NaOCl) ou permanganato de potássio (KMnO_4), em condições suaves (40–60 °C) e pH alcalino (FORNARI *et al.*, 2022).

Após o branqueamento, normalmente o material é lavado, filtrado e seco em estufa ou liofilizado.

3.5 Biopolímeros na Conservação-Restauração

A conservação-restauração de bens culturais constituem um campo interdisciplinar e multidisciplinar que integra ciência dos materiais, química, arte e sustentabilidade (BANDELLI et al., 2024). A partir da década de 60, muitas classes de compostos poliméricos foram desenvolvidas e aplicadas. Nesse contexto, os polímeros sintéticos foram adotados com entusiasmo também na restauração do Patrimônio Cultural, além de seu uso direto como materiais artísticos, como colas/adesivos ou consolidantes, vernizes e revestimentos protetores.

O uso generalizado de materiais poliméricos na restauração foi fomentado por suas características práticas vantajosas, como disponibilidade, baixo custo, facilidade de aplicação, alto poder adesivo e efeitos atraentes de curto prazo (MASTRANGELO et al., 2025). No entanto, a conscientização científica e o design rigoroso dos materiais de restauração só surgiram mais tarde, por volta do final da década de 1980. A difusão de polímeros sintéticos não foi bem sustentada pelo pleno conhecimento de suas transformações físico-químicas sob a ação da luz UV-Vis, temperatura, umidade relativa e poluentes, que promovem inúmeras vias de degradação de obras de arte (BANDELLI et al., 2024).

Um primeiro grupo de formulações sintéticas, aplicadas como soluções ou emulsões aquosas, compreende resinas de poliéster, cetona, epóxi ou silicone, siloxanos, poliolefinas, poliamidas, bem como polímeros acrílicos ou vinílicos, amplamente utilizados como consolidantes ou repelentes de água desde a década de 1970 em diferentes tipos de obras de arte. Produtos como Paraloid B72, acetato de polivinila e Primal AC-33 foram, e ainda são extensivamente aplicados em pinturas, pedra e metal. No entanto, esses polímeros são degradados por processos de foto-oxidação promovidos pela luz e intensificados pela temperatura e poluentes, o que pode causar amarelamento, rachaduras, alteração no peso molecular e perda do poder adesivo. Além disso, esses produtos também podem ser atacados por microrganismos, ao contrário do que se acreditava inicialmente, ou degradar emitindo ácidos voláteis (CAPONETTI et al., 2023; BANDELLI et al., 2024).

O ácido poliacrílico (PAA) e os éteres de celulose têm sido empregados para espessar solventes em dispersões viscosas, garantindo apenas controle parcial da liberação durante a remoção de vernizes envelhecidos de pinturas. O PAA foi

combinado com surfactantes de cocoamina nos chamados “géis de solvente”, dispersões poliméricas capazes de espessar uma vasta gama de solventes. Embora sejam sistemas versáteis, esses espessantes têm baixa retenção, deixando resíduos de polímero ou surfactante nas superfícies tratadas, exigindo etapas de limpeza adicionais que podem ser invasivas às camadas originais (BANDELLI *et al.*, 2024).

A poliacrilamida, poli(2-hidroxietil metacrilato) (pHEMA), poli(vinilpirrolidona) (PVP) e álcool polivinílico (PVA) têm sido usados para formular hidrogéis para limpeza de obras de arte, combinando propriedades mecânicas e alta hidrofilicidade, possibilitando a remoção de sujidades e vernizes envelhecidos de superfícies sensíveis, como aquarelas e murais, sem afetar as camadas pictóricas originais (BANDELLI *et al.*, 2024; DOMINGUES *et al.*, 2013). Embora esses hidrogéis e dispersões viscosas superem limitações de sistemas tradicionais, ainda há a necessidade de desenvolver organogéis e biopolímeros avançados, redes poliméricas derivadas de fontes naturais, capazes de confinar solventes orgânicos e promover ações de limpeza e consolidação mais sustentáveis (DONI; FIERASCU, I.; FIERASCU, R. C., 2024).

À medida que a área da conservação evolui, há uma ênfase crescente em práticas e materiais sustentáveis que minimizam o impacto ambiental e garantem a integridade dos bens culturais. Nesse contexto, os biopolímeros surgiram como candidatos promissores devido às suas propriedades intrínsecas, como biocompatibilidade, biodegradabilidade e capacidade de formar matrizes poliméricas multifuncionais. Esses materiais atendem melhor aos padrões de sustentabilidade e apresentam maior compatibilidade com substratos históricos (FORNARI *et al.*, 2022; PÉREZ-GANDARILLAS *et al.*, 2024). Além disso, sua origem natural reduz o impacto ambiental e favorece uma interação mais estável com materiais celulósicos, lignocelulósicos e minerais comumente encontrados no patrimônio cultural.

A incorporação dos biopolímeros ao campo da conservação reflete não apenas uma tendência tecnológica, mas também uma mudança de paradigma em direção a práticas mais sustentáveis, alinhadas com os princípios da química verde e da preservação ambiental. Em contraposição aos polímeros sintéticos, os biopolímeros naturais oferecem vantagens evidentes como biodegradabilidade e biocompatibilidade, capacidade de formar sistemas reversíveis ajustáveis em pH e viscosidade, menor toxicidade e impacto ambiental, além de melhor integração

química e física com materiais orgânicos e inorgânicos das obras de arte (CARUSO et al., 2023).

Os biopolímeros empregados no campo da conservação podem ser classificados em três grupos principais: polissacarídeos, proteínas e derivados de microrganismos, cada classe apresentando propriedades específicas que determinam seu uso técnico. Os polissacarídeos são os biopolímeros mais explorados na conservação devido à sua estrutura hidrofílica e capacidade de formar géis, filmes e soluções viscosas. Derivados principalmente de macroalgas pardas (*Phaeophyceae*), os alginatos são copolímeros de ácido manurônico e ácido gulurônico que formam géis pela reticulação iônica com cátions divalentes (como Ca^{2+}).

Na conservação, são amplamente usados em géis de limpeza controlada, por permitirem ajustar a rigidez, a taxa de liberação de solventes e o tempo de contato com o substrato. Os géis de alginato exibem boa retenção de umidade e adesão limitada, evitando a penetração excessiva em camadas pictóricas. Além disso, são reversíveis e facilmente removíveis, o que atende a um dos princípios fundamentais da restauração.

O ágar e sua fração purificada, a agarose, extraídos de algas vermelhas (*Rhodophyceae*), são utilizados na limpeza de pinturas e papéis desde os anos 2000. Quando aquecidos e gelificados, formam matrizes tridimensionais transparentes que liberam gradualmente solventes aquosos, permitindo a remoção de sujidades e redução de manchas sem danificar o suporte, sendo a agarose especialmente valorizada por sua alta pureza e estabilidade térmica (FORNARI et al., 2022).

A quitosana, obtida da desacetilação da quitina de crustáceos ou fungos, destaca-se por suas propriedades antimicrobianas, filmogênicas e adesivas. Em conservação, é usada como agente consolidante e em revestimentos protetores de superfícies porosas. Sua estrutura catiônica permite interações eletrostáticas com substratos negativos, sendo aplicada também em sistemas híbridos com nanopartículas metálicas para controle microbiológico (CAPONETTI et al., 2023).

A celulose, presente tanto em plantas quanto em macroalgas, é amplamente empregada na forma de derivados como carboximetilcelulose (CMC) e hidroxipropilcelulose (HPC), utilizados como espessantes, adesivos e formadores de filme. Em formulações de géis, a celulose atua como estabilizante estrutural, conferindo resistência mecânica e controle da reologia. Sua elevada compatibilidade

com substratos celulósicos e pigmentos faz dela um dos biopolímeros mais seguros para uso em bens culturais (SAADAN et al., 2024).

As proteínas constituem outra categoria de biopolímeros historicamente usada na arte e na conservação. A gelatina, a albumina e a caseína foram amplamente empregadas como aglutinantes e adesivos desde períodos históricos, mas sua reutilização contemporânea exige controle rigoroso de pH e pureza. Atualmente, essas proteínas são estudadas para uso em géis híbridos e sistemas de liberação controlada, combinando propriedades adesivas e estruturais. Entretanto, seu potencial de degradação biológica e sensibilidade a variações de umidade limita o uso em contextos de longo prazo (BANDELLI et al., 2024).

Recentemente, biopolímeros produzidos por microrganismos ou obtidos de fontes marinhas não tradicionais têm despertado interesse crescente. Entre eles destacam-se a xantana, goma exopolissacarídica obtida por *Xanthomonas campestris*, usada em formulações aquosas por sua viscosidade controlável e alta estabilidade química, e os fucoidanos, polissacarídeos sulfatados extraídos de macroalgas pardas, com propriedades bioativas e antioxidantes, estudados como componentes funcionais de géis para limpeza e consolidação (CARUSO et al., 2023).

Os géis de limpeza são uma das áreas onde os biopolímeros têm se mostrado mais promissores. Esses sistemas tridimensionais retêm solventes e os liberam de maneira controlada sobre a superfície pictórica, evitando infiltração e danos. Os principais sistemas estudados incluem géis de alginato e celulose, que combinam flexibilidade e resistência, permitindo limpeza eficaz de camadas sujas sem alterar a textura original; géis de agarose com solventes ajustados, aplicados em pinturas murais e telas para remoção de vernizes oxidados; e géis híbridos (biopolímero + nanopartículas), que exploram as propriedades catalíticas ou antimicrobianas de nanopartículas metálicas dispersas em uma matriz polimérica biodegradável (YAN et al., 2024).

Esses sistemas são considerados revolucionários na conservação moderna, pois unem eficiência técnica à segurança do operador e do patrimônio, respeitando os princípios de reversibilidade, seletividade e compatibilidade.

3.6 Critérios de Seleção de Materiais para Conservação-Restauração

A degradação de objetos históricos é inevitável ao longo do tempo, resultado de processos de envelhecimento natural e de fatores ambientais como poluição, poeira, compostos orgânicos voláteis e biofilmes. Esses contaminantes se acumulam na superfície dos artefatos, comprometendo tanto sua estabilidade física quanto sua legibilidade estética (KHAKSAR-BAGHAN; KOOCHAKZAEI; HAMZAVI, 2024). A remoção seletiva dessas camadas é um dos procedimentos mais delicados e recorrentes na conservação-restauração, exigindo uma criteriosa escolha de materiais e metodologias, a fim de garantir segurança química, eficácia e compatibilidade com os substratos originais (BANDELLI et al., 2024).

O processo de limpeza é particularmente sensível, porque visa eliminar apenas as substâncias que comprometem a conservação e a leitura da obra, sem interferir nos componentes originais. Por esse motivo, a seleção dos materiais de limpeza deve considerar não apenas a eficácia na remoção de contaminantes, mas também aspectos como toxicidade, estabilidade, biodegradabilidade e interação físico-química com o substrato (SANSONETTI et al., 2024).

Durante décadas, solventes orgânicos foram amplamente empregados em processos de limpeza, mas sua volatilidade e potencial de causar inchaço, lixiviação e redistribuição de macromoléculas dissolvidas levaram à busca por alternativas mais seguras (CHELAZZI; POGGI; BAGLIONI, P., 2024). Os riscos à saúde dos conservadores e ao meio ambiente também impulsionaram a substituição gradual desses solventes por sistemas de limpeza à base de matéria mole, fluídos nanoestruturados (NSFs) e géis poliméricos, que permitem maior controle sobre a liberação e retenção de solventes (CHELAZZI; BAGLIONI, P., 2023).

Os polímeros têm se mostrado fundamentais na criação de redes de confinamento capazes de controlar a penetração e evaporação de solventes durante a limpeza de superfícies artísticas. Os hidrogéis e organogéis poliméricos, sejam naturais ou sintéticos, conferem ao conservador uma aplicação mais seletiva e segura, reduzindo o risco de danos ao substrato (BANDELLI et al., 2024). Entre os polímeros naturais mais utilizados destacam-se colágeno, gelatina, quitosana, alginato, todos de origem renovável e biodegradável. Esses materiais

apresentam vantagens ambientais e funcionais, como alta capacidade de retenção de água e compatibilidade química com substratos históricos (KAWEE-AI, 2025)

O ágar, derivado de algas vermelhas (gêneros *Gelidium* e *Gracilaria*), é um gelificante amplamente utilizado em intervenções de conservação por formar géis físicos que aprisionam água em uma matriz tridimensional, reduzindo a liberação descontrolada de umidade sobre superfícies sensíveis (SANSONETTI et al., 2024). Da mesma forma, o alginato de sódio, tem se destacado pela formação de hidrogéis flexíveis e biocompatíveis, com excelente capacidade de modulação da taxa de liberação de água e solventes (BANDELLI et al., 2024).

Além dos biopolímeros, materiais sintéticos como Carbopol®, PVA (álcool polivinílico) e P(HEMA)/PVP ainda desempenham papel relevante, especialmente pela estabilidade mecânica e pela capacidade de carregar surfactantes ou fluidos nanoestruturados (KHAKSAR-BAGHAN; KOOCHAKZAEI; HAMZAVI, 2024b). Contudo, o uso de polímeros derivados do petróleo tende a ser gradualmente substituído por alternativas verdes, devido à sua biodegradabilidade e à origem renovável (KAWEE-AI, 2025).

Os critérios de seleção de materiais para limpeza devem incluir não apenas a eficácia técnica, mas também aspectos de segurança ocupacional, toxicidade ambiental e sustentabilidade do ciclo de vida dos materiais. Avaliações recentes de métricas verdes para solventes demonstraram que muitos álcoois e ésteres apresentam bom desempenho ambiental, enquanto hidrocarbonetos aromáticos e éteres ainda representam riscos significativos (CASINI; CHELAZZI; BAGLIONI, P., 2023) Nesse contexto, biopolímeros derivados de algas e outros recursos marinhos despontam como alternativas seguras e renováveis.

3.7 Mudanças climáticas e os processos de degradação em Pinturas

O patrimônio cultural, desempenha um papel fundamental na preservação da memória coletiva e da identidade das sociedades. Entre os bens materiais, as pinturas se destacam por sua complexidade estrutural e pela vulnerabilidade intrínseca a fatores ambientais, químicos e biológicos (ABOULNAGA et al., 2024; MEIRA ENGEL; ILHA LIBRELOTTO, 2024) A proteção dessas obras exige compreensão profunda dos processos de degradação, do comportamento dos materiais e da interação destes

com o ambiente, especialmente em cenários de mudanças climáticas, cujos impactos se manifestam de forma acelerada e imprevisível.

As pinturas são compostas por suportes orgânicos ou inorgânicos, camadas de preparação, pigmentos, ligantes e vernizes. Cada um desses elementos possui propriedades distintas e respostas específicas aos fatores ambientais. O suporte, ou tela, é particularmente sensível a variações de temperatura e umidade, que provocam expansão, contração e fissuração. Os pigmentos e ligantes podem sofrer fotodegradação, oxidação e hidrólise, alterando a cor e a integridade da camada pictórica (CARROLL; AARREVAARA, 2018; SESANA *et al.*, 2021) Ambientes úmidos e mal ventilados favorecem a colonização por microrganismos (fungos e bactérias), cuja atividade biológica compromete a coesão das camadas e promove alterações cromáticas irreversíveis (FATORIĆ; SEEKAMP, 2017).

Neste contexto, os biopolímeros surgem como alternativas promissoras para a conservação e restauro, oferecendo materiais compatíveis, reversíveis e sustentáveis. Entre eles, destacam-se polímeros extraídos de algas, como o alginato, e de plantas, como a celulose, ambos caracterizados por alta afinidade com fibras naturais, baixo impacto ambiental e capacidade de interação controlada com suportes degradados (FRANCE *et al.*, 2020; FORNARI *et al.*, 2022). A celulose, especificamente, é o polímero natural mais abundante na Terra e apresenta propriedades mecânicas e químicas que permitem sua aplicação na consolidação de papéis e telas, bem como na criação de películas protetoras temporárias durante intervenções de limpeza ou transporte (FORNARI *et al.*, 2022; FRANCE *et al.*, 2020). Além disso, os biopolímeros permitem incorporação de agentes bioativos ou antioxidantes que retardam a degradação, promovendo maior estabilidade frente a flutuações ambientais.

As mudanças climáticas intensificam os desafios para a conservação de pinturas, uma vez que eventos extremos (ondas de calor, enchentes, tempestades e aumento da radiação ultravioleta) alteram drasticamente as condições de armazenamento, exposição e transporte. Em regiões urbanas densamente povoadas ou costeiras, essas alterações têm efeitos cumulativos, acelerando o desgaste físico, químico e biológico das obras. Tais impactos reforçam a necessidade de estratégias integradas de preservação preventiva, baseadas em monitoramento ambiental contínuo, análise de risco e planejamento adaptativo (SESANA *et al.*, 2021).

A conservação preventiva deve considerar tanto o manejo ambiental quanto a tecnologia disponível. Sensores de temperatura, umidade relativa, luminosidade e

poluentes atmosféricos permitem monitoramento em tempo real, enquanto tecnologias como escaneamento 3D, realidade aumentada e modelagem digital possibilitam avaliação da integridade estrutural sem contato físico direto com as obras (SESANA et al., 2021). Paralelamente, a utilização de biopolímeros em tratamentos de consolidação, revestimento temporário ou limpeza controlada integra sustentabilidade e compatibilidade química, reduzindo riscos de danos secundários (FORNARI et al., 2022).

Além dos aspectos técnicos, a preservação de pinturas exige engajamento social e políticas públicas. Comunidades locais, gestores e instituições culturais desempenham papel crucial na manutenção de práticas de conservação, sensibilização e monitoramento participativo. A valorização de saberes tradicionais, práticas comunitárias e estratégias locais de preservação fortalece a resiliência frente a eventos climáticos extremos, integrando conservação cultural, sustentabilidade e identidade social (MEIRA ENGEL; ILHA LIBRELOTTO, 2024). Planejamentos urbanos e legislações ambientais que incorporem proteção do patrimônio cultural são fundamentais para reduzir vulnerabilidades e garantir a transmissão segura de obras e saberes às gerações futuras (GRAFAKOS *et al.*, 2020).

Dessa forma, a preservação de pinturas vai além do aspecto estético, configurando-se como um desafio científico, técnico e social.

4. Materiais e Métodos

Todos os reagentes utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram de grau analítico, das marcas Synth, Sigma Aldrich e Êxodo Científica.

4.1 Coleta e Preparação das macroalgas

A biomassa da alga *L. Flavicans* foi obtida através de uma parceira regional entre o grupo de pesquisas Novonano e o Laboratório de Lipidômica e Bio-orgânica (LLIPBIO) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e uma parceria internacional entre a UFPel e a Universidade de Magalhães (UMag) no Chile, por meio de um Programa de Cooperação Internacional.

A espécie *L. Flavicans* foi prospectada na região subantártica chilena através do projeto, a alga foi lavada, seca e levada para a UFPel. Para a obtenção dos biopolímeros, primeiramente foi feita a moagem das matérias-primas utilizando um moinho de facas (Marconi - Modelo MA380) visando a diminuição do material.

4.2 Processo de extração dos biopolímeros

4.2.1 Processo de extração do alginato

Primeiramente, 5 g da biomassa da *L. Flavicans* foi previamente lavada com água destilada e em seguida, colocada em solução 0.4 % de formaldeído por 30 minutos sob agitação magnética. Após esse processo, a biomassa foi colocada em solução de 0.1 mol⁻¹ de ácido clorídrico, sob agitação magnética. Para finalizar o processo de extração, a biomassa foi colocada em carbonato de sódio por 2 horas, a 60º de temperatura, sob agitação constante. Para a precipitação do alginato, a biomassa foi separada do sobrenadante através de centrifugação a 3500 rpm. O alginato foi precipitado com álcool etílico absoluto e coletado para posterior liofilização. Uma explicação mais detalhada pode ser vista na Figura 7 abaixo.



Figura 7: Esquema do processo de extração do alginato.

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.2 Processo de extração da celulose

Com o intuito de fazer um melhor aproveitamento da biomassa, o resíduo gerado na extração de alginato foi aproveitado para a extração de celulose. A metodologia consiste em banhos de acetona e etanol (50:50 v/v) em temperatura de 60 °C, para a despigmentação da macroalga. A extração foi realizada em solução de NaOH, ácido acético e clorito de sódio, em temperatura de 80 °C seguida de outra etapa em NaOH, em 80 °C. A ilustração da metodologia pode ser acompanhada na Figura 8.

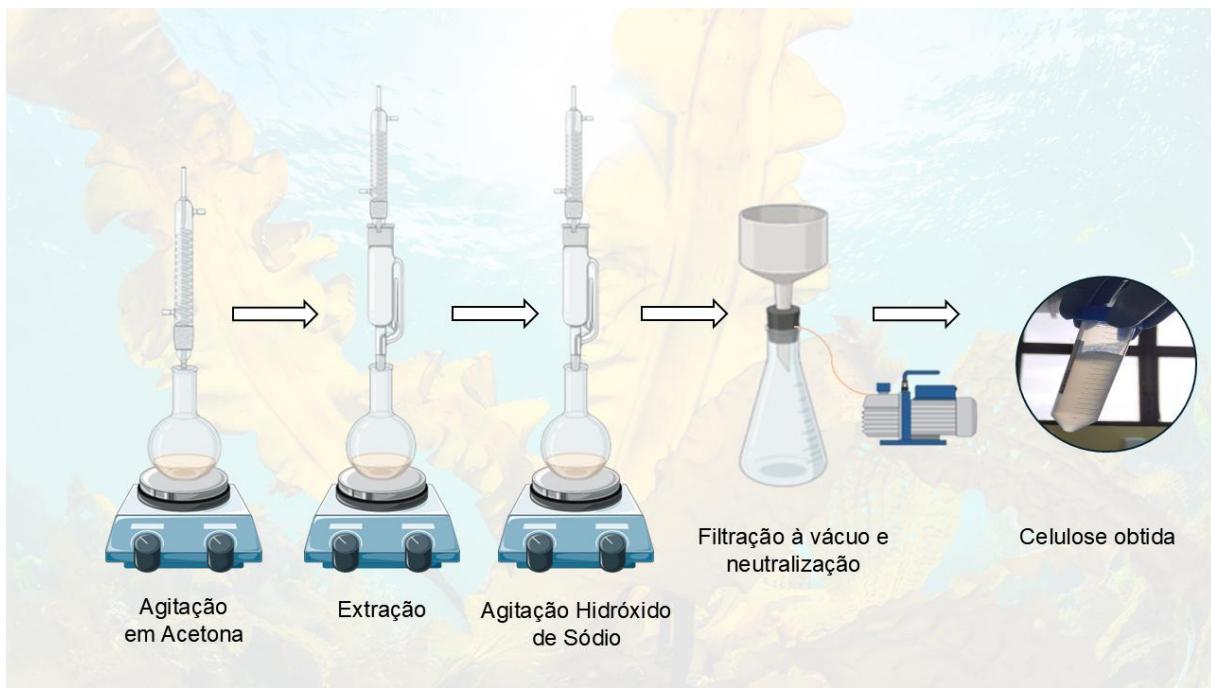


Figura 8: Esquema do processo de extração de celulose.

Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.3 Preparação dos hidrogéis

Os hidrogéis foram preparados em seis diferentes formulações, porém, todas contendo os biopolímeros extraídos. A metodologia foi baseada na mistura e homogeneização do alginato e da celulose extraídos, acrescentando os surfactantes em diferentes combinações.

O TTA, uma mistura de Triton-X, Trietanolamina e água é um reagente comumente utilizado na limpeza de pinturas e está entre os solventes de Richard Wolbers, pesquisador da área da química aplicada ao patrimônio.

A eficiência do TTA como solvente é notável, principalmente na restauração das obras do MARGS atingidas pela enchente. Contudo, para camadas pictóricas fragilizadas, tem-se a necessidade de testar outros materiais, muitas vezes que facilitem já a fixação da policromia. Outra questão importante, é o atrito muitas vezes necessário para efetuar a limpeza de uma superfície, seja a tela ou a camada pictórica. Cada pintura tem sua especificidade e, dependendo do estágio de deterioração ou dos materiais que compõe a obra, pode não ser possível fazer a limpeza com *Swab*, que é um instrumento utilizado pelos restauradores, semelhante a um cotonete. Sendo assim, a aplicação de géis ou hidrogéis de limpeza se torna uma alternativa viável para testar a remoção de sujidades.

Em 2012, o Tween 80 foi relatado na literatura por BAGLIONI, M. et al., 2012, como um surfactante utilizado na composição de uma microemulsão para remoção de revestimento acrílico. Mesmo assim, o uso do Tween 80 não é tão comum como o uso do Triton – X em formulações para limpezas de superfícies.

Neste sentido, as formulações para os hidrogéis foram escolhidas e podem ser conferidas na Tabela abaixo.

Tabela 1: Formulações utilizadas para a preparação dos hidrogéis.

Formulações				
F1	Alginato	Celulose	Tween 80	
F2	Alginato	Celulose	Tween 80	
F3	Alginato	Celulose	Tween 80	TTA
F4	Alginato	Celulose	Tween 80	TTA
F5	Alginato	Celulose		TTA
F6	Alginato	Celulose		TTA

Os hidrogéis foram preparados um a um, sob agitação e aquecimento até a homogeneização da mistura. Após esse processo o conteúdo foi vertido em placa de petri para a posterior reticulação. Uma ilustração da metodologia pode ser vista na Figura 9.

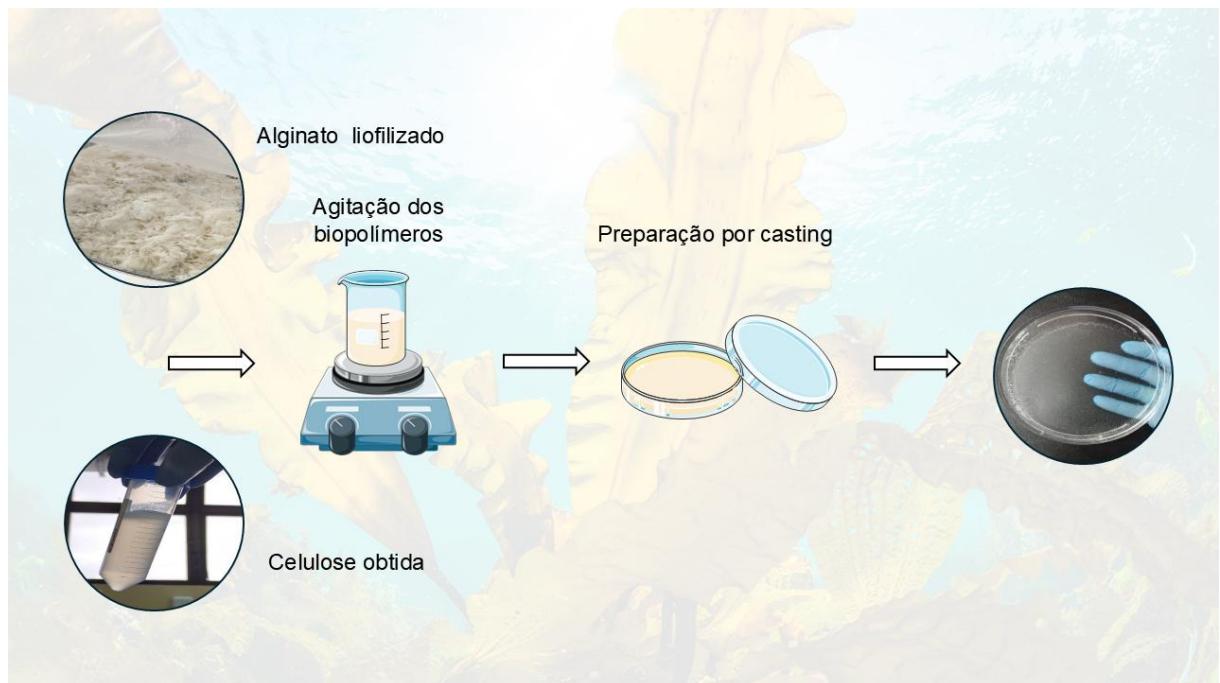


Figura 9: Esquema do processo de preparação dos hidrogéis.

Fonte: Autoria própria (2025).

4.3 Teste de aplicação

A obra de arte escolhida neste trabalho para a aplicação dos hidrogéis de limpeza, foi uma obra do acervo do Museu de Arte do Rio Grande do Sul (MARGS) atingida pela enchente que ocorreu no estado em maio de 2024. Ela e outras pinturas, se encontram no Laboratório de Conservação e Restauração de Pintura (LACORPI) do curso de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis da Universidade Federal de Pelotas. Através de um acordo de cooperação técnica entre o LACORPI e o MARGS, as obras estão em processo de restauração, desde novembro de 2024, sendo desenvolvido por alunos sob a supervisão da restauradora Keli Cristina Scolari e da professora Dra. Andréa Lacerda Bachettini, coordenadora do projeto.

A pintura apresentada aqui é de autoria de Ado Malagoli (1906-1994), que foi um renomado pintor, professor e museólogo brasileiro. Ele foi o idealizador e primeiro diretor do MARGS e teve uma longa carreira como educador de artistas.

Ado começou seus estudos em São Paulo, frequentando escolas como a de Artes e Ofícios, e posteriormente a Escola Nacional de Belas Artes no Rio de Janeiro. Sua produção abrangeu desde obras figurativas de paisagens e tipos populares até fases com mais abstração geométrica (Site Escritório de Arte, 2025).

Além de pintor, foi um importante professor, lecionando por muitos anos no Instituto de Belas Artes do Rio Grande do Sul. Como museólogo, foi o responsável por organizar e estruturar o MARGS, sendo seu diretor a partir da inauguração em 1957.

Em 1982, foi homenageado com o título de Doutor Honoris Causa pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Site Hacer, 2025).

A Figura 10 abaixo, mostra a pintura “A Capela” de Ado Malagoli, após a enchente, usada nesta pesquisa para o teste dos hidrogéis.



Figura 10: Foto da obra “A Capela” de Ado Malagoli.

Fonte: Lacorpi, (2025).

Os primeiros passos para um processo de restauração de pinturas incluem a documentação fotográfica, mapa de danos, como mostrado na Figuras 11a e 11 b, testes de pH e solubilidade e exames para reconhecimento do suporte da obra de arte.

O diagnóstico do estado de conservação é a etapa posterior, neste caso, foi recebido um laudo técnico (em Anexo) do MARGS com o diagnóstico do museu para esta obra.

Logo após, é feita a desmontagem da obra, remoção da tela da moldura e do bastidor e planificação para o início dos processos de restauração.

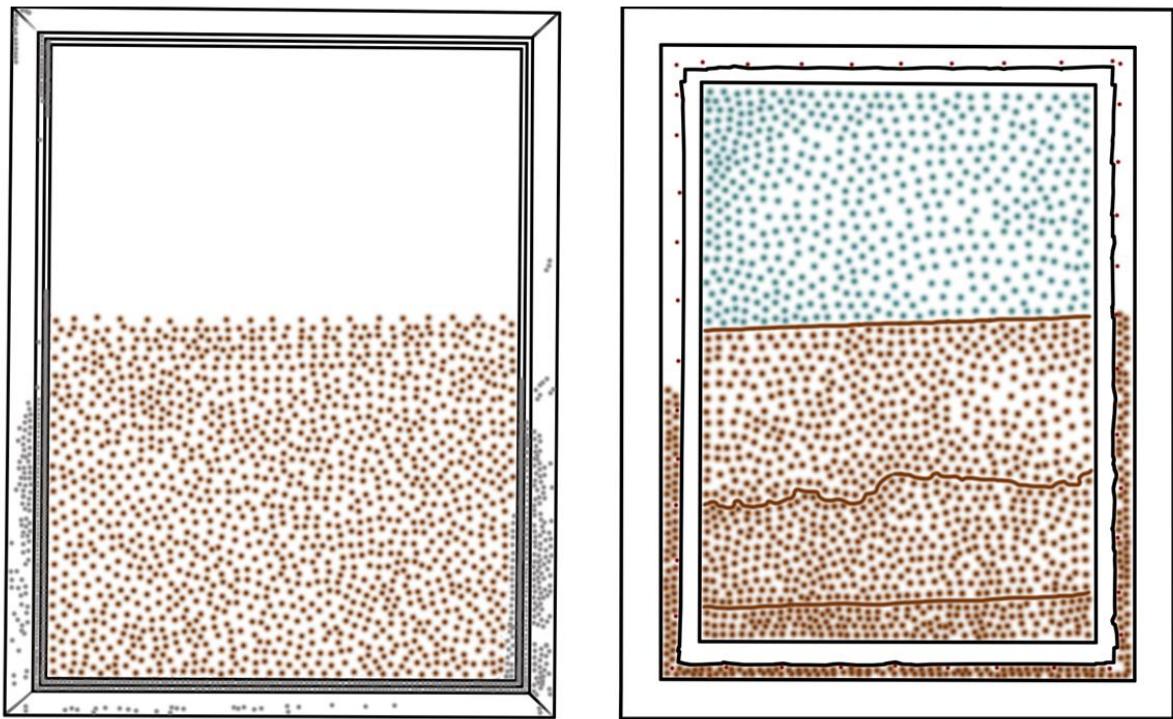


Figura 11a: Mapa de danos.

Fonte: Autoria própria (2025).

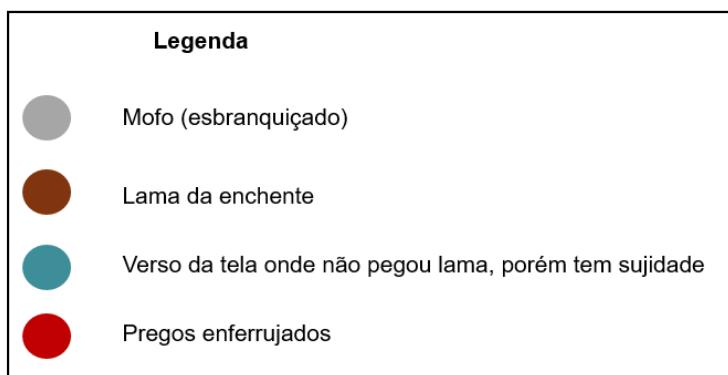


Figura 11b: Legenda do Mapa de danos

Fonte: Autoria própria (2025).

4.3.1 Diagnóstico do estado de conservação

O estado de conservação da obra de Ado Malagoli é considerado médio. A pintura apresentou sujidade devido a enchente em aproximadamente 60% da sua altura. A lama aparece impregnada na camada pictórica e no verso da pintura.

A moldura apresentou manchas esbranquiçadas devido a umidade que atingiu a obra.

5. Caracterizações

Espectroscopia de fluorescência de raios – X por energia dispersiva (EDX)

A análise de EDX foi realizada com o intuito de conhecer os minerais presentes na biomassa da *L. Flavicans*. Além disso, a análise é complementar as outras análises que indicam que a extração do biopolímero alginato foi bem-sucedida. O EDX foi realizado apenas na amostra de alginato extraído para avaliar a eliminação dos minerais e a provável presença do resíduo do reagente da extração, observado em outra análise complementar.

O equipamento utilizado foi um espectrômetro de fluorescência de raios – X por energia dispersiva, marca Shimadzu, modelo EDX-720 em parceria com o Laboratório de Síntese Química de Materiais do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Difração de Raios – X (DRX)

Neste trabalho a técnica foi utilizada para avaliar a eficácia das extrações de alginato e celulose da biomassa de *L. Flavicans*, principalmente para verificar se houve contaminação no processo de extração. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios - X da marca Shimadzu, modelo XRD-6000, localizado no Laboratório Novonano do curso de Engenharia de Materiais da UFPEL. A região de varredura compreendeu de 10° até 60° para os dois biopolímeros. A velocidade da análise foi de 1 (grau/min), tensão de 30 (kV) e corrente de 30 (mA).

A cristalinidade da celulose foi calculada de acordo com os índices de Segal (SEGAL *et al.*, 1959) conforme a Equação:

$$I_C = \frac{I_{200} - I_{am}}{I_{200}} \times 100\%$$

Onde I_{200} refere - se a intensidade máxima da altura do pico de difração e I_{am} é a intensidade de difração para a região amorfa.

Já a cristalinidade do alginato foi calculada com base na área cristalina e na área total, conforme Equação:

$$IC(\%) = \frac{A_{cristalina}}{A_{cristalina} + A_{amorfa}} \times 100$$

Como o alginato não possui picos bem definidos como a celulose, o cálculo do índice de cristalinidade pela área do gráfico se torna mais confiável.

Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

Esta técnica permite a identificação das frequências vibracionais e determinação de grupos funcionais das estruturas das moléculas, através da aquisição dos espectros de absorção na região do infravermelho. A fim de entender as ligações químicas presentes nas amostras, as análises foram feitas na biomassa, nos biopolímeros extraídos e nos padrões comerciais desses biopolímeros. Além disso, também foram analisados os hidrogéis, nas suas diferentes formulações. O equipamento utilizado, foi espectrômetro Shimadzu IRspirit. As leituras foram realizadas com parâmetros de transmitância, com comprimentos de onda de 400 a 4000 cm⁻¹. As análises foram feitas em parceria com o Laboratório de Lípidômica e Bio-Orgânica (LLipBio) do curso de Química Forense da Universidade Federal de Pelotas.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os biopolímeros foram caracterizados por meio de microscopia eletrônica de varredura afim de analisar os materiais morfológicamente. Para a análise de MEV, as amostras dos biopolímeros obtidos foram liofilizadas e depositadas sobre uma placa de silício e recobertas com uma fina camada de ouro (~10 nm).

As imagens de MEV foram feitas com equipamento de microscopia eletrônica da marca Shimadzu, modelo SSX 550, localizado no laboratório Novonano do curso de Engenharia de Materiais da UFPEL.

Microscopia eletrônica de alta resolução (FEG-MEV)

A caracterização da morfológica das amostras de celulose extraída foi ainda caracterizada através de microscopia de alta resolução, com o intuito de avaliar a organização das fibras e o diâmetro. Para as análises, as amostras foram dispersas em álcool etílico absoluto em ultrassom e depositadas sobre fitas condutoras de carbono dispostas sobre porta amostras para a realização da análise. O equipamento utilizado foi o JEOL modelo 7500F do Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista da UNESP.

Microscopia digital

Foi utilizada microscopia digital acoplada ao computador com cabo USB afim de conhecer a superfície e os danos que a obra apresentava. Para isso, foram feitas diversas imagens tanto na frente, na camada pictórica, quanto no verso da tela. O equipamento utilizado foi um microscópio digital com zoom de até 1600x.

Análise Termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica foi realizada para monitorar a estabilidade térmica em relação à mudança de massa em função do tempo e da temperatura, sob condições controladas. Para a análise termogravimétrica foi utilizado um equipamento SDT Q50 da marca TA Instruments, no Laboratório Multusuário de Análise Térmica (LAMAT) no Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Os ensaios foram realizados a partir da temperatura ambiente até 900 °C, a uma taxa de 10 °C/min, sob atmosfera de nitrogênio (N_2) com vazão de 60 mL/min.

Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

Para caracterizar a estrutura química dos biopolímeros, complementando as outras análises, foram feitos espectros de RMN com um equipamento Bruker Avance 400 MHz. As amostras foram dissolvidas em D_2O e os espectros foram obtidos a 70 °C. Uma sequência de pulsos pré-saturação NOESY 1D foi utilizada para suprimir o sinal da água. Os espectros foram adquiridos com uma largura espectral de 4,8 kHz, um tempo de aquisição de 3,4 s, um atraso de relaxação de 12 s e 64 acumulações.

As análises foram feitas no Instituto de Química, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Espectrofotometria de Ultravioleta Visível (UV-VIS)

A fim de avaliar a absorção da amostra de alginato extraído e compará-la com o alginato comercial, foi realizada análise em um espectrômetro de UV-VIS. Foi preparada uma solução aquosa de alginato e analisada. O equipamento utilizado foi um espectrômetro de UV-VIS modelo UV-M51.

Análise de Viscosidade

A caracterização reológica do extrato de alginato e do alginato comercial foi realizada em solução aquosa nas concentrações de 5, 10 e 15mg/mL utilizando o Viscosímetro Brookfield no Laboratório Novonano, no curso de Engenharia de Materiais da UFPel, analisando a viscosidade do fluido e seu torque a partir de diferentes rotações, sendo elas 10, 20, 50 e 100 RPM.

6.Resultados e discussões

Espectroscopia de Fluorescência de Raios – X por dispersão de energia (EDX)

As análises de EDX da biomassa, do alginato comercial e do alginato extraído foram realizadas e podem ser comparadas na figura 12. Em “a” observa-se os inúmeros elementos inorgânicos presentes na biomassa da alga *L. Flavicans*. Em “b” tem-se o resultado obtido com a amostra de alginato comercial e em “c” o resultado obtido com a amostra de alginato extraído. O resultado visto em “c” mostra que o processo de extração foi eficaz, permanecendo apenas com elementos que compõe a estrutura do alginato e eliminando os elementos restantes.

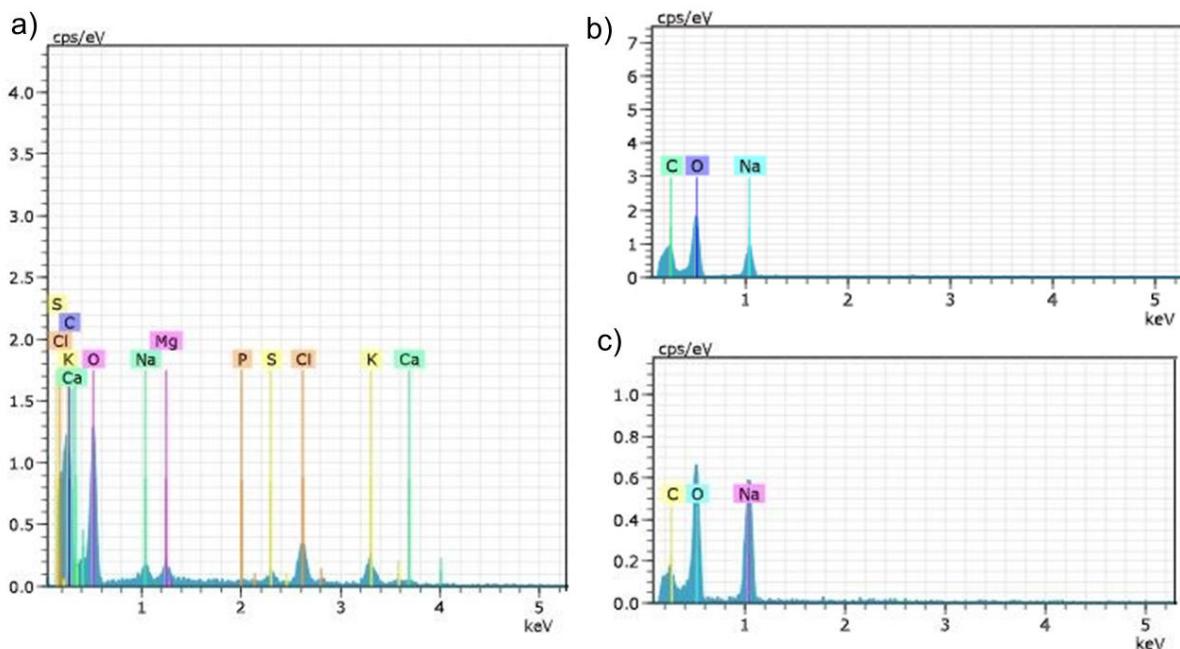


Figura 12: Resultados obtidos nas análises de EDX com as amostras a) biomassa *L. Flavicans*, b) alginato comercial e em c) alginato extraído.

Fonte: Laboratório de Síntese Química de Materiais, UFRN (2023).

Difração de Raios – DRX

Os difratogramas de raios - X dos alginatos, na Figura 13, apresentam perfis característicos de materiais predominantemente amorfo-cristalinos, com picos largos e de baixa intensidade, típico de polímeros com baixa cristalinidade e elevada desordem estrutural (PARK *et al.*, 2024) O índice de cristalinidade da amostra de alginato extraído é de 23,0 %. Os dois picos de difração em 14,08 e 22,08° correspondem às unidades de guluronato (G) e manuronato (M), respectivamente (VILLACRÉS, 2023) em blocos alternados dentro da cadeia polimérica. A ausência de picos bem definidos sugere que a estrutura do material não possui um empacotamento cristalino significativo (ZHANG, X. *et al.*, 2023)

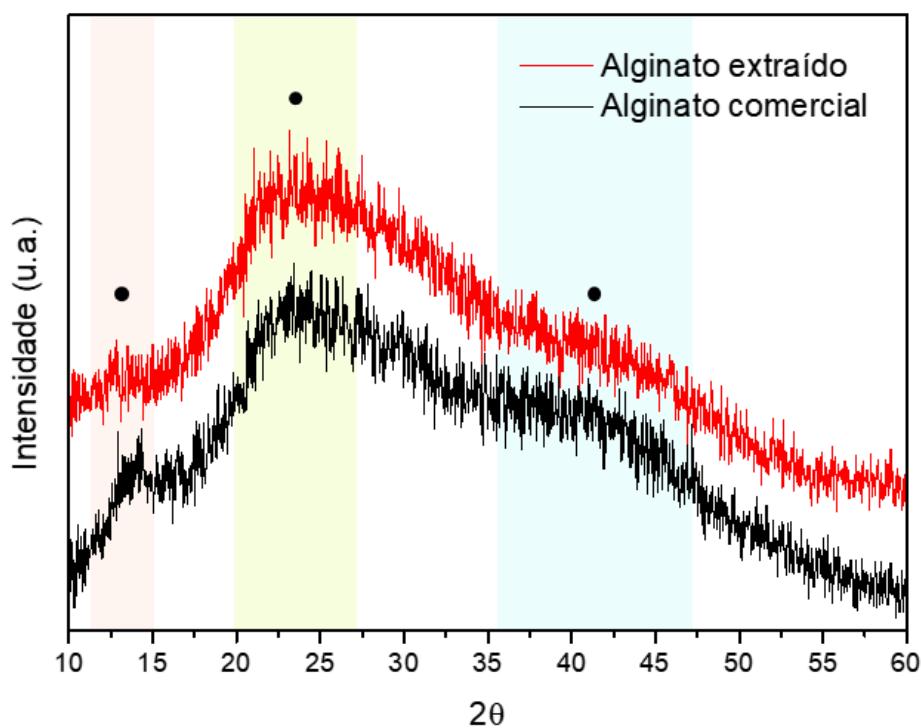


Figura 13: Difratograma do alginato comercial e do alginato extraído da *L. Flavicans*.
Fonte: Autoria própria (2025).

Os difratogramas da celulose são observados na Figura 14, e evidenciam diferenças marcantes entre o material extraído e o comercial, refletindo variações no grau de cristalinidade e no tipo de arranjo cristalino. Para a celulose extraída, o índice de cristalinidade calculado foi de 39,1%.

A celulose comercial apresenta picos bem definidos, com reflexões típicas em 15°, 22° e 34°, atribuídas, respectivamente, aos planos cristalinos (1–10), (110) e (200) da celulose tipo I, estrutura com empacotamento paralelo das cadeias (MORAMARCO *et al.*, 2025). Essa forma cristalina é predominante em celuloses naturais, apresentando elevado grau de ordenamento e forte rede de ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares.

Por outro lado, o difratograma da celulose extraída mostra picos mais alargados e de menor intensidade, indicando uma redução significativa da cristalinidade. Isso ocorre possivelmente devido à desorganização parcial da estrutura cristalina durante o processo de extração, que envolveu etapas químicas capazes de romper as regiões ordenadas, ampliando as regiões amorfas (RAFAT *et al.*, 2025). Essa característica é comum em celuloses obtidas de biomassa após tratamentos de extração e purificação, que tendem a reduzir o índice de cristalinidade devido à remoção de hemiceluloses e lignina, e à consequente exposição e relaxamento das fibrilas (ZHANG *et al.*, 2024).

O pico largo em torno de 22° ainda indica a presença de regiões cristalinas residuais, mas confirma uma estrutura parcialmente amorfa, mais desordenada do que a amostra comercial. Essa menor cristalinidade pode favorecer certas propriedades tecnológicas, como maior capacidade de inchaço e funcionalização química, o que é relevante para aplicações de biopolímeros em filmes e revestimentos sustentáveis.

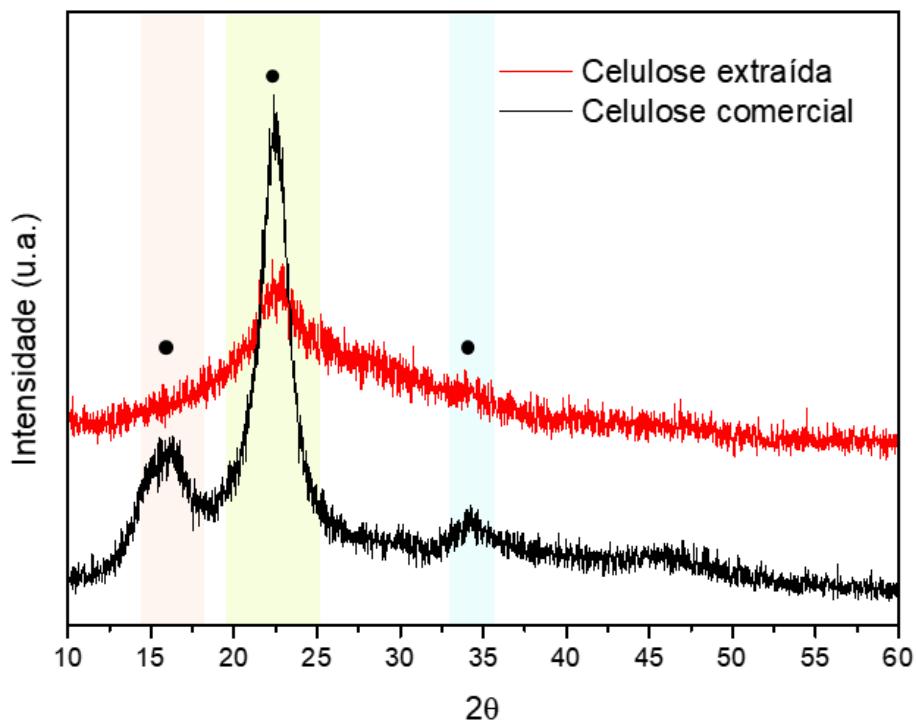


Figura 14: Difratograma da celulose comercial e da celulose extraída da *L. Flavicans*.

Fonte: Autoria própria (2025).

Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

A imagem obtida por MEV mostra a morfologia da biomassa de alga *L. Flavicans* de forma bruta antes do processo de extração de biopolímeros. A análise revelou sua morfologia heterogênea, composta por partículas de diferentes tamanhos e formas irregulares, como pode ser visto na Figura 15 com magnificação de 200x.

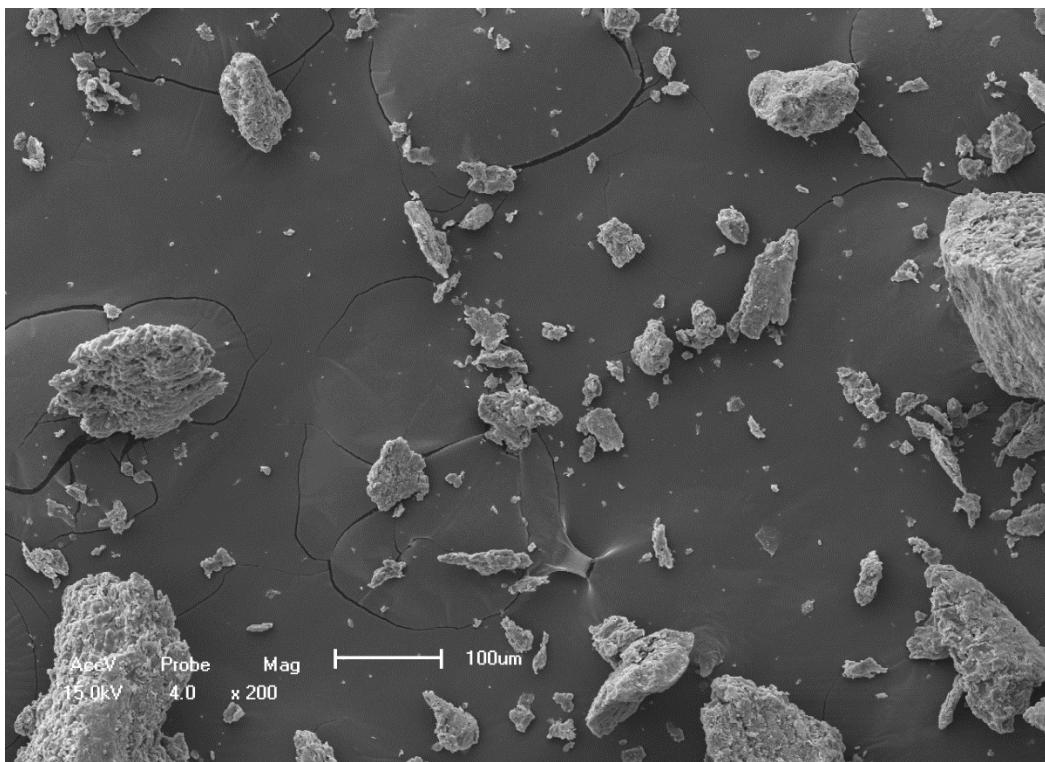


Figura 15: Imagem de microscopia da biomassa de algas.

Fonte: Laboratório Novonano, UFPEL (2023).

A imagem microscópica da amostra de celulose obtida após o processo de extração (Figura 16) revela uma morfologia mais organizada e homogênea em comparação à biomassa in natura. Observam-se fibras alongadas, com aspecto característico de fibrilas de celulose. O aspecto lamelar e as regiões mais lisas são compatíveis com a presença de domínios cristalinos de celulose, enquanto pequenas irregularidades e fragmentos aderidos indicam que ainda há porções amorfas (KUMAR GUPTA *et al.*, 2019; MADHUSHREE *et al.*, 2024)

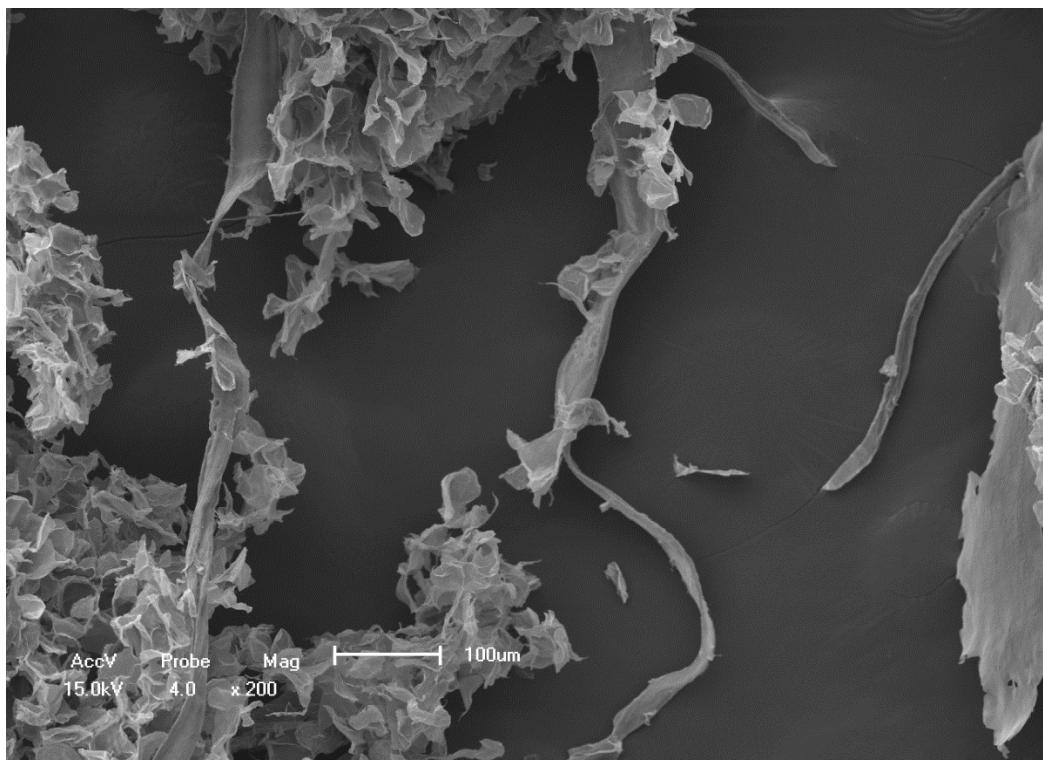


Figura 16: Imagem de microscopia da celulose extraída da *L. Flavicans*.

Fonte: Laboratório Novonano, UFPEL (2023).

A morfologia do hidrogel de alginato e celulose extraídos da *L. Flavicans* foi avaliada por MEV com o intuito de observar a porosidade. Para isso, o material foi congelado, liofilizado e analisado como pode ser visto na Figura 17 abaixo.

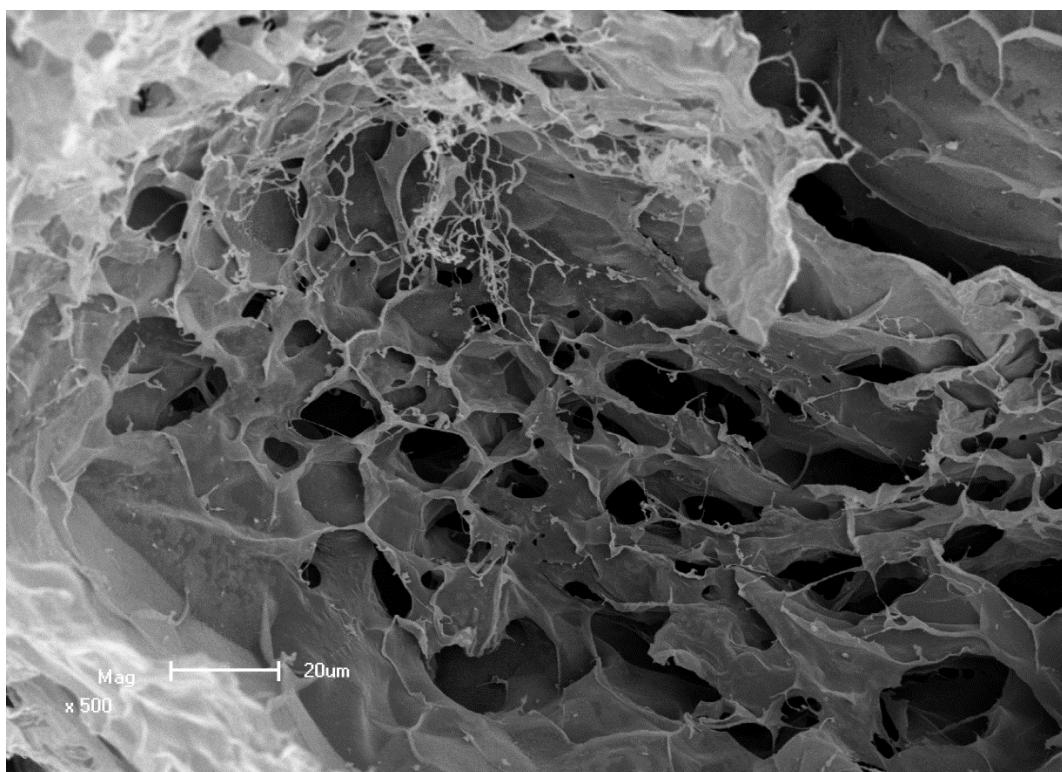


Figura 17: Microscopia eletrônica de varredura do hidrogel de celulose e alginato da *L. Flavicans*.

Fonte: Laboratório Novonano, UFPEL (2024).

Microscopia eletrônica com emissão de campo (MEV-FEG)

A imagem de MEV-FEG revelou uma morfologia fibrilar complexa, com a presença de estruturas entrelaçadas e interconectadas, formando uma rede tridimensional densa. Observa-se uma distribuição heterogênea das fibras, com diâmetros variando em escala nanométrica a micrométrica. Além disso, a presença de filamentos finos e interligados indica uma boa dispersão das microfibras, o que contribui para a formação de uma estrutura porosa, típica de celuloses extraídas a partir de biomassa natural. Essas características morfológicas são coerentes com observações reportadas recentemente na literatura, que descrevem a celulose extraída como apresentando superfície irregular, fibras expostas e estrutura porosa, resultantes do rompimento parcial das ligações interfibrilares durante o processo de purificação (RUBIA, LA *et al.*, 2024). As Figuras 18 e 19 podem ser observadas abaixo.

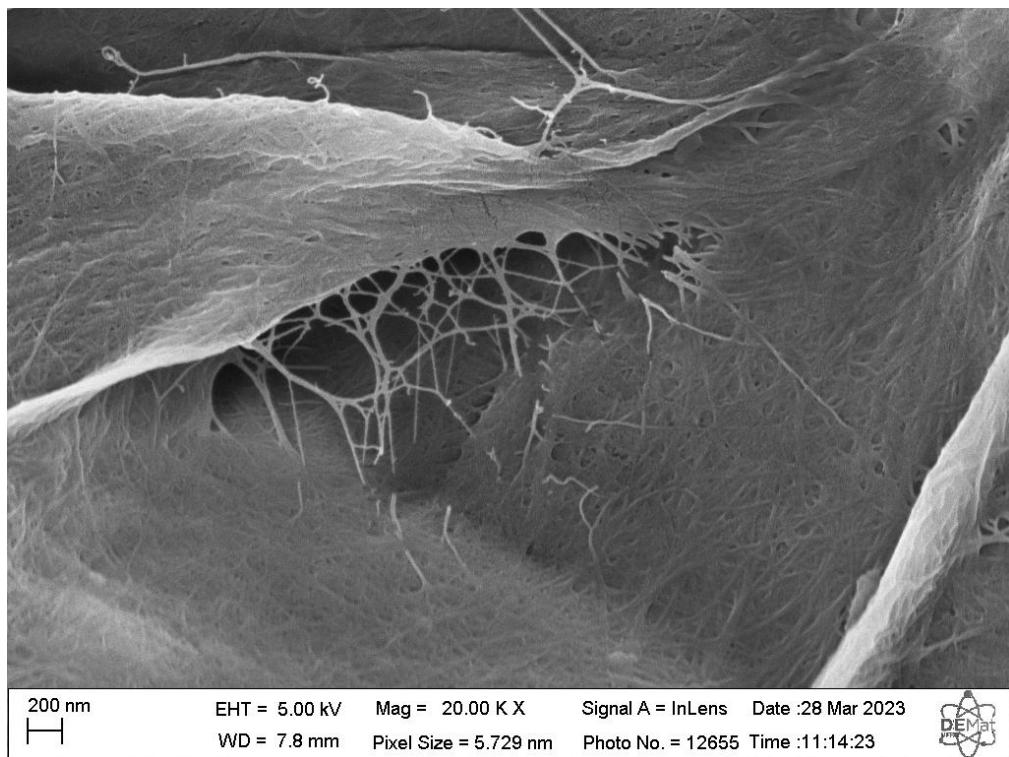


Figura 18: Imagem de FEG da celulose extraída da *L. Flavicans*.

Fonte: Laboratório de Síntese Química de Materiais, UFRN (2023).

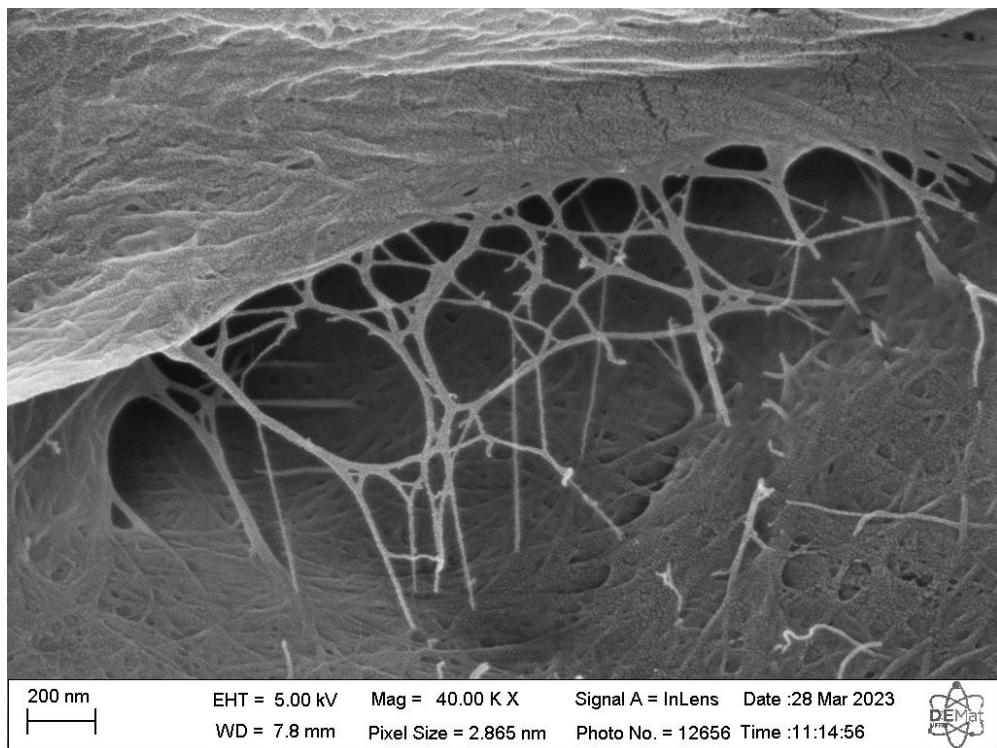


Figura 19: Imagem de FEG, mais aproximada da celulose extraída da *L. Flavicans*.

Fonte: Laboratório de Síntese Química de Materiais, UFRN (2023).

Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

O perfil espectroscópico obtido para as amostras de alginato comercial e alginato extraído revelou as bandas características do polímero de ácido algínico, confirmando a presença dos grupos funcionais típicos desse biopolímero. O espectrograma de ambos os materiais é dominado por uma forte e larga banda de absorção em torno de 3288 cm^{-1} , atribuída à vibração de estiramento do grupo hidroxila ($-\text{OH}$), presente tanto nas unidades monoméricas de ácido manurônico (M) e gulurônico (G), quanto na água fortemente ligada à matriz polimérica (DALAL et al., 2021).

Além disso, observa-se um sinal em 2938 cm^{-1} , associado às vibrações de estiramento ($\text{C}-\text{H}$) de grupos alifáticos, podendo também refletir vibrações ($\text{C}-\text{H}$) ligadas por hidrogênio (TORABI; HAMDAMI; KERAMAT, 2022).

Na região de $1600\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$, duas bandas intensas e bem definidas foram identificadas, uma em $1596\text{--}1624\text{ cm}^{-1}$ e outra em $1410\text{--}1419\text{ cm}^{-1}$. Estas correspondem, respectivamente, aos estiramentos assimétrico e simétrico dos grupos carboxilato ($\text{O}-\text{C}-\text{O}$) presentes nas cadeias de ácido algínico, sendo características

fundamentais do alginato de sódio (TORABI; HAMDAMI; KERAMAT, 2022). A presença de tais bandas confirma a conservação dos grupos carboxilatos após o processo de extração e é indicativa de que o material mantém sua capacidade de reticulação iônica, essencial para aplicações em hidrogéis.

As bandas localizadas entre 1090 e 1030 cm⁻¹ correspondem aos modos vibracionais do estiramento (C–O), C–O–C (ligações glicosídicas) e C–C, os quais refletem a integridade da estrutura do sacarídeo do alginato (DALAL et al., 2021).

A presença de uma banda definida em 1025–1030 cm⁻¹ reforça a atribuição ao grupo C–O, típico das ligações presentes entre as unidades monoméricas do alginato (SMITH et al., 2024).

Em especial, o sinal próximo de 816 cm⁻¹ é atribuído à vibração de deformação C₁–H dos resíduos de ácido β-manurônico, enquanto os picos na faixa de 815–833 cm⁻¹ são relacionados aos resíduos de ácido manurônico (M) (PARK et al., 2024; SMITH et al., 2024). Essas bandas são úteis para distinguir o conteúdo relativo das unidades M e G, uma vez que pequenas variações em sua intensidade refletem diferenças estruturais entre amostras.

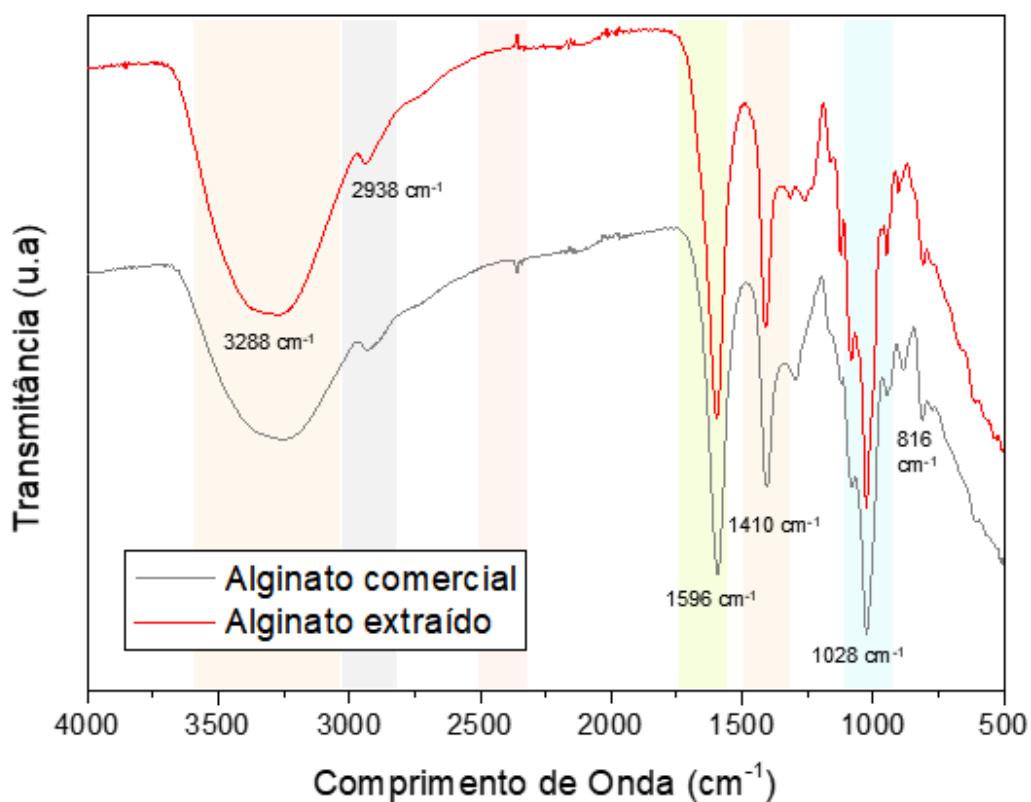


Figura 20: Espectro de infravermelho do alginato.

Fonte: Autoria própria (2025).

Os espectros de FTIR da celulose mostram muitos dos picos característicos para polissacarídeos. As bandas largas em $3500\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ correspondem ao alongamento (O-H) para os grupos hidroxila e as bandas na faixa de $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ correspondem ao alongamento (C-H). A banda em 1420 cm^{-1} e 1315 cm^{-1} correspondem à vibração da (H-C-H) e à vibração da ponta (H-C-H), respectivamente. As bandas acentuadas em torno de $1020\text{--}1050\text{ cm}^{-1}$ correspondem ao alongamento simétrico das ligações (C-O-C) (WAHLSTRÖM et al., 2020).

As bandas características para polissacarídeos são confirmadas pelos picos em $1157,18\text{ cm}^{-1}$ e $1024,94\text{ cm}^{-1}$. (PATRICHET al., 2023).

A banda em 1639 cm^{-1} foi atribuída à água, referente à flexão (O-H) da água adsorvida (JTEL et al., 2019). Na Figura 21 é possível observar os espectrogramas para a celulose extraída e comercial.

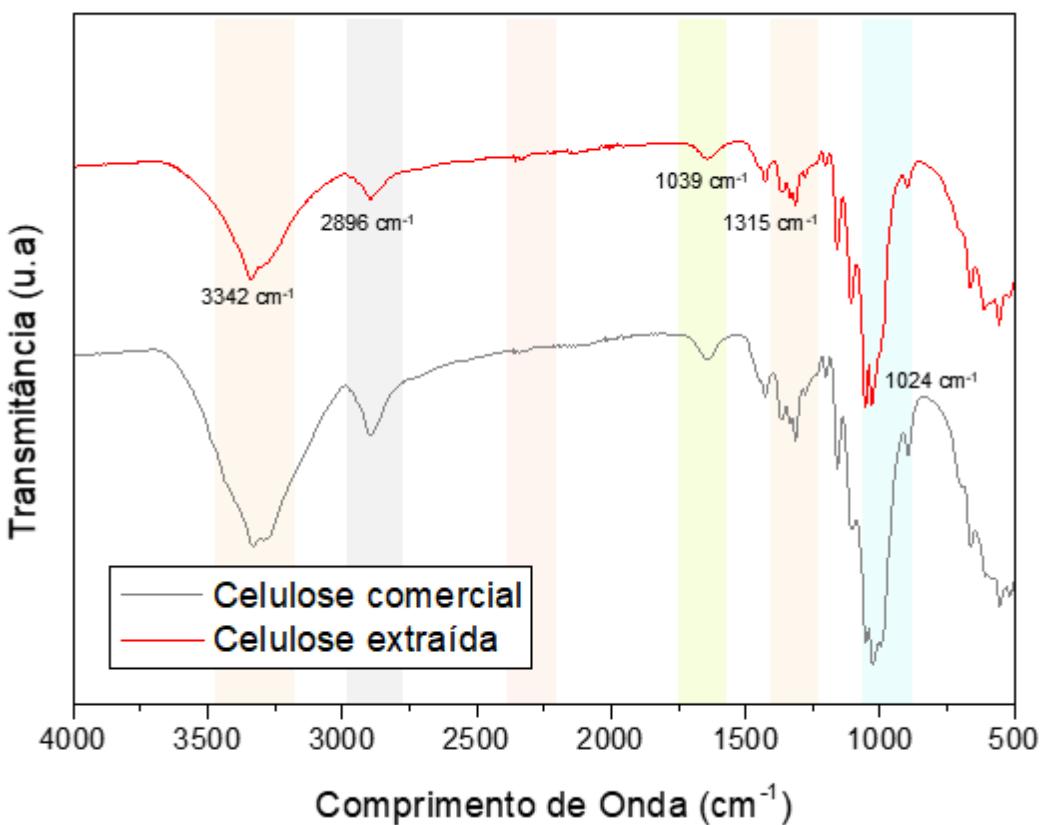


Figura 21: Espectro de infravermelho da celulose.

Fonte: Autoria própria (2025).

A banda larga na região de 3310 cm⁻¹ é atribuída ao estiramento (O–H). Esta banda ampla e intensa é típica de polissacarídeos hidroxilados (alginato e celulose) e da água retida na rede do hidrogel; sua largura indica extensas ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares entre cadeias e com água adsorvida. A presença e comportamento desta banda concordam com trabalhos que combinam nanocelulose/CNF com alginato, onde a banda de (O–H) aparece larga devido à hidratação e às interações hidroxila–hidroxila (RANA et al., 2024; TOFANICA et al., 2024).

A região de 1644 cm⁻¹ é atribuída à vibração associada a grupos carbonila/carboxilato (C=O / COO⁻) do alginato (MOROZKINA et al., 2022).

Em 693 cm⁻¹ a banda é atribuível a modos de deformação da estrutura polissacarídica (C–O–C, C–H). A detecção dessa região, em conjunto com as bandas entre 1000–1200 cm⁻¹ (C–O–C / C–O), confirma a incorporação da celulose (ou

nanocelulose) na matriz do hidrogel. Estudos com CNC/CNF em matrizes de alginato observam bandas semelhantes e atribuem-nos à contribuição vibracional da estrutura glicosídico (HARLEN et al., 2024).

Todas as amostras confirmam a presença de estruturas polissacarídicas (alginato + celulose) e de água retida na matriz (banda O–H) (LAN et al., 2021).

A banda em 1644 cm^{-1} indica grupos carboxilato do alginato envolvidos no sistema; variações relativas dessa banda entre as formulações sugerem diferenças no grau de coordenação com Ca^{2+} (grau de reticulação) (MOROZKINA et al., 2022). Os sinais em 693 cm^{-1} e na região entre 1000 – 1200 cm^{-1} confirmam a incorporação da fração celulósica e são compatíveis com o papel da celulose como reforço estrutural da matriz (HARLEN et al., 2024).

O espectro de FTIR dos hidrogéis pode ser observado na Figura 22, abaixo.

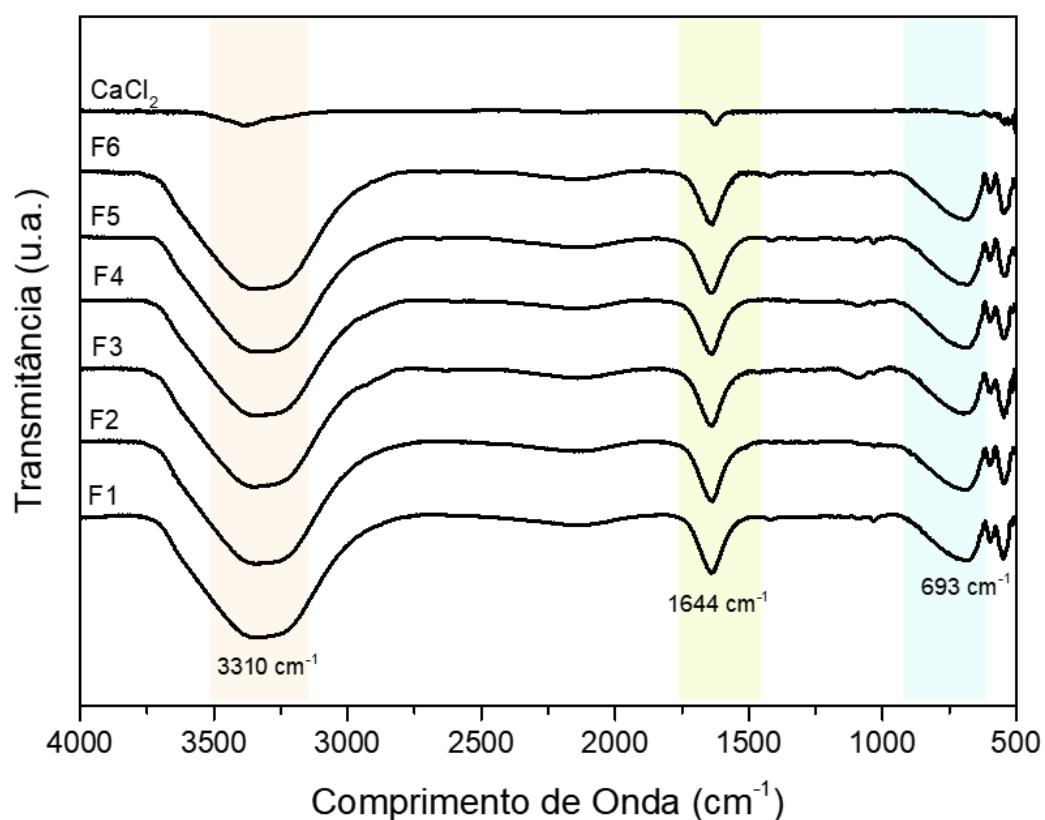


Figura 22: Espectro dos hidrogéis.

Fonte: Autoria própria (2025).

Análise Termogravimétrica (TG)

A primeira etapa da análise termogravimétrica observada, até aproximadamente 150 °C, corresponde à eliminação de água adsorvida e umidade residual presente no material, representando uma perda de massa em torno de 5 a 10%. (KULIG et al., 2023).

A segunda etapa, entre 200 °C e 300 °C, está associada à decomposição térmica dos grupos orgânicos constituintes da cadeia polimérica do alginato, principalmente a quebra das ligações glicosídicas e a liberação de compostos voláteis como CO₂ e H₂O. Essa região é caracterizada pelo principal pico de degradação na curva DTG, em torno de 250 °C, indicando o ponto de maior taxa de decomposição. Essa faixa de degradação está de acordo com estudos com alginato puro, que identificaram uma degradação inicial entre ~225-251 °C (ABDELLATIF SOLIMAN; SANAD; SHALAN, 2021; KULIG et al., 2023)

A partir de 400 °C, observa-se uma perda de massa mais lenta e contínua, relacionada à carbonização do material e à formação de resíduos inorgânicos, resultando em um resíduo final entre 10 e 20%, provavelmente associado à presença de sais minerais (Ca²⁺, Na⁺) comumente encontrados em alginatos. (SANTOS ARAÚJO, DOS et al., 2019)

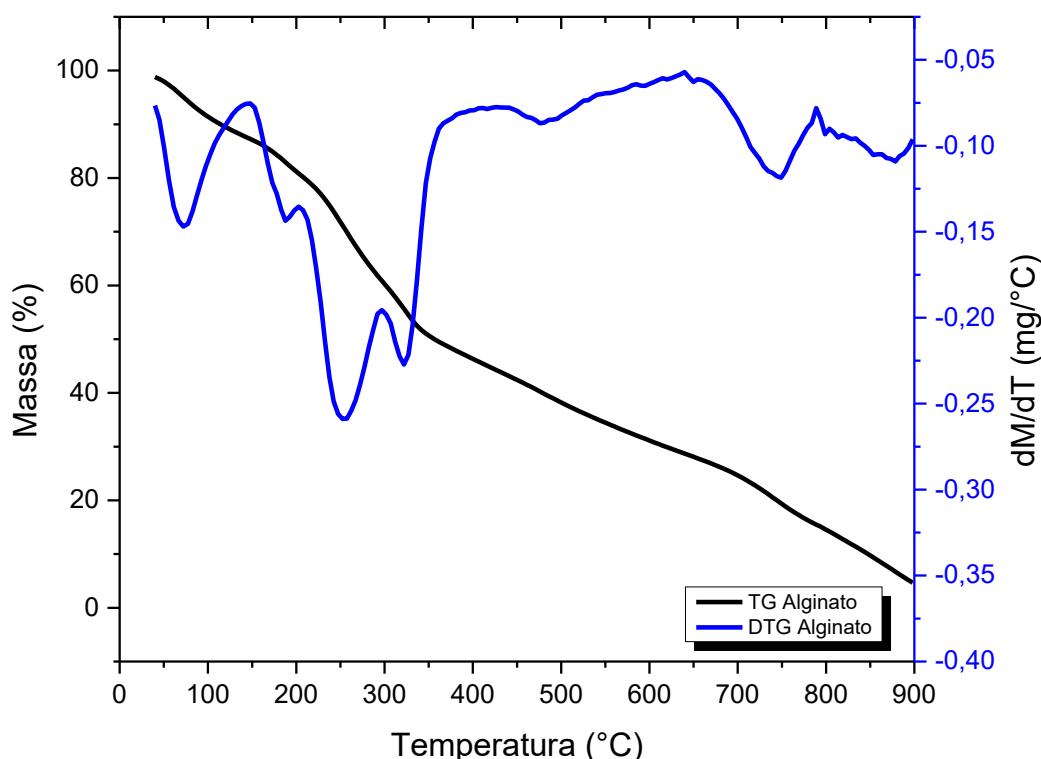


Figura 23: TG/DTG do alginato extraído da alga *L. Flavicans*.

Fonte: Autoria própria (2025).

Em ambas as amostras, observa-se uma pequena perda de massa inicial até aproximadamente 120 °C, atribuída à eliminação da umidade adsorvida.

A etapa principal de degradação ocorre entre 250 °C e 380 °C, correspondente à decomposição da estrutura celulósica, com a quebra das ligações β -1,4-glicosídicas e formação de gases voláteis e resíduos carbonosos. Em estudos com celulose isolada, foi observado que as temperaturas de pico de DTG variam entre ~320 °C e ~360 °C conforme cristalinidade ou composição de hemicelulose (POLETTI et al., 2012; SHARMA; VARMA, 2014).

O pico máximo de degradação ($T_{máx}$) ocorre por volta de 350 °C para a celulose comercial, e entre 320 °C e 340 °C para a celulose extraída, indicando que a amostra extraída apresenta ligeiramente menor estabilidade térmica, como pode ser visto na Figura 24.

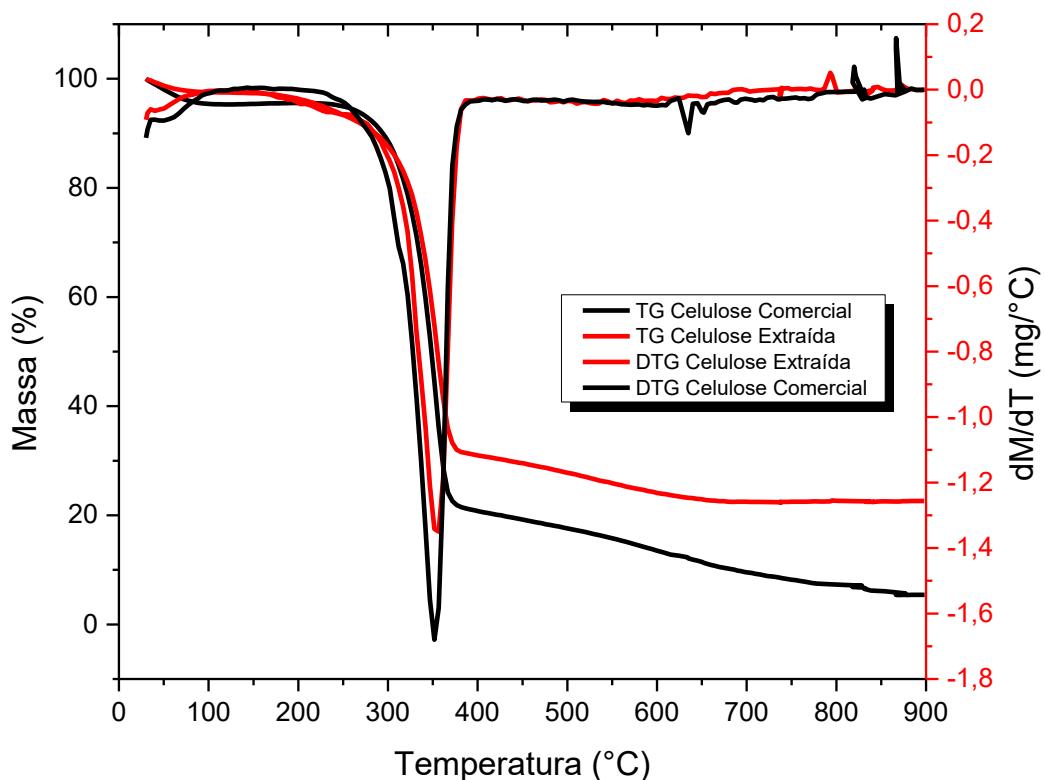


Figura 24: Resultado da análise de TG/DTG das amostras de celulose comercial e extraída da alga *L. Flavicans*.

Fonte: Autoria própria (2025).

Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

A extração de alginato da alga *Lessonia* foi eficaz, pois seu espectro de RMN de ^1H apresenta os mesmos sinais do alginato comercial, como pode ser observado nas Figuras 25 e 26.

Para o alginato *Lessonia*, os picos em 5,45 ppm e 4,85 ppm são devidos a H1 e H5 do guluronato G em um bloco homopolimérico, e o pico em 5,06 ppm é atribuído ao H1 do manuronato M. Esta região é bem caracterizada e tem sido usada como base para a determinação da sequência do ácido algínico (GRASDALEN, 1983; SALOMONSEN et al., 2009). Os demais sinais foram atribuídos de acordo com a literatura: G3 e M2 a 4,53 ppm; G2 e M4 a 4,38; M3 e M5 a 4,15 e 4,14 ppm.

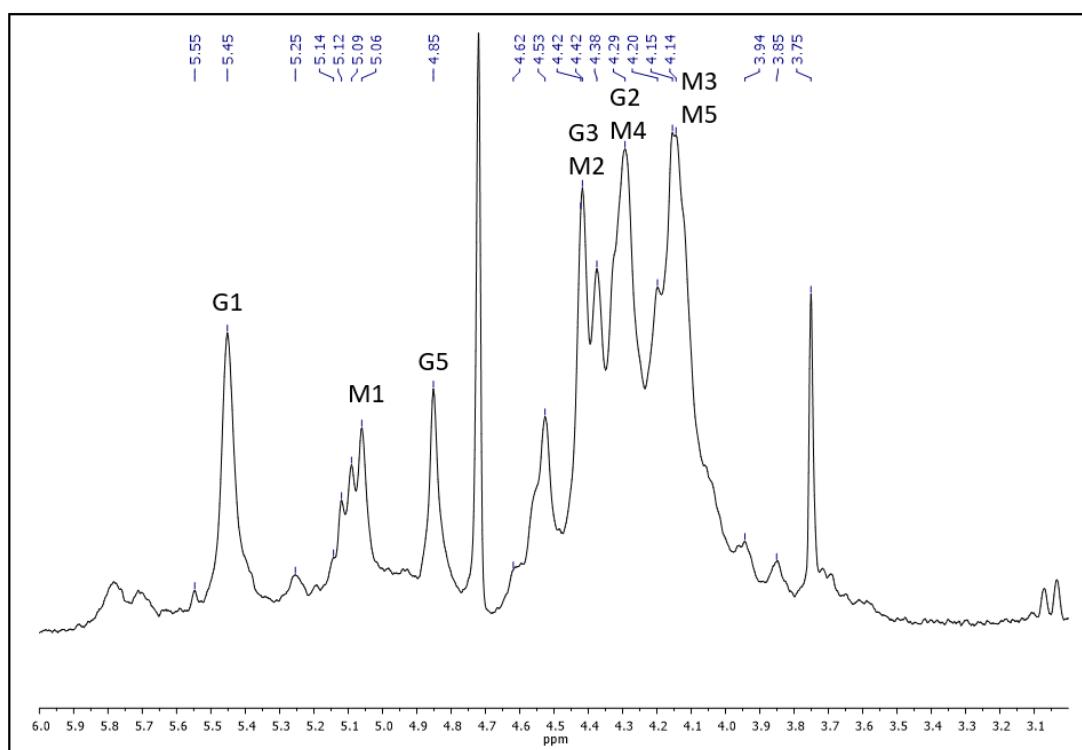


Figura 25: RMN amostra alginato extraído da *L. Flavicans*.

Fonte: Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2024).

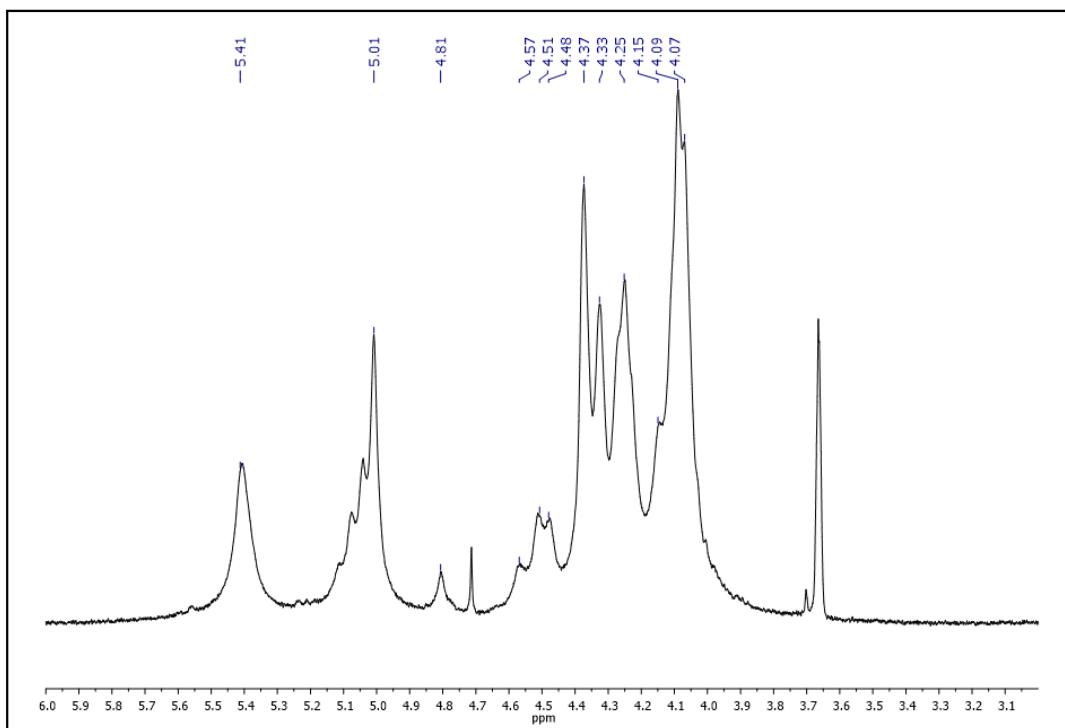


Figura 26: RMN amostra alginato comercial.

Fonte: Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2024).

O espectro de ^{13}C -CP-MAS apresenta diversos sinais devido aos seus constituintes químicos típicos, como proteínas, lipídios, polissacarídeos e ácido urônico (VEGA; TOLEDO, 2018; ZOU *et al.*, 2019). Como há sobreposição entre as ressonâncias desses compostos, as atribuições foram feitas por regiões de deslocamentos químicos: CH₂ e CH₃ alifáticos (15-40 ppm), carboidratos (60-90 ppm), carbonos anoméricos de carboidratos (95-110 ppm), C=C olefínico e aromático (110-160 ppm) e C=O de proteínas e lipídios (170-225 ppm) (AKHTER *et al.*, 2016). Os sinais no espectro da celulose obtidos após o processo de extração, correspondendo aos seis átomos de carbono no anel de anidroglicose: C1 a 104 ppm; C2, C3 e C5, um grande sinal centrado em 72 ppm; C4 a 87 e 82 ppm, e C6 como um ombro em 60 ppm (ATALLA *et al.*, 1980; LARSSON; WICKHOLM; IVERSEN, 1997). A divisão das ressonâncias relacionadas aos carbonos C6 e C4 está associada às fases cristalina e amorfã das celuloses (LARSSON; WICKHOLM; IVERSEN, 1997). Embora o sinal C6 seja alto, a cristalinidade da celulose pode ser avaliada pelos sinais C4, com o sinal em 87 atribuído à fase cristalina e o sinal em 83 à fase amorfã.

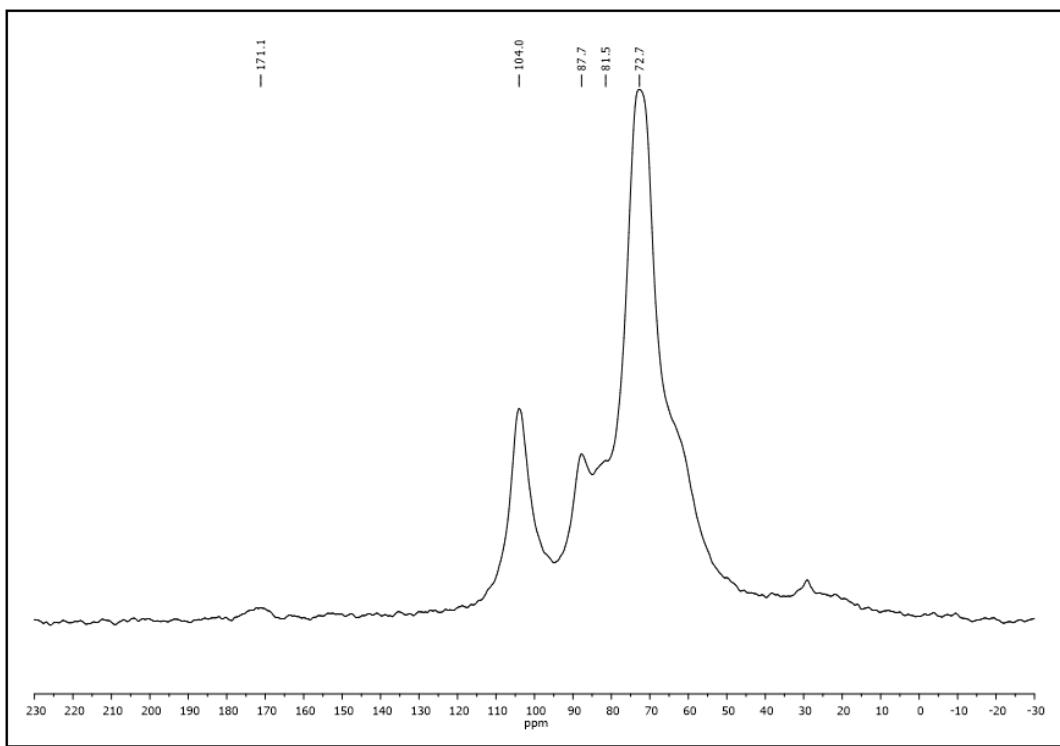


Figura 27: RMN amostra celulose extraída da *L. Flavicans*.

Fonte: Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2024).

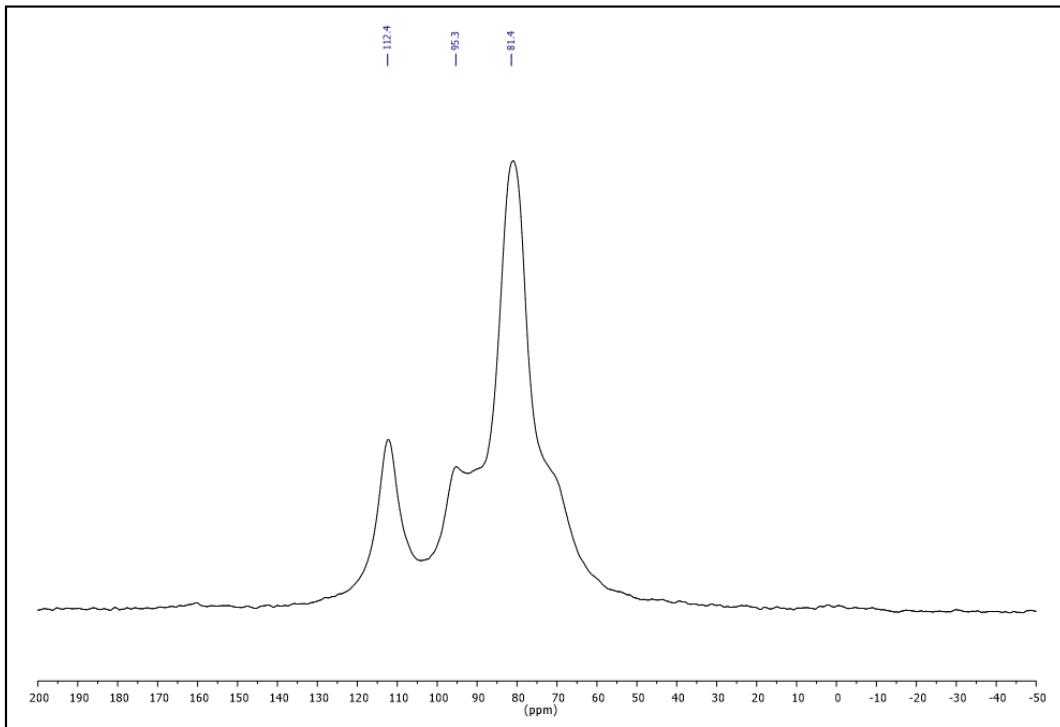


Figura 28: RMN amostra celulose comercial.

Fonte: Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2024).

Espectrofômetro de Ultravioleta-Visível (UV-VIS)

A Figura 29 apresenta os espectros de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-Vis) para o alginato extraído e para o alginato comercial, obtidos na faixa de 150 a 550 nm. Observa-se que ambos os materiais exibem comportamento espectral semelhante, caracterizado por um máximo de absorbância em torno de 200 nm, seguido de uma redução acentuada na absorbância com o aumento do comprimento de onda (DALAL *et al.*, 2021).

Esse perfil é característico de polissacarídeos contendo grupos funcionais oxigenados, como os grupos carbonila ($C=O$) e hidroxila ($C-O-H$), presentes nas unidades monoméricas de ácido manurônico (M) e ácido gulurônico (G) que constituem o alginato.

Apesar das diferenças de intensidade, o perfil espectral de ambos os materiais é notavelmente similar, indicando que o alginato extraído apresenta composição e estrutura química comparáveis às do alginato comercial. Essa semelhança confirma a eficiência do método de extração empregado, evidenciando que o processo adotado foi capaz de isolar um polímero com propriedades espectroscópicas equivalentes às do material de referência.

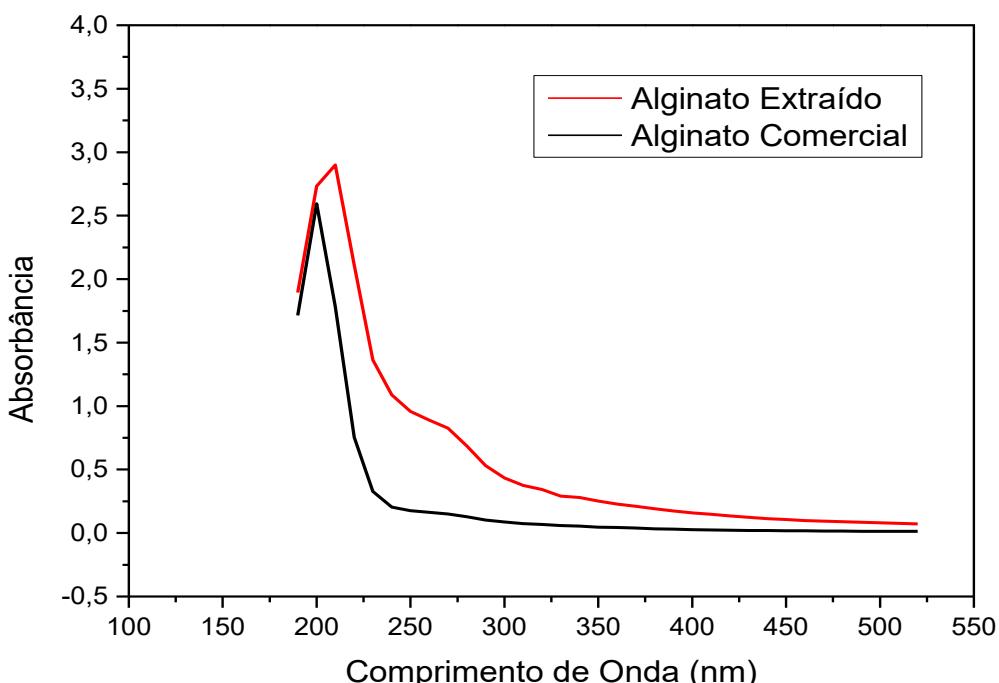


Figura 29: Resultado da análise de UV-VIS do alginato.

Fonte: Autoria própria (2025).

Análise de Viscosidade

A Figura 30 apresenta a variação da viscosidade aparente das soluções aquosas de alginato comercial (C) e alginato extraído (E) em diferentes concentrações (5, 10 e 15 mg/mL), em função da velocidade de rotação (RPM) do viscosímetro.

Observa-se que, para todas as amostras, a viscosidade diminui com o aumento da velocidade de rotação, comportamento típico de fluidos não newtonianos do tipo pseudoplástico. Esse tipo de fluido apresenta redução da viscosidade aparente sob cisalhamento crescente, fenômeno conhecido como afinamento por cisalhamento, comum em soluções poliméricas devido ao desalinhamento e orientação das cadeias macromoleculares na direção do fluxo (TOIGO *et al.*, 2021)

Comparando-se as amostras comerciais e extraídas, verifica-se que o alginato comercial (C) apresentou viscosidades mais elevadas em todas as concentrações analisadas, o que pode estar relacionado a um maior peso molecular médio e/ou a uma maior proporção de blocos de ácido gulurônico (G), responsáveis por maior rigidez da cadeia polimérica e consequente aumento da viscosidade (ABKA-KHAJOUEI *et al.*, 2022; UREÑA *et al.*, 2024)

Por outro lado, o alginato extraído (E) exibiu valores de viscosidade inferiores, embora siga a mesma tendência de decaimento com o aumento da taxa de cisalhamento. Essa diferença pode ser atribuída a possíveis degradações parciais durante o processo de extração ou purificação, levando à redução do comprimento das cadeias poliméricas e, consequentemente, à diminuição da resistência ao escoamento (BOJORGES *et al.*, 2023).

Nota-se também que a viscosidade aumenta proporcionalmente à concentração da solução para ambos os materiais, comportamento esperado, uma vez que maiores concentrações de polímero promovem maior interação entre as cadeias, resultando em soluções mais viscosas (TOIGO *et al.*, 2021).

Os resultados indicam que tanto o alginato comercial quanto o alginato extraído apresentam comportamento reológico semelhante, característico de polímeros pseudoplásticos. No entanto, o alginato comercial demonstra viscosidades superiores, sugerindo maior integridade estrutural e peso molecular, enquanto o alginato extraído mantém propriedades reológicas compatíveis, evidenciando a eficácia do processo de extração, ainda que com pequenas diferenças associadas à pureza e ao grau de polimerização (UREÑA *et al.*, 2024).

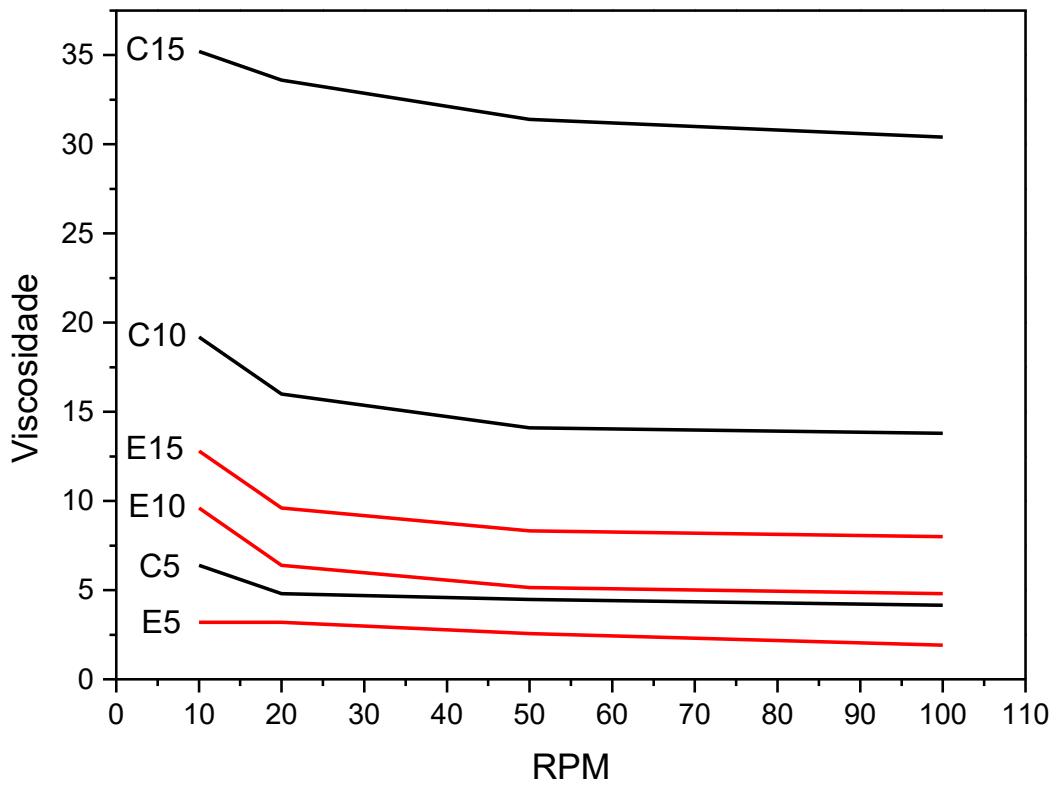


Figura 30: Resultado da análise de viscosidade do alginato.

Fonte: Autoria própria (2025).

Teste de aplicação

Exame com microscópio digital para a avaliação da camada pictórica

A utilização do microscópio digital para a avaliação da camada pictórica e do suporte têxtil é de grande importância. Através desta análise são identificados craquelês, partes faltantes, microorganismos ou detalhes importantes que não podem ser vistos a olho nu. Na Figura 31 abaixo, é possível observar o acúmulo de lama na superfície da pintura após a enchente.



Figura 31: Detalhe da lama na superfície da pintura.

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 32, é possível perceber um detalhe da assinatura do artista coberta por lama e um detalhe de um craquelê.



Figura 32: Detalhe da lama na assinatura do artista.

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 33, observam-se detalhes da pincelada do artista e o acúmulo de tinta na camada pictórica. Nestes pontos não foi encontrada a lama.

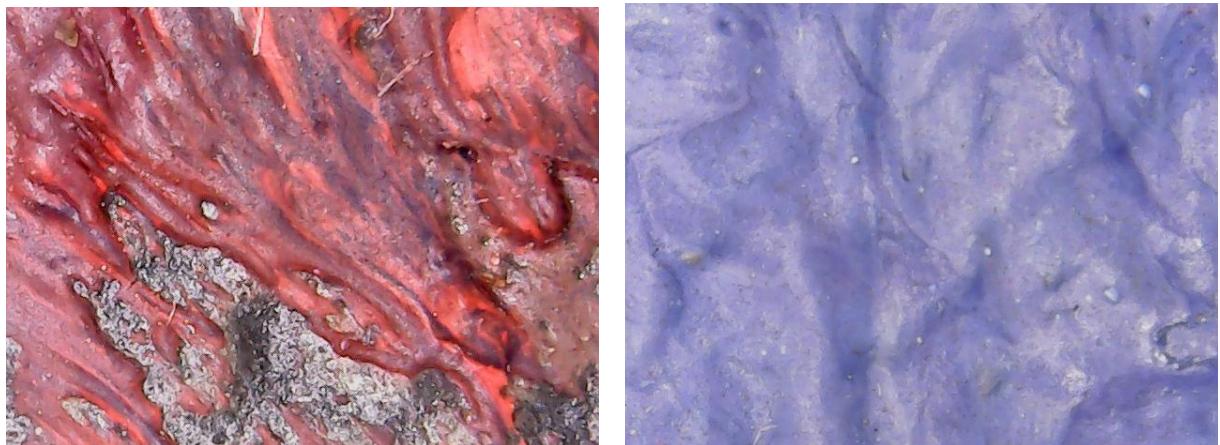


Figura 33: Detalhe das pinceladas do artista.

Fonte: Autoria própria (2025).

Teste de molhabilidade e medição de pH

Após fazer o reconhecimento da obra através da microscopia digital, é de fundamental importância fazer teste de molhabilidade, para analisar se a tela irá absorver a umidade e se as tintas irão solubilizar. Além disso, é realizado teste de pH na frente e no verso da obra, para verificar acidez ou alcalinidade. Na Figura 34 abaixo, observa-se uma gota aplicada em diferentes regiões da obra.

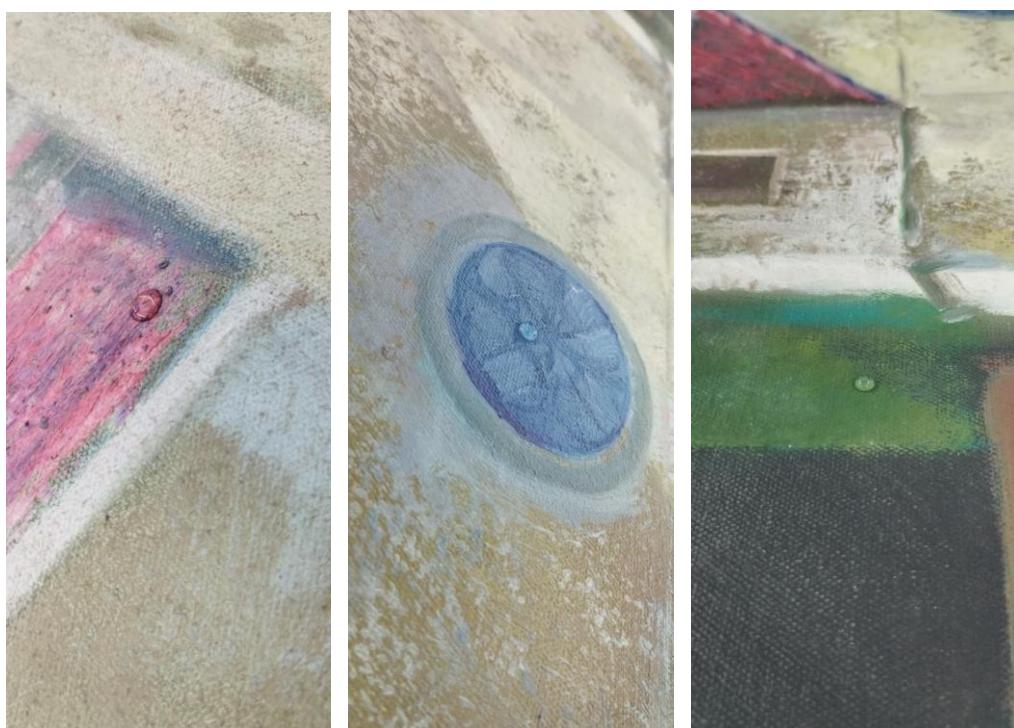


Figura 34: Observa-se uma gota aplicada em diferentes regiões da obra.

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 35, pode-se observar o mesmo teste sendo feito no verso da obra e a medição do pH, na frente, feito no canto esquerdo superior da pintura. O resultado da medição do pH tanto da frente quanto no verso, foi entre 6 e 7.



Figura 35: Observa-se uma gota aplicada no verso e o teste de pH.

Fonte: Autoria própria (2025).

Aplicação dos hidrogéis da obra

Após todos os testes necessários, com resultados seguros quanto à solubilidade, foi possível iniciar a aplicação dos hidrogéis. Nas Figuras 36 e 37 e 38 pode-se analisar a iniciação da aplicação, pelo verso da obra.



Figura 36: Foto da aplicação do hidrogel.

Fonte: Lacorpi (2025).

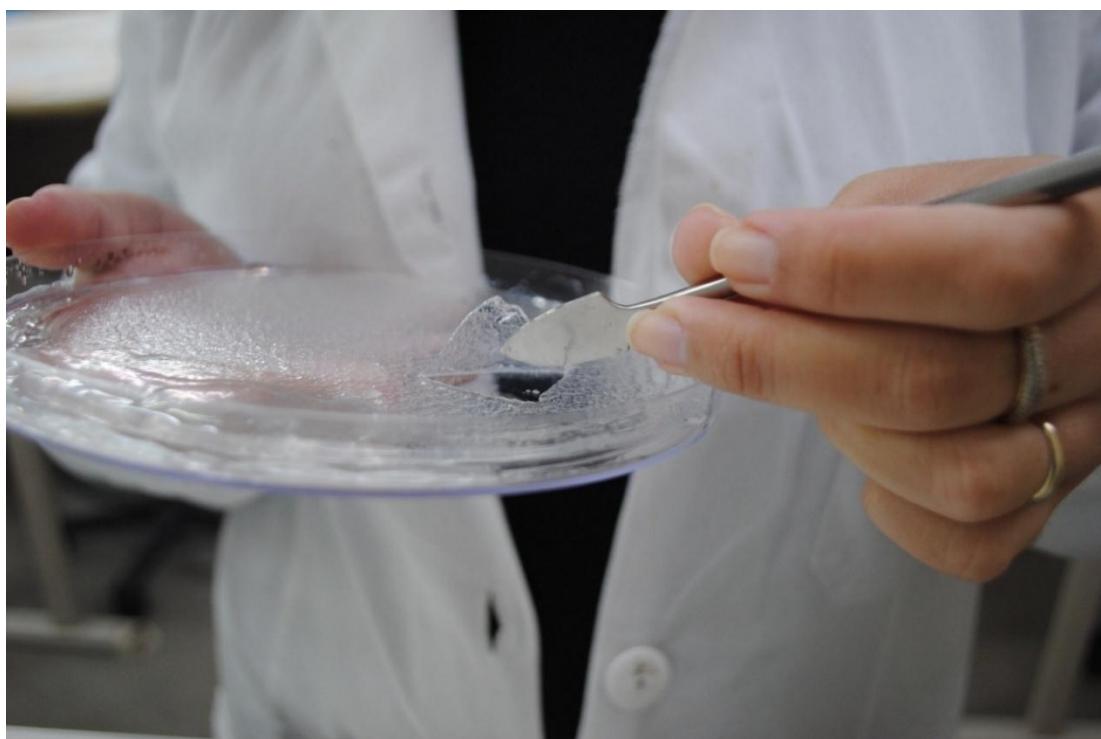


Figura 37: Foto da aplicação do hidrogel.

Fonte: Lacorpi (2025).



Figura 38: Foto da aplicação do hidrogel.

Fonte: Lacorpi (2025).

Alguns dos lugares escolhidos foi a borda da tela, pelo fato de ser uma região com lama, mas também pela segurança da aplicação. Na Figura 39 é possível observar.

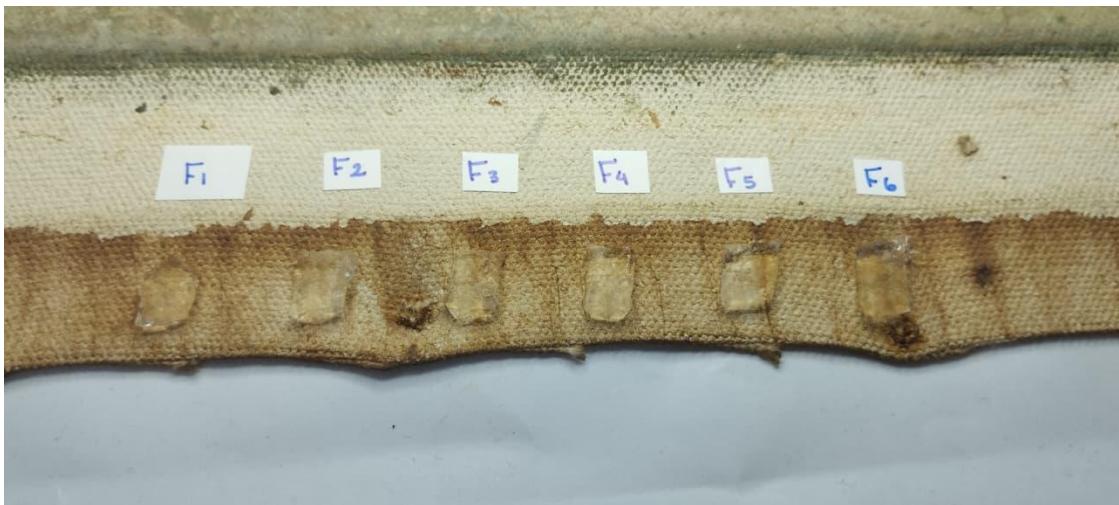


Figura 39: Aplicação dos hidrogéis na obra.

Fonte: Lacorpi (2025)

Na Figura 40, observa-se a localização do teste e também o resultado. É notável que a amostra F4 removeu melhor a sujidade da borda da pintura. Após a aplicação do hidrogel, com tempo de 5 a 10 minutos, a área foi seca com swab com a mínima força aplicada. As amostras F3 e F6 não tiveram tão bom resultado.



Figura 40: Resultado da aplicação dos hidrogéis na obra.

Fonte: Lacorpi (2025).

Na Figura 41, pode-se observar os hidrogéis aplicados em outra área da tela, porém ainda na borda. Neste ponto F1, F2 e F4, tiveram melhor desempenho.

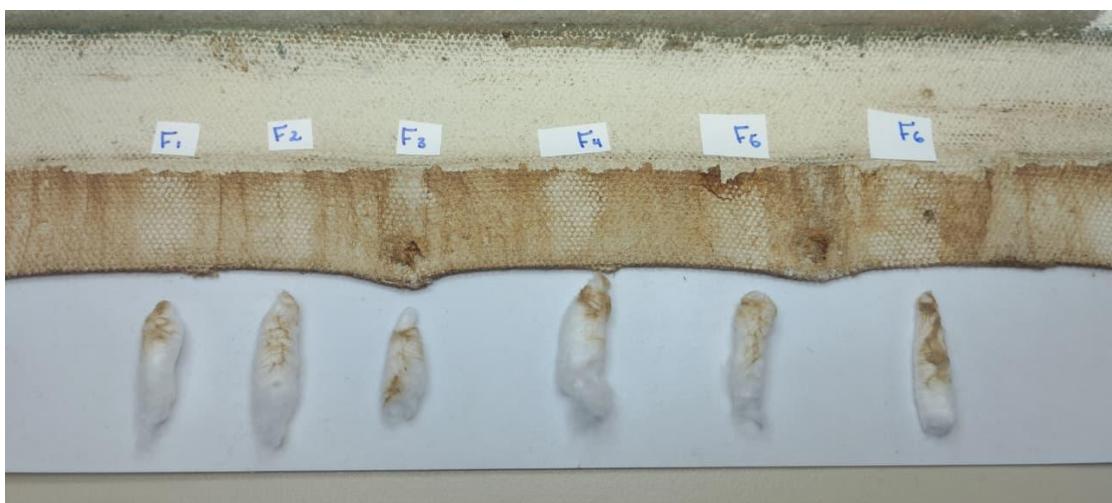


Figura 41: Resultado da aplicação dos hidrogéis na obra.

Fonte: Lacorpi (2025).

Os hidrogéis foram aplicados na frente da obra, bem próximo a borda, como pode ser visto na Figura 42. Após a aplicação, coloca-se um papel absorvente para

não deixar a superfície com umidade em excesso, como pode ser observado na Figura 43.

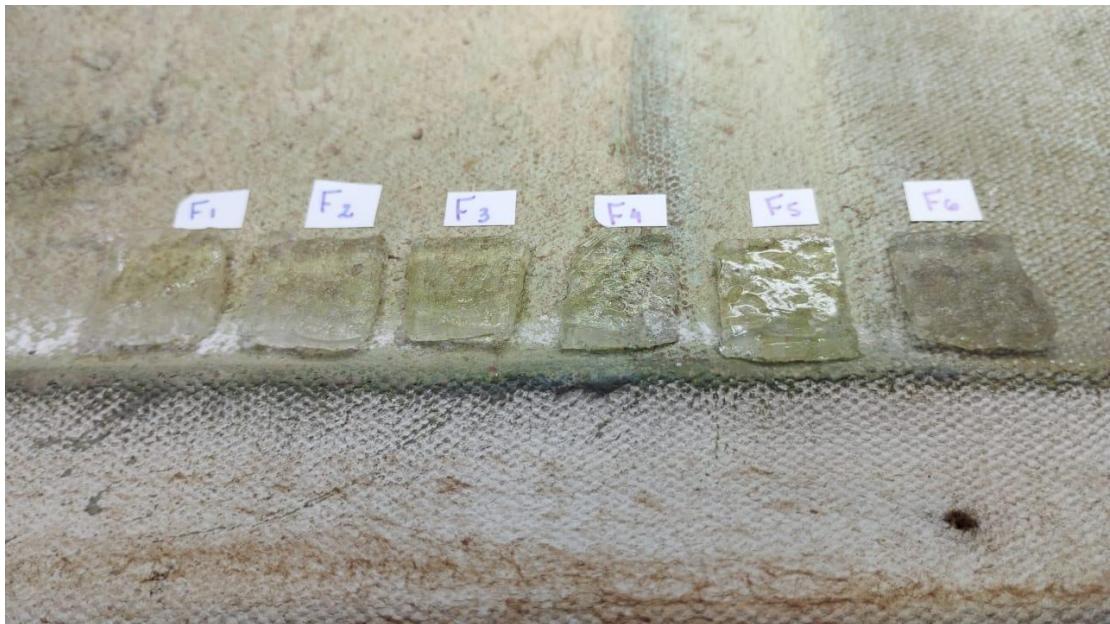


Figura 42: Aplicação dos hidrogéis na frente da obra.

Fonte: Lacorpi (2025).



Figura 43: Absorção da umidade após o teste.

Fonte: Lacorpi (2025).

O resultado da aplicação nessa região pode ser visto na Figura 44, onde F3 e F4 tiveram melhor desempenho, seguido de F1 e F2.

Na Figura 45, vê-se a aplicação no verso da obra e na Figura 46, o resultado obtido, onde F1, F2 e F3 tiveram melhor comportamento para a remoção da lama.



Figura 44: Resultado da aplicação dos hidrogéis na frente da obra.

Fonte: Lacorpi (2025).



Figura 45: Aplicação dos hidrogéis na frente da obra.

Fonte: Lacorpi (2025).



Figura 46: Aplicação dos hidrogéis no verso da obra.

Fonte: Lacorpi (2025).

As Figuras 47 e 48 são referentes a outra localização testada, ainda no verso da tela.

Novamente, F1, F2 e F3 apresentaram melhor resultado.



Figura 47: Aplicação dos hidrogéis na frente da obra.

Fonte: Lacorpi (2025).



Figura 48: Aplicação dos hidrogéis na frente da obra.

Fonte: Lacorpi (2025).

Na Figura 49, tem-se a microscopia do verso da tela, em um detalhe do suporte após a aplicação do hidrogel. Nota-se a diferença entre a imagem da esquerda e a imagem da direita.



Figura 49: Imagem microscópica digital do verso da tela com lama, à esquerda e sem lama, à direita.

Fonte: autoria própria (2025).

7. Considerações finais

A extração de celulose e alginato da biomassa de algas, se mostrou eficiente em um processo simplificado, minimizando a utilização de reagentes tóxicos.

Os índices de cristalinidade se mostraram menores do que os padrões comerciais, contudo, os biopolímeros obtidos não apresentaram contaminação.

A biomassa de algas marinhas é uma alternativa promissora para a aplicação em hidrogéis aplicados a higienização de pinturas.

Notou-se que os hidrogéis com maior volume de surfactante tiveram uma maior eficácia na remoção da lama na superfície da pintura, na frente da obra. Contudo, no verso, F1, F2 e F3 tiveram melhor comportamento, sendo apenas a F3 a amostra combinada com dois surfactantes.

O uso dos hidrogéis derivados de biopolímeros de macroalgas se justificam porque eles proporcionam a umidade necessária para a remoção da lama, sem a necessidade de usar maior força e atrito com o *swab*. Isso é extremamente necessário quando se trata de pinturas com camadas pictóricas fragilizadas.

No contexto da presente pesquisa, o aproveitamento conjunto de alginato e celulose mostrou-se estratégico, pois ambos os polímeros apresentam complementaridade funcional: o alginato confere viscosidade e capacidade de gelificação iônica; a celulose atua como agente estrutural e de reforço mecânico. Essa combinação resulta em géis híbridos com propriedades reológicas ajustáveis, ideais para uso em procedimentos de limpeza controlada de pinturas.

Os métodos de extração aqui revisados não apenas favorecem a produção de biopolímeros de qualidade, mas também se alinham aos princípios mais sustentáveis e da conservação preventiva, promovendo inovação tecnológica aplicada ao patrimônio em sintonia com a preservação ambiental.

O desenvolvimento de biopolímeros funcionais, como os extraídos de *Lessonia Flavicans*, abre caminho para novas formulações, como hidrogéis que respondem a estímulos de pH, capazes de modular a limpeza de forma controlada.

O uso de biopolímeros na conservação e restauração não se limita ao desempenho técnico. Representa uma mudança paradigmática em direção à preservação sustentável do patrimônio cultural.

Esses novos materiais ampliam o repertório técnico disponível para a conservação-restauração, oferecendo alternativas renováveis, não tóxicas e ajustáveis, de acordo com a natureza da obra e o tipo de intervenção.

8. Referências

- ABDELLATIF SOLIMAN, S. M.; SANAD, M. F.; SHALAN, A. E. Synthesis, characterization and antimicrobial activity applications of grafted copolymer alginate-g -poly(*N*-vinyl imidazole). **RSC Advances**, 2021. v. 11, n. 19, p. 11541–11548.
- ABKA-KHAJOUEI, R. *et al.* Structures, Properties and Applications of Alginates. **Marine Drugs**, 29 maio. 2022. v. 20, n. 6, p. 364.
- ABOULNAGA, M. *et al.* Climate Change and Cultural Heritage: A Global Mapping of the UNESCO Thematic Indicators in Conjunction with Advanced Technologies for Cultural Sustainability. **Sustainability**, 30 maio. 2024. v. 16, n. 11, p. 4650.
- AKHTER, M. *et al.* Identification of aquatically available carbon from algae through solution-state NMR of whole ¹³C-labelled cells. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, 2016. v. 408, n. 16, p. 4357–4370. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00216-016-9534-8>>.
- ASWATHI MOHAN, A. *et al.* Algal biopolymers as sustainable resources for a net-zero carbon bioeconomy. **Bioresource Technology**, 2022. v. 344, p. 126397. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852421017399>>.
- ATALLA, R. H. *et al.* Carbon-13 NMR spectra of cellulose polymorphs. **Journal of the American Chemical Society**, 1 abr. 1980. v. 102, n. 9, p. 3249–3251. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ja00529a063>>.
- BAGLIONI, M. *et al.* Smart cleaning of cultural heritage: a new challenge for soft nanoscience. **Nanoscale**, 2012. v. 4, n. 1, p. 42–53.

BANDELLI, D. *et al.* New sustainable polymers and oligomers for Cultural Heritage conservation. **Chem. Sci.**, 2024. v. 15, n. 7, p. 2443–2455. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1039/D3SC03909A>>.

BERGLUND, L. *et al.* Seaweed-Derived Alginate–Cellulose Nanofiber Aerogel for Insulation Applications. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 28 jul. 2021. v. 13, n. 29, p. 34899–34909.

BOJORGES, H. *et al.* Overview of alginate extraction processes: Impact on alginate molecular structure and techno-functional properties. **Trends in Food Science & Technology**, out. 2023. v. 140, p. 104142.

CARROLL, P.; AARREVAARA, E. Review of Potential Risk Factors of Cultural Heritage Sites and Initial Modelling for Adaptation to Climate Change. **Geosciences**, 29 ago. 2018. v. 8, n. 9, p. 322.

CARUSO, M. R. *et al.* A review on biopolymer-based treatments for consolidation and surface protection of cultural heritage materials. **Journal of Materials Science**, 18 ago. 2023. v. 58, n. 32, p. 12954–12975.

CASINI, A.; CHELAZZI, D.; BAGLIONI, P. Advanced methodologies for the cleaning of works of art. **Science China Technological Sciences**, 12 ago. 2023. v. 66, n. 8, p. 2162–2182.

CHELAZZI, D.; BAGLIONI, P. From Nanoparticles to Gels: A Breakthrough in Art Conservation Science. **Langmuir**, 8 ago. 2023. v. 39, n. 31, p. 10744–10755. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c01324>>.

_____ ; POGGI, G.; BAGLIONI, P. The GREENART Project: Environmentally Friendly and Low Impact Materials for the Conservation of Cultural Heritage. **Studies in Conservation**, 30 ago. 2024. v. 69, n. sup1, p. 25–34. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00393630.2024.2342656>>.

DALAL, S. R. *et al.* Characterization of alginate extracted from *Sargassum latifolium* and its use in *Chlorella vulgaris* growth promotion and riboflavin drug delivery. **Scientific Reports**, 2021. v. 11, n. 1, p. 16741. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-021-96202-0>>.

DOMINGUES, J. A. L. *et al.* Innovative Hydrogels Based on Semi-Interpenetrating p(HEMA)/PVP Networks for the Cleaning of Water-Sensitive Cultural Heritage Artifacts. **Langmuir**, 26 fev. 2013. v. 29, n. 8, p. 2746–2755.

DONI, M.; FIERASCU, I.; FIERASCU, R. C. Recent Developments in Materials Science for the Conservation and Restoration of Historic Artifacts. **Applied Sciences**, 5 dez. 2024. v. 14, n. 23, p. 11363.

DU, Z.; WANG, N.; DU, J. Recent Progress in Cellulose-Based Conductive Hydrogels. **Polymers**, 2025. v. 17, n. 8. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/17/8/1089>>.

ELKALINY, N. E. *et al.* Macroalgae Bioplastics: A Sustainable Shift to Mitigate the Ecological Impact of Petroleum-Based Plastics. **Polymers**, 2024. v. 16, n. 9. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/16/9/1246>>.

FALAH, F. *et al.* Antimicrobial activity of food packaging biofilms derived from lignin-starch-poly(lactic acid). [S.I.]: [s.n.], 2024. p. 040013.

FATORIĆ, S.; SEEKAMP, E. Securing the Future of Cultural Heritage by Identifying Barriers to and Strategizing Solutions for Preservation under Changing Climate Conditions. **Sustainability**, 21 nov. 2017. v. 9, n. 11, p. 2143.

FORNARI, A. *et al.* A Review of Applications of Nanocellulose to Preserve and Protect Cultural Heritage Wood, Paintings, and Historical Papers. **Applied Sciences**, 14 dez. 2022. v. 12, n. 24, p. 12846.

FORNARI JÚNIOR, C. C. M. **Fibras Vegetais para compósitos poliméricos**. BA: Editus ed. Ilhéus: [s.n.], 2017.

FRANCE, K. J. DE *et al.* Dual physically and chemically crosslinked regenerated cellulose – Gelatin composite hydrogels towards art restoration. **Carbohydrate Polymers**, 2020. v. 234, p. 115885. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014486172030059X>>.

GRAFAKOS, S. *et al.* Integration of mitigation and adaptation in urban climate change action plans in Europe: A systematic assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, abr. 2020. v. 121, p. 109623.

GUIRY, M. D. How many species of algae are there? A reprise. Four kingdoms, 14 phyla, 63 classes and still growing. **Journal of Phycology**, 21 abr. 2024. v. 60, n. 2, p. 214–228.

HARLEN, W. C. *et al.* Characterization of Alginate-Crystalline Nanocellulose Composite Hydrogel as Polyphenol Encapsulation Agent. **Food Research International**, nov. 2024. v. 195, p. 114989.

JMEL, M. A. *et al.* The stranded macroalga *Ulva lactuca* as a new alternative source of cellulose: Extraction, physicochemical and rheological characterization. **Journal of Cleaner Production**, out. 2019. v. 234, p. 1421–1427.

KAWEE-AI, A. Advancing Gel Systems with Natural Extracts: Antioxidant, Antimicrobial Applications, and Sustainable Innovations. **Gels**, 2025. v. 11, n. 2. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2310-2861/11/2/125>>.

KHAKSAR-BAGHAN, N.; KOOCHAKZAEI, A.; HAMZAVI, Y. An overview of gel-based cleaning approaches for art conservation. **Heritage Science**, 2024. v. 12, n. 1, p. 248. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40494-024-01369-0>>.

KULIG, D. *et al.* Effect of Chemical Degradation of Sodium Alginate on Capsaicin Encapsulation. **Molecules**, 29 nov. 2023. v. 28, n. 23, p. 7844.

KUMAR GUPTA, P. *et al.* An Update on Overview of Cellulose, Its Structure and Applications. **Cellulose**. [S.I.]: IntechOpen, 2019.

LAN, X. *et al.* TEMPO-Oxidized Cellulose Nanofiber-Alginate Hydrogel as a Bioink for Human Meniscus Tissue Engineering. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, 5 nov. 2021. v. 9.

LARSSON, P. T.; WICKHOLM, K.; IVERSEN, T. A CP/MAS¹³C NMR investigation of molecular ordering in celluloses. **Carbohydrate Research**, 1997. v. 302, n. 1, p. 19–25. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008621597001304>>.

LEE, C. *et al.* Preliminary Cleaning Approach with Alginate and Konjac Glucomannan Polysaccharide Gel for the Surfaces of East Asian and Western String Musical Instruments. **Materials**, 2022. v. 15, n. 3. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/15/3/1100>>.

LI, S. *et al.* Conservation of aged paper using reduced cellulose nanofibrils/aminopropyltriethoxysilane modified CaCO₃ particles coating. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2024. v. 255, p. 128254. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014181302305153X>>.

LI, Yanli *et al.* Deacidification and consolidation of brittle book paper using bacterial cellulose composite with zinc oxide nanoparticles. **Journal of Cultural Heritage**, 2023. v. 64, p. 83–91. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207423001772>>.

MADHUSHREE, M. *et al.* A Comprehensive Review of Cellulose and Cellulose-Based Materials: Extraction, Modification, and Sustainable Applications. **Journal of Natural Fibers**, 31 dez. 2024. v. 21, n. 1.

MASTRANGELO, R. et al. Twin chain polymer networks: Recent developments in hydrogels for Cultural Heritage. **Polymer**, 2025. v. 325, p. 128294. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386125002800>>.

MEIRA ENGEL, E. R.; ILHA LIBRELOTTO, L. CULTURAL HERITAGE AND THE CLIMATE CRISIS: A LITERATURE REVIEW. **MIX Sustentável**, 8 out. 2024. v. 10, n. 4, p. 127–142.

MORAMARCO, A. et al. Cellulose Extraction from Soybean Hulls and Hemp Waste by Alkaline and Acidic Treatments: An In-Depth Investigation on the Effects of the Chemical Treatments on Biomass. **Polymers**, 29 abr. 2025. v. 17, n. 9, p. 1220.

MOROZKINA, S. et al. The Fabrication of Alginate–Carboxymethyl Cellulose-Based Composites and Drug Release Profiles. **Polymers**, 1 set. 2022. v. 14, n. 17, p. 3604.

NAGARAJAN, D. et al. Sustainable bioplastics from seaweed polysaccharides: A comprehensive review. **Polymers for Advanced Technologies**, 1 ago. 2024. v. 35, n. 8, p. e6536. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/pat.6536>>.

NARDELLI, A. E. et al. Concise review of genus *Lessonia* Bory. **Journal of Applied Phycology**, 2023. v. 35, n. 4, p. 1485–1498. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10811-023-02968-3>>.

NESIC, A. et al. Microwave Assisted Extraction of Raw Alginate as a Sustainable and Cost-Effective Method to Treat Beach-Accumulated *Sargassum* Algae. **Polymers**, 2023. v. 15, n. 14. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/15/14/2979>>.

PARK, Y. et al. Extraction and characterisation of sodium alginate from the Southern African seaweed *Ecklonia maxima*. 2024. **Botanica Marina**. v. 67, n. 5, p. 513–523. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/bot-2024-0011>>.

PATRICH, C. A. M. et al. Extraction of Cellulose from *Ulva lactuca* Algae and Its Use for Membrane Synthesis. **Polymers**, 2023. v. 15, n. 24. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/15/24/4673>>.

PEREIRA, L. Macroalgae. **Encyclopedia**, 2021. v. 1, n. 1, p. 177–188. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-8392/1/1/17>>.

PÉREZ-GANDARILLAS, L. et al. Conservation and Protection Treatments for Cultural Heritage: Insights and Trends from a Bibliometric Analysis. **Coatings**, 13 ago. 2024. v. 14, n. 8, p. 1027.

POLETO, M. et al. Materials produced from plant biomass: part II: evaluation of crystallinity and degradation kinetics of cellulose. **Materials Research**, 22 maio. 2012. v. 15, n. 3, p. 421–427.

RAFAT, A. A. et al. Efficient extraction of carboxylated nanocellulose from ionoSolv pulps with alkaline H₂O₂ assisted oxidation. **Cellulose**, 11 jan. 2025. v. 32, n. 2, p. 853–875.

RAHIM, A. et al. A critical review on purification methods and applications of marine algal haloperoxidases. **Frontiers in Natural Products**, 2025. v. 4. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/natural-products/articles/10.3389/fntpr.2025.1537097>>.

RANA, A. K. et al. Cellulose-alginate hydrogels and their nanocomposites for water remediation and biomedical applications. **Environmental Research**, fev. 2024. v. 243, p. 117889.

RUBIA, M. D. LA et al. Characterization of Cellulosic Pulps Isolated from Two Widespread Agricultural Wastes: Cotton and Sunflower Stalks. **Polymers**, 4 jun. 2024. v. 16, n. 11, p. 1594.

SAADAN, R. *et al.* A Short Overview of the Formulation of Cellulose-Based Hydrogels and Their Biomedical Applications. **Engineering Proceedings**, 2024. v. 81, n. 1. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-4591/81/1/3>>.

SAJI, S. *et al.* **A Brief Review on the Development of Alginate Extraction Process and Its Sustainability. Sustainability**.

SANSONETTI, A. *et al.* Gel Cleaning in Heritage: Comparison of the Water Release among Gels and Traditional Pads. **Gels**, 2024. v. 10, n. 11. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2310-2861/10/11/708>>.

SANTOS ARAÚJO, P. DOS *et al.* Thermal degradation of calcium and sodium alginate: A greener synthesis towards calcium oxide micro/nanoparticles. **International Journal of Biological Macromolecules**, nov. 2019. v. 140, p. 749–760.

SESANA, E. *et al.* Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. **WIREs Climate Change**, 4 jul. 2021. v. 12, n. 4.

SHARMA, P. R.; VARMA, A. J. Thermal stability of cellulose and their nanoparticles: Effect of incremental increases in carboxyl and aldehyde groups. **Carbohydrate Polymers**, dez. 2014. v. 114, p. 339–343.

SILVA, A. *et al.* Macroalgae as a Source of Valuable Antimicrobial Compounds: Extraction and Applications. **Antibiotics**, 2020. v. 9, n. 10. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-6382/9/10/642>>.

SMITH, H. A. *et al.* Green Alginate Extraction from *Macrocystis pyrifera* for Bioplastic Applications: Physicochemical, Environmental Impact, and Chemical Hazard Analyses. **ACS Sustainable Resource Management**, 23 maio. 2024. v. 1, n. 5, p. 958–969. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00019>>.

TOFANICA, B.-M. *et al.* Advances in Cellulose-Based Hydrogels: Current Trends and Challenges. **Gels**, 20 dez. 2024. v. 10, n. 12, p. 842.

TOIGO, C. et al. Rheological Properties of Aqueous Sodium Alginate Slurries for LTO Battery Electrodes. **Polymers**, 17 out. 2021. v. 13, n. 20, p. 3582.

TORABI, P.; HAMDAMI, N.; KERAMAT, J. Microwave-assisted extraction of sodium alginate from brown macroalgae *Nizimuddinia zanardini*, optimization and physicochemical properties. **Separation Science and Technology**, 13 abr. 2022. v. 57, n. 6, p. 872–885. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01496395.2021.1954020>>.

UREÑA, M. et al. Effect of polymer structure on the functional properties of alginate for film or coating applications. **Food Hydrocolloids**, abr. 2024. v. 149, p. 109557.

VEGA, J. M. A.; TOLEDO, P. H. The chemical composition of *Lessonia berteroana* (ex *L. nigrescens*) in kelp harvest management and open access areas near Coquimbo, Chile. **Latin American Journal of Aquatic Research**, 29 maio. 2018. v. 46, n. 2, p. 258–267.

VILLACRÉS, N. A. C. E. T. G. ; S. C. C. ; V. T. A. H. A. V. A. C. Preparation of Composite Films of Sodium Alginate-Based Extracted from Seaweeds *Macrocystis pyrifera* and *Lessonia trabeculata* Loaded with Aminoethoxyvinylglycine. **J. Braz. Chem. Soc**, 2023. v. Vol. 34, n. No. 10, p. 1509–1519.

WAHLSTRÖM, N. et al. Cellulose from the green macroalgae *Ulva lactuca*: isolation, characterization, optotracing, and production of cellulose nanofibrils. **Cellulose**, 8 maio. 2020. v. 27, n. 7, p. 3707–3725.

YAN, C. et al. A novel enzyme-assisted one-pot method for the extraction of fucoidan and alginate oligosaccharides from *Lessonia trabeculata* and their bioactivities. **Journal of Oceanology and Limnology**, 12 nov. 2024. v. 42, n. 6, p. 1998–2012.

ZHANG, M. et al. Extraction and Analysis of Chemical Compositions of Natural Products and Plants. **Separations**, 9 dez. 2023. v. 10, n. 12, p. 598.

ZHANG, X. *et al.* Structural and Physical Properties of Alginate Pretreated by High-Pressure Homogenization. **Polymers**, 28 jul. 2023. v. 15, n. 15, p. 3225.

ZOU, P. *et al.* Polysaccharides Derived From the Brown Algae *Lessonia nigrescens* Enhance Salt Stress Tolerance to Wheat Seedlings by Enhancing the Antioxidant System and Modulating Intracellular Ion Concentration. **Frontiers in Plant Science**, 31 jan. 2019. v. 10.

Escritório de Arte. Ado Malagoli. Disponível em:

<https://www.escritoriodearte.com/artista/ado-malagoli> (acesso em: 18/10/2025)

Hacer. Ado Malagoli. Disponível em:

<https://www.hacer.com.br/ado-malagoli> (acesso em: 18/10/2025)

9. Apêndice

Participação em Artigos Científicos

Chemical Papers (2021) 75:3807–3815
<https://doi.org/10.1007/s11696-021-01616-9>

ORIGINAL PAPER



Synthesis of LiNbO₃ nanocrystals by microwave-assisted hydrothermal method: formation mechanism and application to hydrogen evolution reaction

Vinicius G. Deon^{1,2} · Anderson Thesing³ · Luiza R. Santana² · Vanize C. Costa⁴ · Maurício O. Vaz⁵ · Ricardo M. Silva² · Marcia F. Mesko⁴ · Neftali L. V. Carreno²

Received: 10 November 2020 / Accepted: 18 March 2021 / Published online: 1 April 2021
© Institute of Chemistry, Slovak Academy of Sciences 2021

Abstract

Lithium niobate (LiNbO₃) is an important ferroelectric material with a wide range of applications. In this work, the use of microwave radiation to improve the conditions of hydrothermal synthesis of pure nanocrystalline LiNbO₃ was proposed. The structural characterization showed that nanoparticles of a pure LiNbO₃ phase were synthesized. The scanning electron microscopy and transmission electron microscopy analysis revealed a high-quality nanoparticle with an average diameter of ca. 42 and 65 nm for 2 and 3 h of synthesis time, respectively. These results represent a time-saving using a microwave-assisted hydrothermal method for LiNbO₃ preparation, with excellent quality at the nanometer scale. The nanoparticles were employed as photocatalysts for hydrogen evolution reaction through water splitting, reaching the rate of 10.5 μmol h⁻¹ g⁻¹. It had shown to be a potential candidate for water photolysis due to the small particle size and high crystallinity. Moreover, it also allows the direct and fast synthesis of LiNbO₃ on carbon fiber, multi-walled carbon nanotubes and nanocellulose, which were used as supporting materials for the fabrication of novel nanocomposites.

Keywords Lithium niobate · Microwave-assisted hydrothermal · Nanoparticles · Synthesis · Nanocomposites



Contents lists available at ScienceDirect

Food Bioscience

journal homepage: www.elsevier.com/locate/fbio

Curcumin-loaded antioxidant oleogels based on native and modified bean starches

Camila de Oliveira Pacheco^{a,*}, Juliani Buchveitz Pires^a, Laura Martins Fonseca^a, Cristina Jansen-Alves^a, Elder Pacheco da Cruz^a, Felipe Nardo dos Santos^a, Luiza Ribeiro Santana^b, Neftali Lenin Villarreal Carreno^b, Alvaro Renato Guerra Dias^a, Elessandra da Rosa Zavareze^a

^a Laboratory of Biopolymers and Nanotechnology in Food (BioNano), Graduate Program in Food Science and Technology, Department of Agroindustrial Science and Technology, Federal University of Pelotas, 96010-900, Pelotas, RS, Brazil

^b Novonano Research Group, Technological Development Center, Federal University of Pelotas, 96010-610, Pelotas, RS, Brazil

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:
Carioca bean
OSA modification
Sunflower oil
Replacement fat
Structuring agent
Bioactivity

Oleogels show promise in the food industry as potential substitutes for saturated fats, providing a medium for incorporating bioactive compounds. Starch modified with octenyl succinic anhydride (OSA) can serve as a structuring agent for vegetable oils due to its amphiphilic nature. This study aimed to develop oleogels based on native starch (NS) or modified starch (MS) bean, sunflower oil, beeswax, and curcumin. The oleogels were evaluated for gel hardness, oil holding capacity, structural stability, weight loss, X-ray diffraction, peroxide value, and antioxidant activity during 30 days of storage. The modification reduced the amylose content by 36%, viscosity by 32%, breakdown by 78%, and retrogradation by 54% of the starch. The oleogels exhibited structural stability and oil binding capacity above 96% during 30 days. Oleogels with NS and 0.5% curcumin were 20% softer than those without curcumin. Over 30 days, the hardness of the oleogels increased by 21%–48%. The addition of 0.5% curcumin in native and OSA starch oleogels increased their antioxidant activities to 41% and 35%, respectively. The texture and antioxidant properties of the oleogels indicate the feasibility of their application in food products.

International Journal of Biological Macromolecules xxx (xxxx) xxx



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Biological Macromolecules

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijbiomac

Cassava, corn, wheat, and sweet potato native starches: A promising biopolymer in the production of capsules by electrospraying

Juliani Buchveitz Pires^{a,*}, Felipe Nardo dos Santos^a, Elder Pacheco da Cruz^a, Laura Martins Fonseca^a, Camila de Oliveira Pacheco^a, Bruno Nunes da Rosa^b, Luiza Ribeiro Santana^c, Claudio Martin Pereira de Pereira^b, Neftali Lenin Villarreal Carreno^c, Patrícia Silva Diaz^d, Elessandra da Rosa Zavareze^a, Alvaro Renato Guerra Dias^a

^a Laboratory of Biopolymers and Nanotechnology in Food (BioNano), Department of Agroindustrial Science and Technology, Federal University of Pelotas (UFPel), 96010-900 Pelotas, RS, Brazil

^b Laboratory of Innovation and Solutions in Chemistry (INNOVAsChem), Center for Chemical, Pharmaceutical and Food Sciences, Federal University of Pelotas (UFPel), 96010-900 Pelotas, RS, Brazil

^c Laboratory of Nanotechnology (Novonano), Federal University of Pelotas (UFPel), Campus Anglo, Pelotas, RS, Brazil

^d Biotechnology Unit, Technology Development Center, Federal University of Pelotas (UFPel), Campus Capão do Leão, Capão do Leão, RS, Brazil

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:
Biopolymeric material
Encapsulating materials
Polymeric solution
Electrical conductivity
Rheology
Morphology

Native starches have a high potential for producing capsules by electrospraying despite still being little explored as biopolymeric material. Thus, the present study aimed to investigate the electrospraying capacity of native starches from different sources (cassava, corn, wheat, and sweet potato). The concentration of starch in the polymer solutions was varied from 3 % to 10 % (w/v) to investigate the impact of both starch source and concentration on the electrospraying process. The study also aimed to deepen scientific knowledge of the behavior of these starches during the process and the characteristics of the resulting capsules. The characterization of the polymeric solutions was carried out regarding rheology and electrical conductivity and the capsules were evaluated by production yield, morphology, size distribution, thermal properties, and crystallinity. Higher viscosities were observed for polymeric solutions obtained from sweet potato starch, compared to other starches at the same polymer concentrations. The increase in starch concentration in polymeric solutions reduced their electrical conductivity, except for corn starch. The production yield of cassava and sweet potato starch capsules was not affected by the polymer concentration in the polymeric solutions, while for corn and wheat starches, there was a reduction in yield as the concentration increased. All starches were able to form capsules.



Contents lists available at ScienceDirect

Trends in Food Science & Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/tifs



Chemical composition, bioactive compounds, biological activity, and applications of *Butia* spp.: A review

Bruna da Fonseca Antunes^{a,*}, Igor Henrique de Lima Costa^a, Kátia Gomes da Silva^a, Raquel Moreira Oliveira^a, Luiza Ribeiro Santana^b, Laura Martins Fonseca^a, Neftali Lenin Villarreal Carreño^b, Alvaro Renato Guerra Dias^a, Elessandra da Rosa Zavareze^a

^a Laboratory of Biopolymers and Nanotechnology in Food (BioNano), Graduate Program in Food Science and Technology, Department of Agroindustrial Science and Technology, Federal University of Pelotas, Pelotas, RS, 96010-900, Brazil

^b Laboratory of Nanotechnology (Novanano), Graduate Program in Science and Materials Engineering, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, RS, 96010-610, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Genetic biodiversity
Nutritional value
Bioactive compounds
Natural antioxidants
Antimicrobials
Active packaging

ABSTRACT

Background: The fruit of *Butia* spp. is native to South America, and its composition is rich in bioactive compounds, volatile compounds, and fatty acids, which offer health benefits when consumed.

Scope and approach: This study is a systematic literature review on *butia* fruits. The chemical composition, bioactive compounds, volatile compounds, biological activities, and their applications were addressed.

Key findings and conclusions: *Butia* fruit extracts exhibit biological activities such as antimicrobial, antioxidant, antimutator, anti-inflammatory, and antihyperglycemic, which are attributed to their phenolic, carotenoid, and vitamin contents. The antimicrobial action of *Butia* extracts against foodborne pathogens such as *Salmonella* spp., *L. monocytogenes*, *B. cereus*, and *S. aureus* enable their use as a natural additive in food products, as well as an antimicrobial agent in active packaging. The chemical composition and biological properties of *Butia* fruits expand the possibilities of their use in the food industry. Applications of fruits or derivatives of *Butia* in food products can alter sensory properties and inhibit oxidative reactions and microbial growth. Vehicles, such as films, provide an alternative for controlled release and enhanced biological activities.

International Journal of Biological Macromolecules 306 (2025) 141788



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Biological Macromolecules

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijbiomac



Incorporation of fucoidan into zein-based electrospun fibers: A promising material for biotechnological applications

Amanda Fonseca Leitzke^{a,b}, Danielle Tapia Bueno^{a,c}, Cristina Jansen-Alves^{a,d}, Tamara Mendes Leite Silva Trindade^{a,b}, Nathalia Stark Pedra^e, Luiza Ribeiro Santana^c, Francieli Moro Stefanello^f, Elessandra da Rosa Zavareze^g, Sibele Borsuk^b, Neftali Lenin Villarreal Carreño^c, Claudio Martin Pereira de Pereira^{a,b,c,*}

^a Center of Chemical, Pharmaceutical and Food Sciences, Innovation and Solutions in Chemistry Laboratory, Federal University of Pelotas, Eliseu Maciel St., s/n, Pelotas, RS 96160-000, Brazil

^b Postgraduate Program in Biotechnology, Federal University of Pelotas, Eliseu Maciel St., s/n, Pelotas, RS 96160-000, Brazil

^c Postgraduate Program in Materials Science and Engineering, Technology Development Center, Federal University of Pelotas, 96010-000 Pelotas, Rio Grande do Sul, Brazil

^d Department of Food Science and Technology, Federal University of Pelotas, Eliseu Maciel St., s/n, Pelotas, RS 96160-000, Brazil

^e Postgraduate Program in Biochemistry and Bioprospecting – Neurochemistry, Inflammation and Cancer Laboratory, Center of Chemical, Pharmaceutical and Food Sciences, Federal University of Pelotas, Eliseu Maciel St., s/n, Pelotas, RS 96160-000, Brazil

^f Postgraduate Program in Biochemistry and Bioprospecting – Biomarkers Laboratory, Center of Chemical, Pharmaceutical and Food Sciences, Federal University of Pelotas, Eliseu Maciel St., s/n, Pelotas, RS 96160-000, Brazil

^g Laboratory of Biopolymers and Nanotechnology in Food (BioNano), Department of Agroindustrial Science and Technology, Federal University of Pelotas (UFPel), Eliseu Maciel St., s/n, Pelotas, RS 96160-000, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Electrospinning
Fucoidan
Zein

ABSTRACT

Ultrafine fibers are gaining attention for their unique properties and wide-ranging applications. Among production techniques, electrospinning stands out for its cost-effectiveness, simplicity, and control over fiber structure and diameter. This study reports for the first time the development of ultrafine fibers using zein, a renewable protein, with the addition of fucoidan, a bioactive polysaccharide from brown algae, through electrospinning. Polymeric solutions of 30 % zein and varying concentrations of fucoidan (0 %, 25 %, 30 %, 35 %) were produced, with viscosity and electrical conductivity analyzed. Solutions with 25 % and 30 % fucoidan showed higher viscosity, while conductivity remained relatively stable. The hydrophilic nature of the solutions, indicated by contact angle analysis, favors cell adhesion and proliferation. Fourier transform infrared and X-ray diffraction analyses confirmed the material characteristics and amorphous nature of the fibers. Ultrafine fibers distribution averaged 540 ± 130 nm, with those incorporating 25 % and 30 % fucoidan forming ribbon shapes and smaller diameters (234 ± 54 nm and 276 ± 54 nm), which suggests improved fiber structure, potentially enhancing biological activity. Cytotoxicity tests on mouse fibroblast cells showed no toxic effects after 24 and 48

CARBOXYLATED NANOCELLULOSE OBTAINED THROUGH
ULTRASONICATION USING AN ALTERNATIVE
ACID MIXTURE SOLVENT

JÉSSICA MICHEL DA SILVA, LUIZA RIBEIRO SANTANA, RAFAEL BELTRAME,
MÁRIO LÚCIO MOREIRA, NEFTALI LENIN VILLARREAL CARREÑO and
RAFAEL DE AVILA DELUCIS

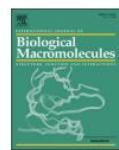
*Postgraduate Program in Materials Science and Engineering, Federal University of Pelotas,
Pelotas, Brazil*

✉ Corresponding authors: J. Michel da Silva, eng.jessicamichel@gmail.com
R. de Avila Delucis, rafael.delucis@ufpel.edu.br

Received November 18, 2023

The growing concern for a safer chemical industry has spurred research towards replacing strong acid solvents, because of the significant hazards they cause, such as issues related to effluent treatment and high corrosiveness. In the production of nanocellulose, sulfuric acid stands out as an example, being highly corrosive, yet widely used. This study aimed to investigate a more ecological acid mixture solvent, specifically comprising hydrochloric acid (HCl) and citric acid (CA), for obtaining carboxylated nanocellulose from kraft cellulose pulp. Distinct methodologies were employed based on three different durations, corresponding to each methodology (30 minutes, 60 minutes, and 90 minutes). FTIR analysis confirmed the occurrence of chemical modification. Among these methodologies, ultrasonication for 60 minutes yielded the best carboxylated nanocellulose, as determined through morphological analysis, with an average diameter of 8.4 nm and an average length of 123 nm. X-ray diffraction (XRD) revealed a decrease in crystallinity; however, both kraft pulp and carboxylated nanocellulose exhibited the cellulose I β allomorph. This surface modification paves the way for incorporating new functional properties into the design of composites, hydrogels, Pickering emulsions, drug delivery systems, food packaging, and biofilms.

Keywords: nanocrystals, kraft pulp, citric acid, hydrochloric acid, carboxyl groups, carboxylation reactions



Cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose acetate from Butia fruits (*Butia odorata*): Chemical, morphological, structural, and thermal properties

Bruna da Fonseca Antunes^{a,*}, Luiz Ribeiro Santana^b, Raquel Moreira Oliveira^a, Alaor Valério Filho^b, Neftali Lenin Villarreal Carreno^b, Silvana Ines Wolke^c, Renata da Silva^d, André Ricardo Fajardo^d, Alvaro Renato Guerra Dias^a, Elessandra da Rosa Zavareze^a

^a Laboratory of Biopolymers and Nanotechnology in Food (BioNano), Graduate Program in Food Science and Technology, Department of Agroindustrial Science and Technology, Federal University of Pelotas, Pelotas, RS 96010-900, Brazil

^b Laboratory of Nanotechnology (Novonano), Graduate Program in Science and Materials Engineering, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, RS 96010-610, Brazil

^c Department of Inorganic Chemistry, Institute of Chemistry, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS 91501-970, Brazil

^d Laboratory of Technology and Development of Composites and Polymeric Materials (LaCoPol), Center for Chemical, Pharmaceutical and Food Sciences, Federal University of Pelotas, Pelotas, RS 96010-900, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Biopolymers
Biomass
Cellulose isolation
Cellulose derivatives
Cellulose nanofibers

ABSTRACT

Cellulose possesses numerous advantageous properties and is a precursor to compounds and derivatives. The objective of this study was to isolate and characterize cellulose from Butia fruits and simultaneously produce cellulose nanofibers and cellulose acetate from the isolated cellulose. Cellulose extraction was performed using a combination of alkaline and bleaching treatments, while the production of cellulose nanofibers and cellulose acetate was achieved through acid hydrolysis and acetylation, respectively. The materials were characterized by their chemical composition, size distribution, zeta potential, morphology, relative crystallinity (XRD), functional groups (FTIR), molecular structure (NMR), and thermal stability (TGA). The Butia crude fibers presented 49.4 % cellulose, 4.5 % hemicellulose, 25.4 % lignin, and 1.3 % ash. The cellulose nanofibers presented an average diameter ranging from 13.7 to 93.1 nm and exhibited a high degree of crystallinity (63.3 %). FTIR, XRD, ¹³C, and ¹H NMR analyses confirmed that the isolation processes effectively removed amorphous regions from the cellulose nanofibers and confirmed the cellulose acetylation process. As demonstrated, cellulosic materials derived from Butia fruit exhibit promise for various applications, including their potential use as reinforcing agents in polymer matrices, due to their high extraction yield, thermal properties, and crystallinity.

Algal Research 71 (2023) 103034



Extraction of fatty acids and cellulose from the biomass of algae *Durvillaea antarctica* and *Ulva lactuca*: An alternative for biorefineries

Alaor Valério Filho^a, Luiza Ribeiro Santana^a, Naiane Garcia Motta^a, Luan Ferreira Passos^b, Silvana Ines Wolke^b, Andrés Mansilla^{c,d}, María Soledad Astorga-España^e, Emilene Mendes Becker^b, Claudio Martin Pereira de Pereira^f, Neftali Lenin Villarreal Carreno^{a,*}

^a Graduate Program in Materials Science and Engineering, Technology Development Center, Federal University of Pelotas, Rua Gomes Carneiro 1, Pelotas 96010-000, RS, Brazil

^b Institute of Chemistry, Federal University of Rio Grande do Sul, Department of Inorganic Chemistry, Avenida Bento Gonçalves, Porto Alegre 91501-970, Rio Grande do Sul, Brazil

^c Laboratorio de Ecosistemas Marinos Antárticos y Subantárticos, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

^d Centro Internacional Cabo de Hornos (CHIC), Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

^e Laboratorio de Biogeocíquica Ambiental, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

^f Center for Chemical, Pharmaceutical and Food Sciences, Bio-Forensic Research Group, Federal University of Pelotas, Pelotas 96160-000, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Seaweed
Sub-Antarctic Chilean algae
Ultrafine fiber
Lipids

ABSTRACT

Algae have cellular structures, rich in polysaccharides, proteins, lipids, vitamins and minerals. In addition, fatty acids are known for their benefits to human health, such as in treating blood pressure, diabetes, and obesity. These properties determine the algal biomass value as a raw material for different applications. One of the polysaccharides present in algae and is still little explored is cellulose, an important material for numerous technological applications. In this study, *Durvillaea antarctica* and *Ulva lactuca* algae were used as raw materials for the production of a cellulosic-based materials combining alkaline treatment, bleaching and freeze-drying. The samples were analyzed by XRD, ¹³C-CP-MAS-NMR, FT-IR, SEM, TEM and TGA techniques. XRD analysis showed that the material obtained presented crystallinity of above 60 %. FT-IR revealed that the methodology was effective in obtaining cellulose. SEM and TEM images exhibited a morphology consisted of cellulose fibers.

Depósito de Patente

PRODUÇÃO DE CELULOSE, NANOFIBRAS E ACETATO DE CELULOSE DE BUTIÁ
foi depositada com o nº BR 10 2025 008221 7.

Coorientação de Trabalho de Conclusão de Curso

Érica da Costa Campos - Extração de alginato de sódio da macroalga *Lessonia Flavicans*

Coorientação de Trabalhos de Mestrado

Ana Paula Corrales

Jéssica Michel

10. Anexo – Laudo técnico do Museu de Arte do Rio Grande do Sul

M | A | R G S

GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DA CULTURA,
TURISMO, ESPORTE E LAZER

LAUDO TÉCNICO

Artista: Ado Malagoli
Título e ano da obra: A Capela, 1989
Técnica: Óleo sobre tela
Medidas: 81 x 60 cm
Registro: 2342

Obs: A moldura necessita de restauração. O bastidor é reaproveitável (necessita de cunhas perdidas).

Estado de conservação da obra:

O óleo está em ótimo estado de conservação. A área inferior da obra sofreu inundação com lama depositada. Nota-se áreas na parte superior com presença de fungos e bactérias aparentes. A moldura apresenta muita sujeira de lama e também é percebido acúmulo de material gessoado junto à borda inferior e direita.

Porto Alegre, 24 de julho de 2024

Núcleo de Restauro do MARGS