



HIDROGEL ADSORVENTE DE LODO DA INDÚSTRIA DE CELULOSE PARA REMOÇÃO DE FÁRMACOS EM EFLUENTES AQUOSOS: SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO

Danieli Brandler

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da
Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) e bolsista da CAPES

Bruna da Conceição Marques

Graduanda do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da
Fronteira Sul (UFFS) e bolsista UFFS

Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf

Professor da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)

Profª. Drª. Gean Delise Leal Pasquali

Professora da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)
geandelise@uffs.edu.br

1. Introdução

A crescente presença de fármacos em corpos hídricos tem se consolidado como uma preocupação emergente no campo da poluição ambiental (Waheed *et al.*, 2021). Medicamentos de uso humano e veterinário são frequentemente descartados de forma inadequada ou excretados parcialmente metabolizados, alcançando sistemas de esgoto e, eventualmente, rios, lagos e aquíferos (Roberts e Zembower, 2021).

Embora as estações de tratamento de esgoto convencionais removam a matéria orgânica e nutrientes de forma eficiente, elas não foram projetadas para eliminar micropoluentes emergentes como os fármacos. Nesse contexto, diversas tecnologias vêm sendo estudadas, incluindo oxidação avançada (Wang *et al.*, 2025), fotocatálise (Yu *et al.*, 2025) e processos biológicos específicos (Zhang *et al.*, 2024). Dentre essas alternativas, a adsorção tem se destacado por sua simplicidade operacional, baixo custo, alta eficiência mesmo em concentrações reduzidas e aplicabilidade em diferentes escalas (Dang *et al.*, 2025).

Tradicionalmente, materiais como carvão ativado, zeólitas e argilas têm sido utilizados como adsorventes, mas seu alto custo ou impacto ambiental associado à extração e regeneração estimulam a busca por alternativas mais sustentáveis (Mittal, Alili e Alhassan, 2023). Nesse cenário, o aproveitamento de resíduos industriais como



precursores para a produção de adsorventes representa uma estratégia promissora alinhada aos princípios da economia circular (Verma *et al.*, 2025). Resíduos ricos em lignina, celulose ou frações minerais - como lodo de papel e celulose, cinzas, bagaço e lodos industriais - podem ser funcionalizados ou transformados em estruturas porosas com alto potencial adsorvente (Verma *et al.*, 2025). Além de agregar valor à resíduos que seriam descartados, essa abordagem contribui para a redução de impactos ambientais e para o desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis e sustentáveis (Zhou *et al.*, 2025).

Diante desse panorama, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar um hidrogel adsorvente a partir do lodo gerado pela indústria de celulose, visando sua aplicação na remoção de fármacos presentes em efluentes aquosos. A proposta contempla a valorização de um resíduo industrial abundante e subutilizado, aliando desempenho técnico à sustentabilidade ambiental. A caracterização físico-química do material e a avaliação de sua capacidade de adsorção contribuem para o avanço de soluções viáveis e de baixo custo para o tratamento de micropoluentes emergentes, especialmente no contexto de efluentes contaminados por compostos farmacêuticos.

2. Metodologia

Os reagentes utilizados para a realização dos experimentos foram: alginato de sódio (Dinamica Química Contemporânea - teor $\geq 90\%$) e Cloreto de Calcio Anidro Puríssimo (Vetec – teor $\geq 96\%$). O lodo de celulose foi obtido de uma indústria de papel e celulose da região.

Para a produção dos adsorventes, foi adaptada a metodologia descrita por (Lee *et al.*, 2023). Foram utilizados 4 g de alginato de sódio e 15% em massa de lodo de celulose, os quais foram homogeneizados em 85% em massa de água destilada com o auxílio de pilão e almofariz. A mistura obtida foi gotejada em um molde esférico e, em seguida, transferida para uma solução de cloreto de cálcio a 2% (m/v), na qual as esferas formadas permaneceram por 2 horas para o processo de cura. Após esse período, as esferas foram lavadas três vezes com água destilada para remoção de resíduos solúveis. As esferas de hidrogel contendo lodo de celulose foram então armazenadas em água destilada a 4 °C até sua utilização.

A caracterização do lodo proveniente da indústria de celulose foi conduzida por meio da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), com o objetivo de identificar os grupos funcionais presentes e obter informações sobre a composição química do material a partir de sua absorção de radiação infravermelha. As análises foram realizadas em um espectrofotômetro IR Prestige (Shimadzu), utilizando o modo de transmitância com a técnica de pastilhas de KBr (formadas em discos). Os espectros foram registrados na faixa de 400 a 4500 cm^{-1} , com 45 varreduras (scans) e resolução espectral de 2,0 cm^{-1} .

3. Resultados e discussão

O material desenvolvido apresenta coloração cinza e formato esférico, com diâmetro médio de aproximadamente 8 mm, conforme ilustrado na Figura 1. As esferas de hidrogel exibem morfologia relativamente homogênea, superfície opaca e textura levemente porosa. A conformação esférica é vantajosa em processos de adsorção, pois proporciona maior área superficial específica e favorece a difusão de solutos no interior da matriz polimérica. A presença de microporos na superfície sugere a efetiva incorporação do lodo de celulose, cuja estrutura lignocelulósica e o teor de compostos voláteis possivelmente contribuíram para a formação de poros durante o processo de reticulação. Essa porosidade é essencial para o desempenho adsorvente, pois amplia a quantidade de sítios ativos disponíveis para a interação com contaminantes.



Figura 1: Hidrogel desenvolvido com lodo da indústria de celulose.

Fonte: acervo da autora

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) indicou que o material apresenta uma ampla variedade de grupos funcionais associados à sua



natureza lignocelulósica, como hidroxilas ($-\text{OH}$), carbonilas ($\text{C}=\text{O}$), ligações alifáticas $\text{C}-\text{H}$ e grupos glicosídicos $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, compatíveis com constituintes orgânicos típicos de celulose, hemicelulose e lignina, corroborando o perfil orgânico do adsorvente. A abundância de grupos funcionais polares, como $-\text{OH}$ e $\text{C}=\text{O}$, confere ao material uma elevada afinidade por compostos hidrossolúveis, favorecendo sua atuação como adsorvente. Esses grupos facilitam a formação de interações físico-químicas com contaminantes orgânicos, como fármacos, por meio de mecanismos como ligações de hidrogênio e forças eletrostáticas (Sun *et al.*, 2020).

4. Considerações finais

A caracterização do hidrogel por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) evidenciou a eficiência da rota sintética empregada, bem como o potencial do material como adsorvente em sistemas de tratamento de efluentes. Os espectros obtidos indicaram a presença de grupos funcionais relevantes, como hidroxilas ($-\text{OH}$), carbonilas ($\text{C}=\text{O}$) e ligações éter ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$), que são típicos de estruturas celulósicas, polissacarídicas e lignocelulósicas. A presença desses grupos funcionais confere ao hidrogel características hidrofílicas e diversos sítios ativos capazes de interagir com poluentes orgânicos, como os fármacos, por meio de diferentes mecanismos físico-químicos, incluindo ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas.

Essa composição estrutural heterogênea favorece a adsorção de micropoluentes emergentes, reforçando o desempenho do material como um potencial adsorvente ambientalmente sustentável. Dessa forma, as esferas de hidrogel sintetizadas demonstram elevada viabilidade para aplicação em tecnologias de remediação de efluentes, com ênfase na remoção seletiva de compostos farmacêuticos

Referências

DANG, V. D.; DAO, D. Q.; DO, H. H.; RABANI, I.; NGUYEN, C. VAN; TRUONG, H. B. Facile synthesis of boric acid-activated biochar from water hyacinth: Enhanced antibiotic adsorption and mechanistic insights. **Chemical Engineering Science**, v. 316, p. 122005, 2025.

LEE, J. W.; HAN, J.; CHOI, Y. K.; PARK, S.; LEE, S. H. Reswellable alginate/activated carbon/carboxymethyl cellulose hydrogel beads for ibuprofen adsorption from aqueous solutions. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 249, p. 126053,



2023.

MITTAL, H.; ALILI, A. AL; ALHASSAN, S. M. Latest progress in utilizing gum hydrogels and their composites as high-efficiency adsorbents for removing pollutants from wastewater. **Journal of Molecular Liquids**, v. 391, p. 123392, 1 dez. 2023.

ROBERTS, S. C.; ZEMBOWER, T. R. Global increases in antibiotic consumption: a concerning trend for WHO targets. **The Lancet Infectious Diseases**, v. 21, n. 1, p. 10–11, 2021.

SUN, Y.; ZHOU, T.; LI, W.; YU, F.; MA, J. Amino-functionalized alginate/graphene double-network hydrogel beads for emerging contaminant removal from aqueous solution. **Chemosphere**, v. 241, p. 125110, 2020.

VERMA, A.; ALJOHANI, K.; ALJOHANI, B. S.; LAL, B.; JADEJA, Y.; BALLAL, S.; CHAHAR, M.; SUMAN, R. Innovations in cellulose-based hydrogels for enhanced wastewater treatment through adsorption. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 303, p. 140660, 2025.

WAHEED, A.; BAIG, N.; ULLAH, N.; FALATH, W. Removal of hazardous dyes, toxic metal ions and organic pollutants from wastewater by using porous hyper-cross-linked polymeric materials: A review of recent advances. **Journal of Environmental Management**, v. 287, p. 112360, 2021.

WANG, J.; ZHANG, J.; MA, D.; SUN, Z.; WANG, Y.; YUE, Q.; LI, Y.; GAO, Y.; GAO, B.; XU, X. Simultaneous removal of tetracycline and antibiotic resistant bacteria/genes in UV-LED/H₂O₂ system: Competitive interactions and wavelength dependence. **Chinese Chemical Letters**, p. 111209, 2025.

YU, X.; WANG, Z.; KIM, S.; DONG, X.; LOU, Y.; ZHANG, J.; PAN, C.; XU, J. Boosted H₂O₂ synthesis performance of supramolecular porphyrin homojunction catalyst for efficient photo-self-Fenton elimination of sulfonamide antibiotics, resistant bacteria and resistance genes. **Applied Catalysis B: Environment and Energy**, v. 371, p. 125209, 2025.

ZHANG, Y.; SUN, S.; MA, Z.; LI, Y.; HUANG, D.; ZHANG, J. Study on the purification of aquaculture tailwater under Sulfamethoxazole stress using algae-bacteria biofilms: Nutrient removal efficiency, microbial community, and ARGs. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 191, p. 1432–1444, 2024.

ZHOU, R.; CAI, R.; CHEN, YING; QIAO, J.; DING, K.; TAN, X.; DING, M.; CHEN, YI. Research progress on the application of hydrogel adsorbent materials in wastewater treatment: A review. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 216, p. 1–24, 2025.



Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal da Fronteira Sul pelo apoio institucional durante o desenvolvimento desta pesquisa, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento e suporte financeiro, fundamentais para a realização deste trabalho.