

DESENVOLVIMENTO DE HIDROGEL ADSORVENTE PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE SINTÉTICO CONTENDO FÁRMACO

BRUNA DA CONCEIÇÃO MARQUES ^{1,2}, DANIELI BRANDLER ^{3,2}, YAGO COLARES ^{3,2}, EDUARDO PAVAN KORF ^{2,4}, GEAN DELISE LEAL PASQUALI ^{2,5}

1 Introdução

Os medicamentos são compostos orgânicos desenvolvidos para serem quimicamente estáveis. Apesar de sofrerem transformações biológicas e físico-químicas, devido ao seu amplo consumo global, a chegada incessante ao meio ambiente e a dificuldade de degradação por tecnologias convencionais os colocam entre os poluentes emergentes de maior interesse (Brausch et al., 2012; Feng et al., 2012).

Os sistemas convencionais de tratamento de águas residuais não são projetados para a remoção de contaminantes de preocupação emergente, como os compostos farmacêuticos, o que compromete sua eficiência na eliminação dessas substâncias do meio ambiente (Krzeminski et al., 2019).

Uma solução para o tratamento desses compostos é a utilização de metodologias avançadas como, por exemplo, processos de adsorção, oxidação avançada e biorremediação (Adedipe et al., 2024), dentre estas a adsorção tem se destacado. A adsorção é o método mais comum e eficaz utilizado no tratamento de águas residuais, pois é um método simples, eficiente, de baixo custo e não gera subprodutos nocivos.

Nos processos adsortivos, diversos são os materiais que podem ser utilizados como adsorvente, e um que está se destacando neste meio, é o hidrogel (Lamkhao et al., 2023; Karbassiyazdi et al., 2023). Os hidrogéis apresentam uma estrutura de rede tridimensional reticulada que tem capacidade de absorver uma grande quantidade de água e se manter estável na água (Radoor et al., 2024). A eficiência de um hidrogel depende de sua matriz, esta deve ter uma superfície rica em grupos funcionais hidrofílicos, mas insolúvel em água, e uma estrutura de cadeia que possa ser reticulada ou emaranhada através de ligações de hidrogênio, forças eletrostáticas ou ligações químicas (Fang; Liu; Zhu, 2021).

¹Graduanda de Engenharia Ambiental e Sanitária - UFFS, Campus Erechim: marquesbruna2305@gmail.com

² Grupo de Pesquisa: Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental - REGEOAMB

³ Mestrandos do Programa de Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA, instituição UFFS, Campus Erechim

⁴ Doutor em Engenharia Ambiental, UFFS- Campus Erechim, docente do PPGCTA.

⁵ Doutora em Engenharia Química, UFFS- Campus Erechim, Orientadora e docente do PPGCTA.

Nesse contexto, os resíduos industriais podem, além de agregar valor a um subproduto antes descartado, ser reutilizados como matéria-prima para o desenvolvimento de novos materiais com aplicações ambientais. Um exemplo promissor é o uso do lodo de celulose, resíduo gerado pela indústria de papel e celulose, como base para a produção de adsorventes. Devido à sua composição rica em matéria orgânica e à presença de grupos funcionais que favorecem a adsorção, o lodo de celulose pode ser tratado e modificado para atuar como hidrogel adsorvente na remoção de poluentes em sistemas aquosos, como proposto neste trabalho.

2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é desenvolver e caracterizar um hidrogel adsorvente de alta eficiência para o tratamento de efluentes.

3 Metodologia

O hidrogel foi desenvolvido a partir de lodo de celulose proveniente de uma indústria de papel localizada em Paulo Bento (RS, Brasil). O lodo foi inicialmente moído em moinho de facas e peneirado (malha 60). Para a produção dos adsorventes, foi adaptada a metodologia descrita por (Lee et al. 2023). Foram pesados 4 g de alginato de sódio e misturados a 15% em massa de lodo de celulose, sendo o restante da composição (85% em massa) completado com água destilada. A homogeneização foi realizada com o auxílio de pilão e almofariz. A mistura resultante foi depositada gota a gota em um molde esférico e, posteriormente, imersa em solução de cloreto de cálcio a 2% (m/v), onde permaneceu por 2 horas para a etapa de cura. Concluído esse tempo, as esferas formadas foram enxaguadas três vezes com água destilada para eliminar resíduos solúveis. Em seguida, os hidrogéis contendo lodo de celulose foram mantidos submersos em água destilada, a 4 °C, até o momento do uso.

Como parte da caracterização do hidrogel desenvolvido foi realizada a análise de Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), utilizada para identificar os grupos funcionais presentes na estrutura de uma estrutura do material desenvolvido.

Para avaliar o comportamento do material adsorvente desenvolvido foram realizados ensaios preliminares para fixar as condições experimentais a serem utilizadas, tais como: concentrações do fármaco bromazepam, massa de adsorvente e pH. Após a identificação dos

melhores parâmetros através do planejamento experimental do tipo compósito central, foram fixadas as condições, e o hidrogel foi testado utilizando solução contendo o bromazepam.

Para a realização dos experimentos de adsorção, foram definidos parâmetros operacionais com base em um planejamento experimental do tipo compósito central. As condições e variáveis analisadas estão descritas no Quadro 1, que resume os ensaios realizados para a determinação dos parâmetros ideais dos testes de adsorção. Os experimentos foram utilizadas três variáveis independentes — pH, dosagem do adsorvente e concentração do fármaco bromazepam — foram avaliadas em três níveis distintos. Durante os ensaios, o tempo de contato (180 minutos) e a temperatura (25 °C) foram mantidos constantes.

Quadro 1: Planejamento experimental do tipo compósito central para o ajuste dos parâmetros operacionais dos ensaios de adsorção.

Variáveis	Níveis		
pH	3,0	6,0	9,0
Dosagem de hidrogel (g)	20	30	40
C bromazepam (mg.L ⁻¹)	1,0	3,0	5,0

*Demais condições: temperatura 25 °C, volume tratado 100 mL, tempo de adsorção 180min.

4 Resultados e Discussão

O material desenvolvido como hidrogel apresentou coloração cinza e forma esférica, com diâmetro médio em torno de 8 mm, como ilustrado na Figura 1. As esferas de hidrogel formadas demonstram morfologia uniforme, superfície opaca e textura levemente porosa. A geometria esférica é particularmente benéfica em aplicações de adsorção, uma vez que aumenta a área superficial específica e favorece a difusão dos solutos por toda a matriz polimérica. A observação de microporos na superfície indica a incorporação bem-sucedida do lodo de celulose à estrutura do hidrogel. As características lignocelulósicas do lodo, aliadas à presença de compostos voláteis, contribuíram para a geração de poros durante a etapa de reticulação. Essa estrutura porosa é um fator determinante para a eficiência do material como adsorvente, pois amplia o número de sítios ativos disponíveis para a interação com poluentes presentes em meio aquoso. Ao todo, foram conduzidos 16 ensaios, cada um em triplicata, totalizando 48 experimentos. Com base no quadro 1 se obteve o melhor ajuste experimental para a realização das cinéticas de adsorção.

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



Figura 1: Autoria própria

Pode-se concluir que, aumentando a massa do adsorvente há a redução da concentração final de bromazepam, mas esse efeito pode ser limitado pela saturação dos sítios ativos do hidrogel. A concentração inicial do fármaco afeta diretamente a concentração final, com uma relação proporcional, e o pH tem pouca influência na adsorção do bromazepam na faixa avaliada, indicando que o mecanismo de adsorção é relativamente estável frente às variações de pH. Devido a este efeito, o pH utilizado nos demais ensaios de adsorção foi fixado em pH 6,0. O processo adsorptivo foi ajustado, sendo que as melhores condições foram obtidas com 20 g de adsorvente e tempo de contato de 180 minutos.

Espectrofotometria de Infravermelho por Transformada de Fourier- FTIR

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) revelou a presença de uma diversidade de grupos funcionais característicos da composição lignocelulósica do material. Entre os principais grupos identificados estão hidroxilas (-OH), carbonilas (C=O), ligações alifáticas C-H e grupos glicosídicos (C-O-C), os quais estão associados aos constituintes orgânicos predominantes da celulose, hemicelulose e lignina. Esses resultados confirmam a natureza orgânica do adsorvente desenvolvido. A presença abundante de grupos funcionais polares, especialmente -OH e C=O , é um fator determinante para a elevada afinidade do material por compostos hidrossolúveis. Tais grupos funcionais atuam como sítios ativos para a adsorção, promovendo interações físico-químicas com contaminantes orgânicos, como fármacos, principalmente por meio de ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas (Sun et al., 2020).

5 Conclusão

A heterogeneidade da estrutura química obtida favorece a adsorção de micropoluentes emergentes, como o bromazepam, evidenciando o potencial das esferas de hidrogel como um material ambientalmente sustentável para uso em tecnologias de remediação, especialmente na remoção seletiva de contaminantes farmacêuticos.

Referências Bibliográficas

- Adedipe, D. T. et al. (2024). Occurrence and potential risks of pharmaceutical contamination in global Estuaries: A critical review and analysis. *Environment International*, 192, 109031.
- Brausch, J.M., Connors, K.A., Brooks, B.W., Rand, G.M. (2012). Human pharmaceuticals in the aquatic environment: a critical review of recent toxicological studies and considerations for toxicity testing. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 218, 1-99.
- Fang, Y., Liu, Q., Zhu, S.(2021). Selective biosorption mechanism of methylene blue by a novel and reusable sugar beet pulp cellulose/sodium alginate/iron hydroxide composite hydrogel. *International Journal Of Biological Macromolecules*, v. 188, p. 993-1002.
- Lamkhao, S.; Tandorn, S.; Rujijanagul, G.; Random, C. (2023). A practical approach using a novel porous photocatalyst/hydrogel composite for wastewater treatment. *Materials Today Sustainability*, v. 23, p. 100482.
- Radoor, S., Karayil, J., Jayakumar, A., Kandel, D. R., Kim, J. T., Siengchin, S., Lee, J. (2024). Recent advances in cellulose- and alginate-based hydrogels for water and wastewater treatment: a review. *Carbohydrate Polymers*, v. 323, p. 121339.
- Krzeminski, P., et al.(2019). Performance of secondary wastewater treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern implicated in crop uptake and antibiotic resistance spread: a review *Sci. Total Environ.*, 648, p. 1052-1081.
- Lee, J. W., Han, J., Choi, Y. K., Park, S., & Lee, S. H. (2023). Reswellable alginate/activated carbon/carboxymethyl cellulose hydrogel beads for ibuprofen adsorption from aqueous solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 249, 126053.
- 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.

Palavras-chave: adsorção, hidrogel, remoção de fármacos

Nº de Registro no sistema Prisma: PES-2024-0295

Financiamento: Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS

Agradecimentos:

