

Uso de nanopolímero magnético a base de carbono para adsorção de metais pesados em águas contaminadas

DOI: 10.5281/zenodo.18462218

Victoria Pires da Silva ^{a*}

The contamination of water bodies by heavy metals constitutes a serious environmental and public health problem, intensified by industrial activities, mining, and other anthropogenic sources. Metals such as lead, cadmium, and zinc stand out due to their high toxicity, bioaccumulation potential, and adverse effects on aquatic ecosystems and human health. In this context, adsorption emerges as an efficient, sustainable, and low-energy-cost alternative for the treatment of contaminated water. This work discusses the experimental study conducted by Shoulian Wei et al., which investigates the synthesis and application of the magnetic nanopolymer $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}@\text{PM}$ as an adsorbent for the removal of metal ions in aqueous media. Parameters such as solution pH, adsorbent concentration, initial metal concentration, as well as selectivity, adsorption kinetics, and material reusability were evaluated. The results demonstrate high removal efficiency for Zn^{2+} , Cd^{2+} , and Pb^{2+} , particularly under near-neutral conditions, along with good stability and reuse potential, indicating its applicability in the treatment of wastewater and contaminated waters.

A contaminação de corpos hídricos por metais pesados constitui um grave problema ambiental e de saúde pública, intensificado por atividades industriais, mineração e outras fontes antrópicas. Metais como chumbo, cádmio e zinco destacam-se pela elevada toxicidade, potencial de bioacumulação e pelos efeitos adversos aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana. Nesse contexto, a adsorção surge como uma alternativa eficiente, sustentável e de baixo custo energético para o tratamento de águas contaminadas. Este trabalho discute o estudo experimental conduzido por Shoulian Wei et al., que investiga a síntese e a aplicação do nanopolímero magnético $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}@\text{PM}$ como adsorvente para a remoção de íons metálicos em meio aquoso. Foram analisados parâmetros como pH da solução, concentração do adsorvente, concentração inicial dos metais, além de uma análise da seletividade, da cinética de adsorção e da reutilização do material. Os resultados demonstram elevada eficiência na remoção de Zn^{2+} , Cd^{2+} e Pb^{2+} , especialmente em condições próximas à neutralidade, além de boa estabilidade e potencial de reutilização, indicando sua potencial aplicabilidade no tratamento de efluentes e águas contaminadas.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: vickiprs@gmail.com

Palavras-chave: Adsorção; nanopolímero; metais pesados.

ACEITO EM 11 DE JANEIRO DE 2025,

APROVADO EM 30 DE JANEIRO DE 2025,

PUBLICADO EM 03 DE FEVEREIRO DE 2025.

Introdução

Dois grandes crimes ambientais marcaram a história recente do Brasil e evidenciam os impactos da contaminação por metais pesados em corpos hídricos: o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (2015), e da barragem da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019), ambos em Minas Gerais. As consequências dessas tragédias persistem até os dias atuais, em razão da contaminação do solo, dos rios e das bacias hidrográficas.^{1,2} Dados do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática indicam que, no caso de Mariana, os rejeitos atingiram o Rio Doce e seus afluentes, alcançando o Oceano Atlântico, resultando em aumentos significativos nas concentrações de metais pesados, tanto nas águas quanto nos organismos vivos desses ambientes.³ Apesar de esses eventos estarem associados a crimes ambientais específicos, a

contaminação de corpos hídricos por metais pesados constitui uma preocupação recorrente na sociedade contemporânea, decorrente não apenas da mineração, mas também de diferentes atividades industriais e antrópicas.

Com base no artigo de revisão sistemática feito por Motta et al., intitulado “Heavy Metal Water Contamination: Anthropogenic Sources and Environmental and Public Health Implications”, concluiu-se que, alguns dos metais mais comumente identificados em águas contaminadas estão o cádmio (Cd), chumbo (Pb) e zinco (Zn). Todos os três metais citados estão relacionados a atividades industriais e de mineração. Já os dois primeiros, Cd e Pb, estão associados também às indústrias químicas e petroquímicas, ao uso de fertilizantes e pesticidas, ao descarte inadequado de baterias, fluidos automotivos e resíduos de combustíveis, águas residuais e efluentes industriais sem tratamento adequado e

outros. Entre os diversos problemas de saúde associados à presença desses metais pesados em corpos hídricos, uma grande preocupação global está relacionada à bioacumulação na cadeia alimentar, afetando não apenas o ecossistema aquático, mas também o próprio ser humano, em razão do consumo de águas não devidamente tratadas e de organismos contaminados.⁴

No ambiente aquático, o chumbo é tóxico para organismos como peixes e aves e pode se acumular na cadeia alimentar, ampliando seus impactos sobre a saúde humana. Em humanos, a exposição a esse metal está associada a doenças cardiovasculares, anemia, danos aos sistemas nervoso, hematológico, renal e cardiovascular, além de prejuízos cognitivos, transtornos mentais, infertilidade, malformações e efeitos mutagênicos e carcinogênicos.⁵

O cádmio é um metal pesado de alta toxicidade. Em ambientes aquáticos, compromete o crescimento e o desenvolvimento de peixes e plantas e pode se bioacumular ao longo da cadeia alimentar, ampliando os riscos à saúde humana. Classificado como carcinogênico, esse metal está associado a nefropatia irreversível, causando também danos aos rins, fígado, esqueleto e sistema cardiovascular, bem como perdas auditivas e visuais. Além disso, apresenta efeitos teratogênicos e mutagênicos, atua como desregulador endócrino e interfere na reprodução humana. Sua exposição também pode acelerar o surgimento de doenças articulares.⁵

O zinco é um elemento essencial presente em diversos ecossistemas; entretanto, em concentrações elevadas, pode causar impactos negativos. Em ambientes aquáticos, seu excesso pode alterar o pH da água, além de provocar efeitos bioquímicos e fisiológicos nos organismos e sofrer bioacumulação, afetando a saúde humana. A exposição excessiva ao zinco está associada a danos aos órgãos, perda do olfato, fadiga, alterações neurológicas, efeitos mutagênicos e distúrbios urinários.⁵

Devido aos elevados impactos prejudiciais aos ecossistemas hídricos e à saúde humana, diversos métodos de tratamento foram desenvolvidos para a redução da concentração de metais pesados na água. Entre esses métodos, destacam-se aqueles que utilizam a adsorção, técnica na qual os metais pesados presentes na água são retidos na superfície e nos poros do material adsorvente, promovendo sua separação do meio aquoso.⁶ Em comparação com outras abordagens, esse método se destaca por sua operação

simplificada, elevada eficiência de remoção, menor custo de energia, caráter sustentável e ampla capacidade de adaptação a diferentes sistemas. Dentre os materiais adsorventes que têm sido foco de pesquisas recentes, destacam-se aqueles à base de carbono, em especial os nanomateriais, os quais apresentam elevada eficácia, alta porosidade e grande área superficial, além da presença de sítios ativos associados a grupos funcionais. Uma alternativa de grande potencial para o tratamento de águas contendo metais pesados por meio da adsorção é a integração entre nanotecnologia e materiais magnéticos por meio de nanopolímeros magnéticos à base de carbono.^{7,8}

Shoulian Wei *et al.*, no artigo ‘*Magnetic Carbon Porous Polymer Prepared from a New Suspended Emulsion for the Absorption of Heavy Metal Ions*’, estudam a síntese de um nanopolímero de carbono magnético obtido por polimerização em suspensão e sua aplicação direcionada à adsorção de íons metálicos em meio aquoso. O estudo tem como foco a obtenção de informações sobre o potencial uso desse nanopolímero na captura de metais pesados em efluentes e águas contaminadas.⁸

Metodologia

No artigo de referência, Shoulian Wei *et al.* obtém um nanopolímero de carbono magnético por meio da técnica de polimerização em suspensão. O processo foi iniciado com a formulação de nanossuspensões de carbono magnético, empregando dois bastões de carbono submetidos à limpeza ultrassônica e dispersos em meio aquoso contendo tampão e com pH neutro. A aplicação de eletrólise assistida por ultrassom possibilitou a formação de uma nanosolução de nanopartículas de carbono distribuídas uniformemente. Em seguida, realizou-se a síntese das nanopartículas magnetizáveis ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$), a partir da adição de sais de ferro à suspensão de carbono, com ajuste para pH alcalino e manutenção em banho-maria sob agitação. Os sólidos formados foram recuperados por separação magnética, lavados e secos a vácuo. Por fim, obteve-se o compósito polimérico ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}@\text{PM}$), adicionando-se à fase aquosa surfactante, coestabilizador e iniciador de polimerização, seguida da incorporação da fase oleosa. A suspensão foi submetida a banho de óleo a 85 °C por 16 horas para a ocorrência da polimerização. O material final foi então isolado, triturado, submetido a lavagens e purificado por extração em Soxhlet, sendo posteriormente seco a vácuo para obtenção do nanopolímero.

Após a síntese do nanopolímero $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}@\text{PM}$, foram realizados ensaios para caracterizar e comparar sua eficiência com a das nanopartículas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ na remoção dos íons metálicos Zn^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Co^{2+} e Ni^{2+} . Os experimentos foram conduzidos sob agitação controlada com posterior separação magnética, e as concentrações residuais dos metais foram determinadas por espectrometria de absorção atômica em chamas. Em seguida, avaliou-se o desempenho adsorptivo de ambos os materiais especificamente para Zn^{2+} , Cd^{2+} e Pb^{2+} , investigando parâmetros como pH, tempo de contato e concentração inicial. A estabilidade e a possibilidade de reutilização do adsorvente também foram analisadas por meio de ciclos de adsorção e dessorção.

No presente artigo, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente para explorar estudos relativos às aplicações de adsorventes, em especial nanopolímeros, no tratamento de efluentes e águas contaminadas com metais pesados. A metodologia envolveu a utilização das palavras-chave “*Heavy metals*”, “*water treatment*”, “*polymer*” e “*adsorvente*”. A busca foi conduzida em diversas plataformas e bases de dados, incluindo o Periódicos CAPES, por meio do acesso CAFe, além das bases Elsevier e Science Direct. Foram selecionados livros e artigos relevantes sobre o tema. A análise contemplou revisões sistemáticas e um estudo experimental de referência, visando proporcionar uma visão ampla e aprofundada sobre o assunto. Também foram adotados critérios de inclusão e exclusão para filtrar trabalhos que não atendiam aos padrões de qualidade ou relevância para o assunto.

Resultados e discussão

A adsorção é um fenômeno de transferência de massa interfacial que ocorre entre um meio aquoso e um material sólido adsorvente, possibilitando a separação de substâncias presentes na solução por meio de interações específicas com a superfície do adsorvato, dividindo-se, de acordo com a força dessas interações, em adsorção física e adsorção química. Para caracterizar adequadamente os mecanismos associados ao processo, empregam-se relações empíricas e isotermas de adsorção com base no equilíbrio, ferramentas que permitem determinar propriedades como a capacidade máxima de adsorção, além do seu estado e sua força de interação. Entretanto, em sistemas contendo metais pesados, a eficiência de adsorção é diretamente afetada por múltiplos fatores devido às interações entre os íons metálicos e o adsorvente, além de suas concentrações.⁸ Esse equilíbrio de adsorção utilizado para caracterização do processo é

influenciado por propriedades do meio, tais como o valor de pH, temperatura, concentração inicial de metais pesados, presença de diferentes íons metálicos e quantidade de adsorvente utilizada.⁸

Shoulian Wei *et al.*, em sua pesquisa, fez a análise da adsorção dos íons metálicos Zn^{2+} , Cd^{2+} e Pb^{2+} utilizando o $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}@\text{PM}$ como adsorvente, foram avaliadas a influência do pH, a variação da concentração do adsorvente e a concentração inicial de metais pesados na eficiência do processo. Ademais, foram realizadas análises da seletividade e da cinética de adsorção, além da avaliação da dessorção e da reutilização do material adsorvente.⁷

Influência do pH do meio na adsorção

Um dos parâmetros essenciais no estudo da adsorção de metais pesados é o pH da solução, que indica se o meio é ácido, básico ou neutro, influenciando diretamente o mecanismo de adsorção, a eficiência do processo e a afinidade do adsorvente por determinados íons metálicos. Isso ocorre porque, dependendo da acidez ou alcalinidade do meio, podem ocorrer alterações na carga da superfície do adsorvente, o que afeta o comportamento dos íons metálicos e a dissociação dos grupos funcionais. Dessa forma, uma superfície com carga mais positiva ou mais negativa tende a atrair, respectivamente, ânions ou cátions, apresentando maior afinidade por íons metálicos específicos e interagindo com diferentes grupos funcionais.⁸

No artigo de referência, foi testada a efetividade do nanopolímero magnético em uma faixa de pH entre 2 e 7, correspondente a meios mais ácidos até os próximos à neutralidade. Observou-se que o pH com maior eficiência de adsorção de metais, de modo geral, foi pH 6, especialmente para os íons zinco e chumbo, enquanto o cádmio apresentou aumento da adsorção do pH 6 para o pH 7. Para o chumbo e o zinco, o aumento do pH acima de 6 favorece a formação de compostos insolúveis, o que dificulta a adsorção desses íons pelo adsorvente. Por outro lado, em valores de pH mais baixos, mais ácidos, os grupos funcionais do adsorvente tornam-se mais protonados, o que reduz a interação com os íons metálicos e, consequentemente, a eficiência de adsorção.⁷

Influência da concentração de adsorvente na adsorção

Outro ponto de atenção na adsorção de metais pesados por adsorventes à base de carbono é a concentração do adsorvente. De modo geral, o aumento da concentração do

adsorvente proporciona um maior número de sítios ativos disponíveis para a adsorção, elevando a eficiência do processo até determinado limite.⁸ A partir desse ponto, pode ocorrer o empilhamento ou a aglomeração das partículas, o que reduz o acesso aos sítios ativos e dificulta o contato com os íons metálicos, prejudicando a adsorção. Esse comportamento também foi observado por Shoulian Wei *et al.* nos testes de adsorção realizados com variação da massa do adsorvente entre 5 e 30 mg. Conforme esperado teoricamente, houve um aumento significativo da adsorção até 10 mg. Já entre 10 e 15 mg, o aumento tornou-se menos pronunciado e, a partir de 15 mg, observou-se um ponto limite, no qual esse aumento na eficiência não era significativo.⁷

Influência da concentração de metais pesados na adsorção

A influência da concentração de metais pesados na adsorção segue uma lógica semelhante à da concentração do adsorvente. De modo geral, o aumento da concentração de metais pesados favorece a transferência de massa para a superfície do adsorvente, elevando a eficiência do processo até determinado limite. A partir desse ponto, a elevada concentração de íons metálicos passa a dificultar essa transferência, uma vez que os sítios ativos do adsorvente se encontram saturados, reduzindo a capacidade de adsorção.⁸ Na avaliação da influência da concentração inicial de metais pesados na adsorção utilizando Fe₃O₄/C@PM, mantendo-se constantes as concentrações de chumbo e cádmio, a concentração de zinco foi aumentada em três etapas: de 50 a 200 mg·L⁻¹, de 200 a 500 mg·L⁻¹ e até 600 mg·L⁻¹, avaliando-se a eficiência do processo. Nos dois primeiros intervalos, observou-se que a quantidade de metais ainda não era suficiente para atingir o limite máximo de adsorção, embora tenha ocorrido um aumento significativo na captura de zinco e um aumento mais gradual para cádmio e chumbo. Já no último intervalo, atingiu-se o valor máximo de absorbância, evidenciando a ocupação efetiva dos sítios ativos do adsorvente.⁷

Seletividade, Cinética e Reutilização

O estudo do processo de adsorção e de sua seletividade frente à presença de diferentes íons metálicos em um mesmo meio é essencial, uma vez que águas contaminadas por atividades industriais e outras fontes geralmente apresentam múltiplos contaminantes. Em relação ao polímero e à partícula de Fe₃O₄/C, em um meio contendo zinco, cádmio e chumbo, observou-se maior efetividade na adsorção utilizando o nanopolímero magnético. Esse comportamento pode ser explicado pela maior interação entre

o material e os íons metálicos, decorrente da maior quantidade de grupos funcionais e de sítios ativos disponíveis em sua superfície.⁷ Foi realizada a análise da cinética de adsorção e observou-se que o equilíbrio do processo foi atingido após 20 minutos. Dessa forma, foram conduzidos seis ciclos de adsorção com o objetivo de avaliar a possibilidade de reutilização do adsorvente. Observou-se uma redução mínima na eficiência de adsorção ao longo dos ciclos, o que corrobora a viabilidade do reuso efetivo do material.

Conclusões

A partir da análise realizada, verifica-se que a adsorção utilizando nanopolímeros magnéticos à base de carbono constitui uma estratégia promissora para o tratamento de águas contaminadas por metais pesados. O estudo de Shoulian Wei *et al.* demonstrou que o nanopolímero Fe₃O₄/C@PM apresenta desempenho superior em relação às nanopartículas Fe₃O₄/C, resultado da maior disponibilidade de sítios ativos e da presença de grupos funcionais capazes de interagir eficientemente com os íons metálicos. Observou-se que parâmetros como pH, concentração do adsorvente e concentração inicial dos metais exercem influência direta sobre a eficiência do processo adsorptivo, sendo o pH próximo à neutralidade o mais favorável. Além disso, o material apresentou rápida cinética de adsorção, atingindo o equilíbrio em curto intervalo de tempo, e manteve alta eficiência após sucessivos ciclos de reutilização, evidenciando sua estabilidade e viabilidade prática de reutilização. Dessa forma, os resultados reforçam o potencial dos nanopolímeros magnéticos como alternativas eficazes, sustentáveis e economicamente viáveis para a mitigação da contaminação por metais pesados em ambientes aquáticos.

Contribuições por Autor

A escrita do presente artigo e a revisão bibliográfica feita são de Victoria Pires da Silva.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial.

Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 Após 9 anos, metais do desastre de Mariana chegam às baleias no litoral; ‘desastre continua acontecendo’, diz pesquisador, <https://g1.globo.com/es/espírito-santo/norte-noroeste-es/noticia/2024/09/11/apos-9-anos-metais-do-desastre-de-mariana-chegam-as-baleias-no-litoral-desastre-continua-acontecendo-diz-pesquisador.ghtml>, (accessed 10 January 2026).
- 2 Brumadinho, <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sudeste/mg/brumadinho-fiocruz-detecta-aumento-de-metais-em-urina-de-criancas/>, (accessed 10 January 2026).
- 3 A. Bianchini, A. Cardoso Bastos, E. Costa Teixeira , E. V. de Castro and J. Abdala Dergam dos Santos , RELATÓRIO ANUAL: Integração da Biodiversidade do Ambiente Dulcícola , Fundação Espírito-santense de Tecnologia, Vitória, 2019.
- 4 A. L. L. Motta, N. L. Motta, D. D. S. Sales, C. M. R. Sales, C. H. Nunes and R. D. S. Viana, Heavy Metal Water Contamination: Anthropogenic Sources and Environmental and Public Health Implications, *RGSA*, 2025, **19**, e012300.
- 5 P. Saravanan, V. Saravanan, R. Rajeshkannan, G. Arnica, M. Rajasimman, G. Baskar and A. Pugazhendhi, Comprehensive review on toxic heavy metals in the aquatic system: sources, identification, treatment strategies, and health risk assessment, *Environmental Research*, 2024, **258**, 119440.
- 6 Adsorption - an overview | ScienceDirect Topics, <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/adsorption>, (accessed 10 January 2026).
- 7 S. Wei, S. Huang, J. Zhou, C. Xiao, J. Cao, J. Xiao and C. Xie, Magnetic Carbon Porous Polymer Prepared from a New Suspended Emulsion for the Absorption of Heavy Metal Ions, *Polymers*, 2025, **17**, 257.
- 8 X. Chen, M. F. Hossain, C. Duan, J. Lu, Y. F. Tsang, M. S. Islam and Y. Zhou, Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review, *Chemosphere*, 2022, **307**, 135545.