

SÍNTESE E APLICAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO MAGNÉTICO PARA REMOÇÃO DO CORANTE ÍNDIGO CARMIM EM MEIO AQUOSO

¹João Victor do Nascimento dos Santos, ²Diego de Jesus Oliveira, ³Maria Clara Maia Pereira, ⁴Elaine Cardoso da Silva, ⁵Luciana Resende Marcelo

¹IFRJ campus Duque de Caxias (IFRJ-CDuC), e-mail: vitinhodoene07@gmail.com; ²IFRJ campus Duque de Caxias (IFRJ-CDuC), e-mail: diegojoliveira2007@gmail.com;

³IFRJCDuC, e-mail: mariakimofc@gmail.com; ⁴IFRJ-CDuC, e-mail: elainesilva678.ess@gmail.com; ⁵IFRJ-CDuC, e-mail: luciana.marcelo@ifrj.edu.br

***Gestão Ambiental e Políticas Ambientais
Inovação tecnológica para sustentabilidade***

Resumo

A poluição dos recursos hídricos é um dos principais desafios atuais, por isso a busca por tecnologias para a remediação de águas contaminadas é urgente. Neste trabalho, foi investigada a síntese e a aplicação do carvão ativado magnético (CA-Fe₃O₄) para a remoção do corante índigo carmim, em meio aquoso. O carvão magnético foi sintetizado pelo método de precipitação e oxidação parcial de Fe(II) seguida de tratamento térmico via micro-ondas *in situ* e caracterizado pelas técnicas de DRX, FTIR, MEV e EDS. Para determinar as melhores condições operacionais do processo de adsorção, foi avaliada a influência do tempo de contato, da massa do adsorvente e do pH, empregando uma solução de índigo carmim de 50 mg/L. Os resultados das análises de caracterização confirmaram a formação de material nanométrico, magnético e poroso. Nos testes de adsorção, o equilíbrio foi alcançado em 360 minutos, com remoção de aproximadamente 93% do corante. A dosagem de 4,0 g/L (200 mg) apresentou o melhor desempenho, atingindo cerca de 99% de remoção, enquanto o ajuste do pH não afetou a porcentagem de adsorção. Conclui-se que o CA-Fe₃O₄ apresentou elevada eficiência na remoção do índigo carmim, demonstrando potencial para aplicação no tratamento sustentável de efluentes contaminados por corantes.

Palavras-chave: Adsorção; Corantes; Nanomateriais magnéticos; Tratamento de efluentes.

Introdução

A poluição dos recursos hídricos é um dos principais desafios atuais para a preservação e sustentabilidade do meio ambiente. Muitos poluentes, devido à persistência ambiental, podem comprometer o ecossistema e potencializar a escassez de água, entre eles os corantes (Tabi *et al.*; 2022). Os corantes sintéticos são moléculas altamente estáveis, de forma que os métodos convencionais de tratamento de água não são capazes de remover esses poluentes (Molla *et al.*, 2019). Por isso, o desenvolvimento de métodos para a remoção desses contaminantes em água é necessário. Entre as técnicas investigadas, a adsorção é um dos métodos avançados mais simples, eficaz e sustentável, sendo considerada uma alternativa

econômica e amplamente aplicável para a remediação de águas contaminadas (Wang *et al.*, 2018). Dentre os diversos corantes existentes, este trabalho tem como foco o índigo carmim, escolhido devido à sua grande importância industrial.

O carvão ativado (CA) é um dos adsorventes mais utilizados para a remoção de poluentes orgânicos em solução aquosa por conta da sua alta área superficial específica (Tabi *et al.*; 2022). Entretanto, por ser poroso e hidrofóbico, o CA não apresenta uma boa dispersão em água. Uma forma de contornar esse problema, é combinar o carvão ativado com nanopartículas magnéticas, especialmente as de magnetita (Fe_3O_4). A presença de Fe_3O_4 torna o CA magnético, favorecendo a separação do adsorvente após o tratamento, tornando o processo mais rápido e eficiente (Gao *et al.*, 2019). Além disso, as nanopartículas de Fe_3O_4 também exibem propriedades adsorventes, podendo aumentar a capacidade de adsorção do CA (D'Cruz *et al.*, 2020).

Embora o nanocompósito CA- Fe_3O_4 seja apresentado como um material adsorvente promissor para o tratamento de água, estudos mais detalhados direcionados aos métodos de síntese são necessários, visto que as condições de síntese podem interferir nas propriedades físico-químicas do adsorvente. Outro aspecto que precisa ser considerado a sustentabilidade da rota de síntese empregada, principalmente quando objetiva-se a aplicação do material para a remediação ambiental. O método convencional para a obtenção das nanopartículas de Fe_3O_4 é a coprecipitação dos íons Fe^{2+} e Fe^{3+} em meio básico e atmosfera inerte (geralmente, usa-se N_2) (Marcelo *et al.*, 2021). Uma adaptação desse método, é promover a precipitação e oxidação parcial de Fe(II) com uma base e, posteriormente, realizar um tratamento térmico para a formação da magnetita. A rota dessa síntese quando comparada à rota do método convencional, emprega menos insumos e requer um tempo menor, aumentando a veracidade do processo (Costa *et al.*; 2025).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi sintetizar o carvão ativado magnético (CA- Fe_3O_4) pelo método de precipitação e oxidação parcial de Fe(II) seguida de tratamento térmico via micro-ondas *in situ* e investigar sua capacidade de adsorção para o corante índigo carmim.

Metodologia

O nanocompósito foi sintetizado pelo método de precipitação e oxidação parcial de Fe(II) seguida de tratamento térmico por micro-ondas *in situ* em proporções em massa de CA: Fe_3O_4 1:2. Para isto, 5,00 mL de solução de NaOH 2,5 mol/L foi adicionado gota a gota em um béquer contendo 1,81 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e 0,25 g de carvão ativado dispersos com

150,00 mL de água deionizada. Após a adição da base, a solução foi levada para o micro-ondas (700 W) por 3 minutos. Por fim, o sólido foi separado com ímã, lavado com água deionizada até pH 7 e seco a 50 °C. Após a secagem, o material foi macerado e caracterizado por Difração de raios X (DRX), Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).

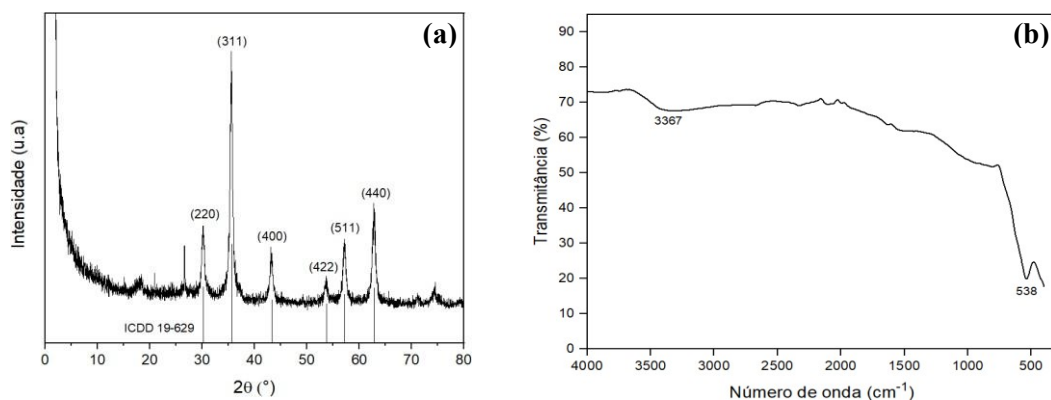
Nos ensaios de adsorção, 50,0 mL da solução de corante em concentração inicial de 50 mg/L foi colocado em contato com o CA-Fe₃O₄, em temperatura ambiente e sob agitação (220 rpm). Após o ensaio, o sobrenadante foi recolhido por separação magnética e a concentração residual do corante determinada por espectrofotometria UV-Vis ($\lambda = 609$ nm). Nesses ensaios, foram avaliados o tempo de contato (5 – 480 min), massa de adsorvente (10 – 300 mg) e pH da solução (2 – 9), sendo os ensaios dos dois últimos parâmetros realizados em triplicata.

Resultados e Discussão

O material obtido pela síntese apresentou propriedade magnética adequada para a separação da solução aquosa, indicando a formação de um carvão ativado magnético. Para confirmar se as partículas magnéticas são de magnetita, realizou-se a análise de DRX e a presença de picos compatíveis com o padrão de difração da magnetita (Figura 1a), indicaram a formação de Fe₃O₄. Além disso, observa-se um pico em 2θ próximo a 20°, relacionado ao carbono derivado do carvão (Samanth *et al.*, 2023). O tamanho médio das partículas foi calculado pelo pico (311) e o resultado obtido foi de 15,0 nm, comprovando a formação de um nanomaterial. A confirmação da formação de Fe₃O₄ foi realizada pela análise de FTIR (Figura 1b), uma vez que é possível observar uma banda em 538 cm⁻¹, característica da ligação Fe-O da estrutura da magnetita (Costa *et al.*, 2025).

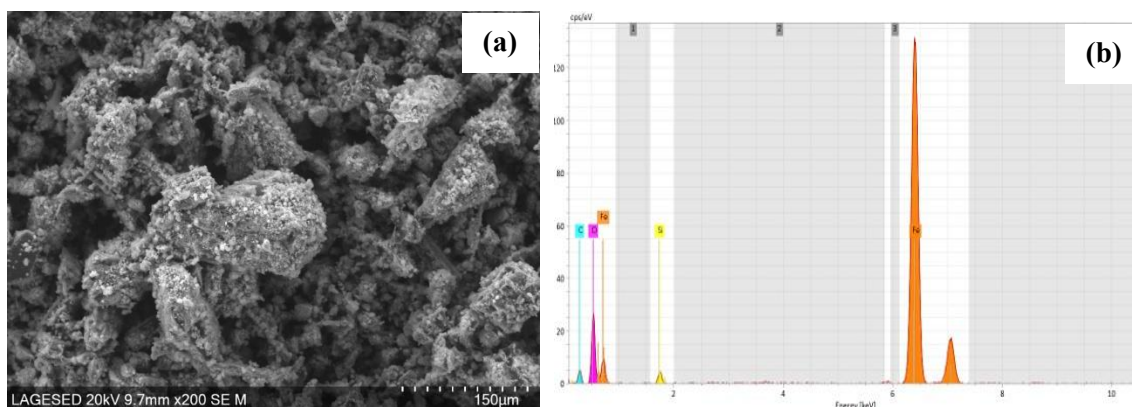
A imagem obtida por MEV (Figura 2a) evidencia que o material apresenta estrutura porosa e irregular, além de uma dispersão heterogênea das nanopartículas de Fe₃O₄ impregnadas. A presença dos picos referentes aos elementos C, Fe e O no espectro EDS (Figura 2b), comprovaram interação bem-sucedida entre a superfície do CA e as NP-Fe₃O₄.

Figura 1: Difratoograma (a) e espectro FTIR (b) do nanocompósito CA-Fe₃O₄



Fonte: Autores, 2026.

Figura 2: Imagem obtida por MEV (a) e espectro EDS (b) do nanocompósito CA-Fe₃O₄

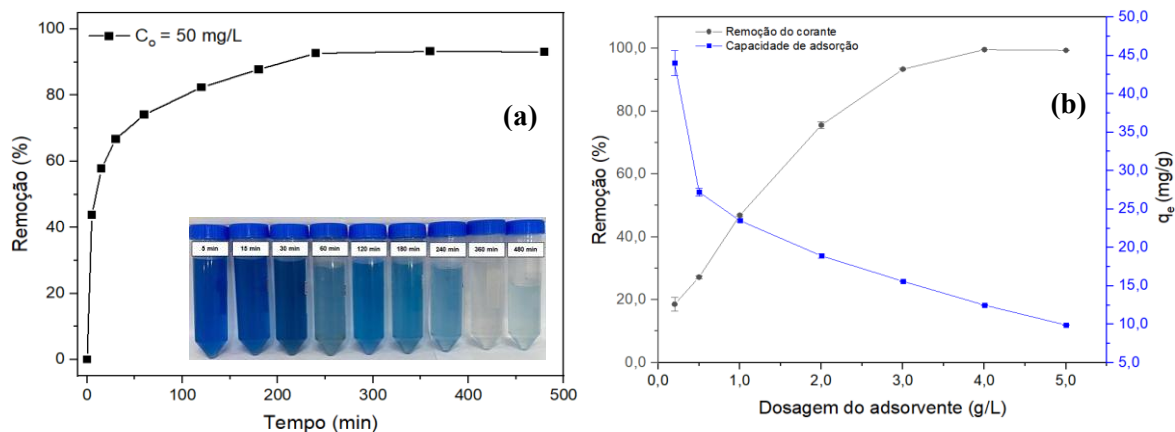


Fonte: Autores, 2026.

O efeito do tempo de contato na porcentagem de remoção do índigo carmim 50 mg/L pelo CA-Fe₃O₄ é apresentado na Figura 3a. Observa-se que a porcentagem de remoção aumenta rapidamente nos primeiros minutos e a partir de 180 min, a curva começa a se estabilizar atingindo valor máximo em 360 min (aproximadamente 93%). A influência da dosagem do adsorvente também mostrou um comportamento semelhante (Figura 3b). Para valores de massa maiores, foram alcançadas maiores % de remoção. Contudo, a partir de 4,0 g/L (200 mg CA-Fe₃O₄), não há variação da % de remoção. Em contrapartida, a capacidade de adsorção diminui, o que é esperado visto que a concentração inicial do corante foi a mesma.

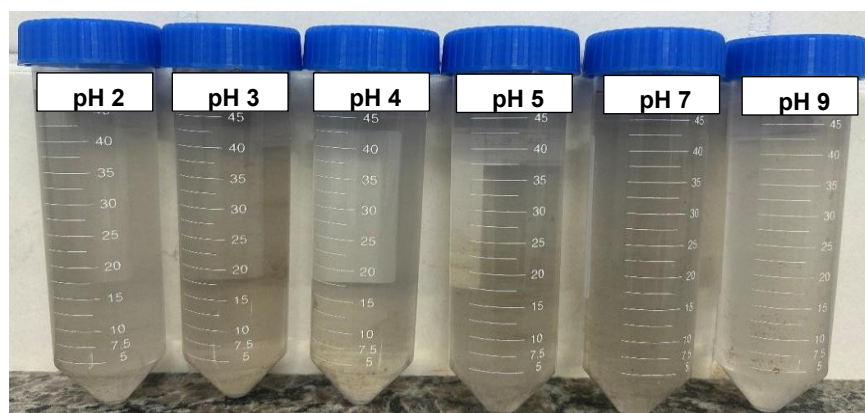
Outro parâmetro avaliado foi o pH da solução do corante (Figura 4). Os valores de % de remoção variaram de 99 a 100%, sugerindo que a adsorção do índigo carmim pelo CA-Fe₃O₄ é favorecida em meio ácido a levemente básico. Em pH mais elevado, a superfície do adsorvente pode estar carregada negativamente, a depender do ponto de carga zero, provocando repulsão com os grupos aniônicos do corante (Aulia *et al.*, 2026).

Figura 3: Efeito do tempo de contato (a) e da massa de adsorvente (b) na remoção do corante índigo carmim pelo nanocompósito CA-Fe₃O₄



Fonte: Autores, 2026.

Figura 4: Efeito do pH na remoção do corante índigo carmim pelo nanocompósito CA-Fe₃O₄



Fontes: Autores, 2026.

Conclusão

Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que o nanocompósito CA-Fe₃O₄ sintetizado pelo método de precipitação e oxidação parcial de Fe(II) seguida de tratamento térmico via micro-ondas *in situ* foi produzido com sucesso, apresentando propriedades estruturais e magnéticas adequadas para aplicação como adsorvente. As análises de DRX, FTIR, MEV e EDS confirmaram a formação da magnetita impregnada na matriz de carvão ativado, evidenciando a obtenção de um material nanométrico.

Nos ensaios de adsorção, verificou-se que o aumento do tempo de contato favoreceu a remoção do corante até o equilíbrio do sistema, alcançado em 360 minutos, com eficiência acima de 90%. Além disso, a avaliação da massa do adsorvente mostrou que 200 mg foi a condição mais adequada, proporcionando remoção de aproximadamente 99% do corante. O estudo de pH indicou que a porcentagem de remoção foi semelhante na faixa avaliada (2 a 9),

apontando que a adsorção do índigo carmim pelo CA-Fe₃O₄ é favorecida em meio ácido a levemente alcalino. A análise visual da coloração da solução após a adsorção mostrou que o CA-Fe₃O₄ tem um ótimo desempenho para a descoloração da água contendo índigo carmim. Esses resultados sugerem que o material apresenta potencial para futura aplicação no tratamento de efluentes contendo corantes, sendo necessários estudos adicionais em efluentes industriais reais para confirmar seu desempenho.

Referências

AULIA, N. *et al.* Steam-activated carbon derived from nypa palm fronds (*Nypa fruticans*) for efficient adsorption of indigo carmine dye: Characterization, kinetics, isotherms, and thermodynamics. **Results Eng.**, v. 30, p. 1–17, 2026.

COSTA, M. F. *et al.* Síntese verde de nanopartículas de magnetita e avaliação das propriedades de adsorção. In: 64º Congresso Nacional de Química, 2025, Belo Horizonte. **Anais eletrônico [...]** Belo Horizonte, p. 1-10. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2025/trabalhos.html>. Acesso em: 28 jun. 2026.

D'CRUZ, B. *et al.* Efficient and recoverable magnetic AC–Fe₃O₄ nanocomposite for rapid removal of promazine from wastewater. **Mater. Chem. Phys.**, v. 240, 122109, 2020.

GAO, M. *et al.* Novel magnetic graphene oxide decorated with persimmon tannins for efficient adsorption of malachite green from aqueous solutions. **Colloids Surf. A**, v. 566, p. 48–57, 2019.

MARCELO, L. R. *et al.* Synthesis of iron-based magnetic nanocomposites and applications in adsorption processes for water treatment: a review. **Environ. Chem. Lett.**, v. 19, p. 1229–1274, 2021.

MOLLA, A. *et al.* Selective adsorption of organic dyes on graphene oxide: Theoretical and experimental analysis. **Appl. Surf. Sci.**, v. 464, p. 170–177, 2019.

SAMANTH, A. *et al.* Enhanced adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid using low-temperature carbonized *Peltophorum pterocarpum* pods and its statistical physics modeling. **Chemosphere**, v. 336, 139143, 2023.

TABI, G. A. *et al.* Non-linear modelling of the adsorption of Indigo Carmine dye from wastewater onto characterized activated carbon/volcanic ash composite. **Arab. J. Chem.**, v. 15, p. 103515, 2022.

WANG, T. *et al.* Adsorption of agricultural wastewater contaminated with antibiotics, pesticides and toxic metals by functionalized magnetic nanoparticles. **J. Environ. Chem. Eng.**, v. 6, n. 5, p. 6468–6478, 2018.