



APLICAÇÃO DO COMPÓSITO CATALÍTICO CB/Fe₃O₄ NA DEGRADAÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS ATRAVÉS DE PROCESSOS FENTON

Rayany M. R. Santana¹; Rayssa K. M. Gomes¹; Vanessa O. M. Cavalcanti¹; Alex, L. A. Lucena; Daniella C. Napoleão¹; Marta M. M. B. Duarte¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Química, Recife, Pernambuco, Brasil

Palavras-Chave: Celulose bacteriana, Magnetita, Processos Oxidativos Avançados

Introdução

Atualmente, diferentes segmentos industriais desempenham um papel de destaque na sociedade. As indústrias têxteis, por exemplo, existem para suprir a grande demanda por vestuário e utilidades em todo o mundo (Galatti e Baruque-Ramos, 2022). No entanto, quando seus efluentes não são devidamente tratados, esse tipo de atividade causa impactos negativos ao meio ambiente (Luo; Wu; Ding, 2023; Al-Tohamy *et al.*, 2022). Isso se deve à composição de seus efluentes, que são constituídos por materiais inorgânicos e orgânicos tóxicos, como corantes sintéticos (Ismail e Sakai, 2022).

Os processos convencionais utilizados em estações de tratamento de águas residuais apresentam limitações e, portanto, não conseguem remover completamente a alta carga de poluentes presentes em seus resíduos e a coloração causada pelos corantes (Al-Tohamy *et al.*, 2022). Nesse contexto, tratamentos alternativos têm sido estudados, destacando-se os processos oxidativos avançados (POA) (Mehrkah *et al.*, 2024; Shekho; Hassan, 2024; Mukherjee *et al.*, 2023; Ponnusami *et al.*, 2023; Ismail; Sakai, 2022). Estes atraem a atenção de pesquisadores, pois são considerados simples, eficientes e aplicáveis para o tratamento de poluentes orgânicos persistentes.

Os POA são baseados na geração de espécies reativas de oxigênio, principalmente radicais hidroxila (HO[•]). Entre os processos estão as reações de Fenton. Nelas, compostos de ferro são utilizados para catalisar a reação de decomposição de um agente oxidante em HO[•] (Fenton, 1894). Para aprimoramento dos níveis de degradação, geralmente se utiliza a reação de Fenton combinada a algum tipo de radiação (processo foto-Fenton), como a solar. Ademais, Moradi *et al.* (2020) demonstraram ainda que o efeito sinérgico entre a luz e a irradiação por ultrassom (processo sono-foto-Fenton), em alguns casos, pode promover uma maior geração de radicais reativos, facilitar a regeneração do ciclo Fe³⁺/Fe²⁺ e limpar a superfície do catalisador de modo a evitar o acúmulo de poluentes. Deste modo, o emprego da energia solar juntamente com a irradiação ultrassônica mostra-se como uma linha de pesquisa próspera, atentando para a deficiência na divulgação de estudos que envolveram este tipo de sistema no tratamento de águas residuais têxteis.

Quanto aos íons de ferro empregado como catalisador das reações de Fenton, eles podem ser provindos de materiais sólidos solúveis e insolúveis, e obtidos de diferentes fontes, dada a abundância de matérias-primas à base deste metal na natureza (Zhu *et al.*, 2023). Dentre vários compostos de ferro, a magnetita (Fe₃O₄) é um óxido que apresenta alta atividade catalítica (Scaria *et al.*, 2021). É um semicondutor quimicamente estável e não tóxico que

possui propriedades magnéticas atrativas para aplicações industriais. Quando em tamanho nanométrico, para evitar aglomeração de suas partículas e turbidez do meio reacional, pode ser imobilizado em um meio suporte, produzindo um compósito (Kamarudin *et al.*, 2021). Assim, substratos sólidos que imobilizem os catalisadores, formem os nanocompósitos e auxiliem nas reações de degradação têm sido o foco de pesquisas (Li *et al.*, 2024; Rubina; Vineetha, Anas, 2024; Le *et al.*, 2023).

A celulose bacteriana (CB) é um biopolímero nanoestruturado que tem recebido atenção de pesquisadores e da indústria devido à sua origem renovável e natureza ecologicamente correta. A CB exibe características físico-químicas e estruturais interessantes que permitem sua aplicação em várias áreas da ciência, incluindo biomedicina e engenharia de materiais (Ding *et al.*, 2021). A produção de nanocompósitos CB/metalo permite a combinação de peculiaridades e singularidade de ambos os materiais, resultando em um compósito forte com alta área de superfície e porosidade (Idumah, 2021). Essas são características importantes para um catalisador a ser usado no tratamento via POA.

Na área ambiental, compósitos CB/magnetita (ou CB/Fe₃O₄) já foram avaliados como adsorvente para remoção de corantes (Wahid *et al.*, 2022). Entretanto, trabalhos relacionados ao emprego deste material em reações de Fenton para tratamento de corantes sintéticos na matriz têxtil ainda são pouco conhecidos. Zhu *et al.* (2011) empregaram nanocompósitos esféricos CB/Fe₃O₄ para adsorver metais pesados. Em contraste, Alizadeh e Rezaee (2022) empregaram este mesmo material para remover o fármaco tetraciclina via adsorção e reações de Fenton. Os pesquisadores concluíram que o material tem boa atividade catalítica, no entanto, também mostrou propriedade adsorviva, o que é indesejável para uso exclusivo no tratamento de águas residuais via POA. Portanto, este trabalho busca sintetizar um novo material com propriedades puramente catalíticas.

Diante do exposto, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um compósito capaz de atuar como catalisador heterogêneo de processos oxidativos avançados que envolvem reações de Fenton e que possam ser utilizados como metodologias eficientes para tratamento de uma mistura de corantes têxteis.

Material e Métodos

Nanopartículas de magnetita foram produzidas a partir do método de coprecipitação, baseando-se no procedimento descrito por Unal *et al.* (2019). Celulose bacteriana foi obtida na forma de hidrogéis, em um processo de fermentação, utilizando a bactéria *Komagataeibacter hansenii* (cepa ATCC 23769), que foi cultivada em meio de cultura Hestrin-Schramm sólido estéril. O processo fermentativo inicialmente envolveu a etapa de padronização da quantidade de bactérias (preparação de inóculo), para posterior produção dos hidrogéis em placas de cultivo de 24 poços. Em tais poços, distribuíram-se 2,42 mL de uma suspensão celular, composta por meio salino líquido estéril (patente BR 102020012400-5 A2), 20% de inóculo e 1% de álcool etílico absoluto. Após um período de incubação (30 ± 1°C, estático, 7 dias), coletaram-se os hidrogéis formados na interface ar-líquido de cada poço, lavando-os com água destilada, esterilizando-os em autoclave e armazenando-os (4 ± 2°C).

Por sua vez, a produção do compósito CB/Fe₃O₄ se deu após a imersão dos hidrogéis de CB em uma suspensão aquosa de magnetita (10 g·L⁻¹) (180 rpm, 30 ± 1 °C, 60 min). Ao serem removidas da suspensão, todas as unidades de CB/Fe₃O₄ foram lavadas, secas em estufa (60 ± 1 °C), submetidas a testes de adesão em banho ultrassônico (60 min), novamente secas e, por fim, utilizadas como fonte de ferro em ensaios por oxidação avançada.

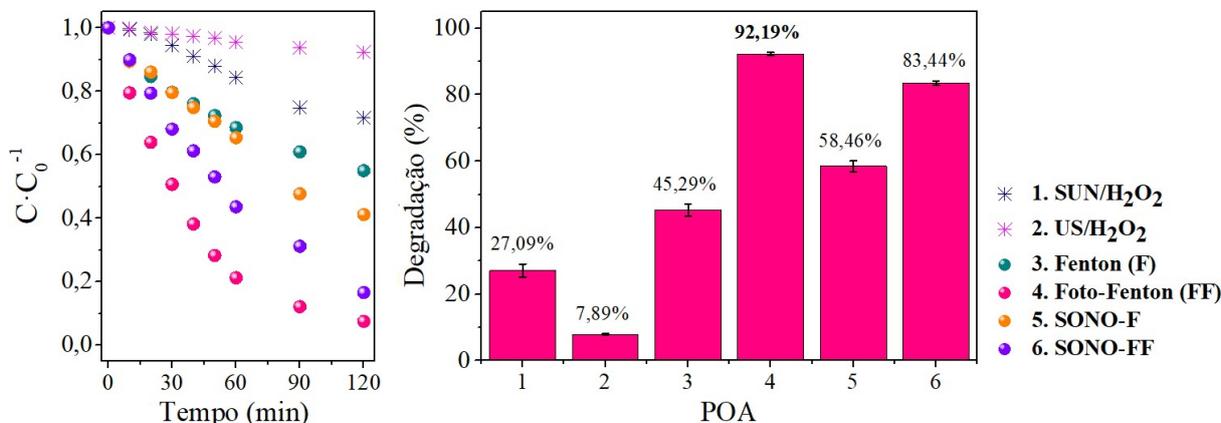
Nos testes utilizando o tratamento via POA, empregaram-se os corantes têxteis preto direto 22 (Índice de Cor (CI) 35435), vermelho direto 23 (CI 29160), vermelho direto 227 (CI não catalogado) e azul reativo 21 (CI 18097) como os contaminantes a serem degradados. Ao solubilizá-los em água destilada, obteve-se uma solução multicomponente (constituída por 15 mg L⁻¹ de cada substância), que seria tratada a partir de diferentes tipos de POA (Fenton, foto-Fenton, sono-Fenton e sono-foto-Fenton). Os sistemas de tratamento (em triplicata) foram compostos por 200 mL da solução de corantes em pH 3, 5 unidades de CB/Fe₃O₄ e 50 mg·L⁻¹ de H₂O₂. Após 30 min de contato entre o CB/Fe₃O₄ e a solução a ser tratada, o processo Fenton foi conduzido em ausência de radiação, enquanto nos outros processos foram utilizados uma lâmpada incandescente com filamento de tungstênio (300 W), simulando a energia solar, e/ou um banho ultrassônico (37 kHz, 200 W, 25-35°C). Ademais, testes controle também foram realizados para verificar a contribuição dos processos de peroxidação (H₂O₂), fotoperoxidação (luz + H₂O₂) e sonoperoxidação (ultrassom + H₂O₂) na degradação.

Ao longo de 120 min, a eficiência dos POA foi avaliada com base no percentual de degradação da mistura de corantes. Determinou-se a concentração dessas substâncias em solução, antes e após tratamentos, usando a técnica de espectrofotometria UV/Vis, no comprimento de onda (λ) de maior absorbância da mistura (508 nm). A concentração de ferro lixiviado foi estipulada através da técnica de espectrofotometria de absorção atômica com chama.

Resultados e Discussão

Constatou-se inicialmente que o compósito CB/Fe₃O₄ foi capaz de atuar como o catalisador das reações de Fenton, uma vez que foram observados níveis de degradação superiores a 45,29%, ao submeter as soluções da mistura dos corantes aos POA Fenton (F), foto-Fenton (FF), sono-Fenton (sono-F) e sono-foto-Fenton (sono-FF). Os resultados detalhados de cada um dos ensaios estão exibidos na Figura 1.

Figura 1 - Resultados da degradação da mistura de corantes têxteis através de diferentes tipos de POA, empregando o compósito CB/Fe₃O₄. Condições experimentais: pH = 3, 5 unidades de CB/Fe₃O₄ (quando aplicável), [H₂O₂] = 50 mg·L⁻¹ e t = 120 min.



Através da Figura 1, verifica-se que na ausência do CB/Fe₃O₄ os processos de fotoperoxidação (SUN/H₂O₂) e sonoperoxidação (US/H₂O₂) foram pouco eficientes para degradar a mistura dos corantes em estudo. Por outro lado, a presença das membranas de CB com magnetita aumentou a eficiência de degradação, inclusive no tratamento realizado em ausência de luz ou ultrassom (processo F). Por meio desses resultados, revelou-se que o compósito atendeu ao objetivo inicial do trabalho, atuando como o catalisador das reações, o que tornou a decomposição do H₂O₂ em HO· mais rápida e eficiente com a utilização do ferro.

Na Figura 1, vê-se também que a associação de radiação ao processo Fenton, quer seja solar (processo FF) ou ultrassônica (processo sono-F), acelerou o decaimento da concentração dos corantes. Entretanto, é válido ressaltar que nas condições experimentais utilizadas, o processo sono-Fenton apresentou uma degradação muito mais lenta que o processo foto-Fenton, tal como observado por Saleh e Taufik (2019). Segundo os autores, isto pode ter ocorrido devido ao efeito antagônico da sonoluminescência, que diferentemente da radiação solar, não só decompõe o H₂O₂ em HO· desejáveis, como também, paralelamente, causa a decomposição direta das moléculas de água em íons H⁺ e HO⁻ (Fedorov *et al.*, 2022).

Ainda com base na Figura 1, observa-se que o sistema empregando as radiações solar e ultrassônica de forma combinada (processo sono-FF) não contribuiu para que a degradação fosse mais rápida e eficiente que a obtida por meio do ensaio com o processo FF. Por outro lado, o nível de degradação ao utilizar o processo sono-FF foi superior ao obtido através do processo sono-F. Baseando-se nesses resultados, constatou-se que a radiação solar artificial se sobressaiu à radiação ultrassônica, onde seu emprego se apresentou como um fator importante para a obtenção de uma maior eficiência a partir do tratamento via POA. Com isso, é importante destacar que em países como o Brasil, a disponibilidade de luz solar natural ao longo do ano é grande, com uma média de potencial de irradiação global igual a 5,49 kWh·m⁻² (Pereira *et al.*, 2017). Isto garante que o uso do processo foto-Fenton além de eficiente pode ser de baixo custo quanto à fonte energética, mostrando-se ainda mais adequado.

Com relação às concentrações de ferro, realizou-se uma análise do ferro dissolvido para verificar se houve lixiviação do metal da superfície do compósito para a solução em todos os sistemas avaliados. Obtiveram-se os seguintes resultados: 1,74 ± 0,05 mg·L⁻¹ (Fenton), 1,60 ±

0,08 mg·L⁻¹ (foto-Fenton), 3,07 ± 0,30 mg·L⁻¹ (sono-Fenton) e 2,86 ± 0,27 mg·L⁻¹ (sono-foto-Fenton).

Diante do fenômeno de lixiviação de ferro observado, sugere-se que a disponibilidade de íons deste metal em solução contribuiu para a ocorrência de reações homogêneas, resultando em um efeito sinérgico de catálise homogênea e heterogênea, tal como observado para outros compósitos, conforme relatado por Yan *et al.* (2023), Li *et al.* (2023) e Zhang *et al.* (2021). Li *et al.* (2023), por exemplo, quando utilizaram o compósito Fe₃O₄-CeO₂-TiO₂ na degradação do corante laranja ácido 7 via processo foto-Fenton empregando luz ultravioleta, concluíram que a lixiviação de ferro foi determinante para aumentar a eficiência do processo.

Baseando-se nisto, ensaios adicionais foram realizados de modo a avaliar a contribuição do ferro lixiviado. Nestes experimentos, a reação catalítica teve início depois de retirar as unidades de membranas de compósito das soluções após um período de 30 min, o qual foi previamente estabelecido em uma avaliação preliminar quanto à ocorrência de processo adsorptivo. Logo, verificou-se que o ferro liberado do CB/Fe₃O₄ para a solução contribuiu em média com cerca de 2,00% da degradação de corantes, mostrando que, embora a reação heterogênea entre o catalisador e o H₂O₂ tenha sido dominante, o mecanismo homogêneo foi parcialmente responsável pelo aumento da eficiência dos tratamentos.

Salienta-se ainda que a utilização de ultrassom foi capaz de produzir uma maior quantidade de ferro lixiviado, fato associado à alta vibração gerada pelas ondas ultrassônicas. Sendo assim, com base na menor eficiência observada nos ensaios que utilizaram este tipo de radiação, pode-se afirmar que em conjunto à sonoluminescência, o excesso de ferro em solução também pode ter gerado um efeito negativo ao tratamento, uma vez que causa a autoinibição do HO· oxidante, formando íons hidroxilas, com menor poder oxidativo que os radicais mencionados (Bensalah; Dbira; Bedoui, 2019).

À vista de todas as observações, conclui-se que nas condições experimentais adotadas no estudo, a radiação solar artificial atuou de forma mais significativa que a radiação ultrassônica, permitindo obter eficiência de degradação superior a 92%. Resumidamente, os testes de degradação da mistura de corantes mostraram a seguinte ordem de eficiência para os diferentes tipos de POA: foto-Fenton > sono-foto-Fenton > sono-Fenton > Fenton > fotoperoxidação > sonoperoxidação.

Por fim, os processos foram comparados no aspecto econômico. Realizou-se uma análise de desembolso, em que o custo total de cada um deles foi calculado a partir do gasto com produtos químicos e eletricidade para tratamento de 1 m³ de solução por kg de corante, desconsiderando as despesas relacionadas a investimento e manutenção de equipamentos.

Logo, estimou-se os seguintes custos (em dólar): US\$ 575,04 (Fenton), US\$ 537,14 (foto-Fenton), US\$ 710,72 (sono-Fenton) e US\$ 784,51 (sono-foto-Fenton). A partir desses resultados, observa-se que, em geral, tratar uma mesma quantidade de corantes em solução utilizando os processos Fenton e foto-Fenton/solar é mais econômico do que fazer uso da radiação ultrassônica. Portanto, destaca-se que este é um fator relevante para a aplicação dessas metodologias nas estações de tratamento de efluentes industriais, pois além de apresentar um

menor custo, elas podem ocorrer em série, em período diurno (processo foto-Fenton) e noturno (processo Fenton).

Conclusões

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram que as metodologias utilizadas para a síntese de nanopartículas catalíticas de magnetita e produção de celulose bacteriana foram apropriadas, permitindo a obtenção do compósito CB/Fe₃O₄. Este apresentou atividade catalítica quando aplicado aos POA Fenton, foto-Fenton, sono-Fenton e sono-foto-Fenton. Tais processos se mostraram viáveis para degradar a mistura dos quatro corantes têxteis empregados no estudo. Entretanto, destaca-se que nas condições experimentais utilizadas inicialmente, a presença de radiação foi importante para aumentar a eficiência do tratamento Fenton, sobretudo quando aplicada a luz solar artificial (foto-Fenton), que mostrou ser mais adequada que a radiação ultrassônica (sono-Fenton). Quanto à combinação entre os dois tipos de radiação, não foram observadas melhorias nos níveis de degradação obtidos através do emprego individual da luz solar artificial. De um modo geral, o desenvolvimento do compósito com a finalidade de remediação ambiental tornou esta pesquisa inovadora e promissora, buscando-se conferir ao material uma importante aplicabilidade, disponibilizando para a comunidade científica um produto capaz de auxiliar de modo eficiente no tratamento via reação de Fenton.

Agradecimentos

FACEPE, CNPq, FACEPE (APQ 0947-3.06/22), FADE/UFPE e Lavanderia Nossa Senhora do Carmo (Caruaru -PE).

Referências

- Alizadeh, Z.; Jonoush, Z. A.; Rezaee, A. Three-dimensional electro-Fenton system supplied with a nanocomposite of microbial cellulose/Fe₃O₄ for effective degradation of tetracycline. **Chemosphere**, 317, 137890, 2023.
- Al-Tohamy, R.; Ali, S. S.; Li, F.; Okasha, K. M.; Mahmoud, Y. A. G.; Elsamahy, T.; Jiao, H.; Fu, Y.; Sun, J. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 231, 113160, 2022.
- Bensalah, N.; Dbira, S.; Bedoui, A. Mechanistic and kinetic studies of the degradation of diethyl phthalate (DEP) by homogeneous and heterogeneous Fenton oxidation. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, 11, 100224, 2019.
- Ding, R.; Hu, S.; Xu, M.; Hu, Q.; Jiang, S.; Xu, K.; Tremblay, P.; Zhang, T. The facile and controllable synthesis of a bacterial cellulose/polyhydroxybutyrate composite by co-culturing *Gluconacetobacter xylinus* and *Ralstonia eutropha*. **Carbohydrate Polymers**, 252, 117137, 2021.
- Fedorov, K.; Dinesh, K.; Sun, X.; Soltani, R. D. C.; Wang, Z.; Sonawane, S.; Boczkaj, G. Synergistic effects of hybrid advanced oxidation processes (AOPs) based on hydrodynamic cavitation phenomenon—a review. **Chemical Engineering Journal**, 432, 134191, 2022.
- Fenton, H. J. H. LXXIII. - Oxidation of tartaric acid in presence of iron. **Journal of the Chemical Society, Transactions**, 65, 899-910, 1894.
- Galatti, L. G.; Baruque-Ramos, J. Circular economy indicators for measuring social innovation in the Brazilian textile and fashion industry. **Journal of Cleaner Production**, 363, 132485, 2022.
- Zhu, H.; Jia, S.; Wan, T.; Jia, Y.; Yang, H.; Li, J.; Yan, L.; Zhong, C. Biosynthesis of spherical Fe₃O₄/bacterial cellulose nanocomposites as adsorbents for heavy metal ions. **Carbohydrate Polymers**, 86, 1558-1564, 2011.
- Idumah, C. I. Novel trends in conductive polymeric nanocomposites, and bionanocomposites. **Synthetic Metals**, 273, 116674, 2021.

Ismail, G. A.; Sakai, H. Review on effect of different type of dyes on advanced oxidation processes (AOPs) for textile color removal. **Chemosphere**, 291(3), 132906, 2022.

Kamarudin, N. S.; Jusoh, R.; Setiabudi, H. D.; Sukor, N. F.; Shariffuddin, J. H. Potential nanomaterials application in wastewater treatment: Physical, chemical and biological approaches. **Materials Today: Proceedings**, 42(1), 107-114, 2021.

Le, T. T. N.; Truong, H. B.; Hoa, L. T.; Le, H. S.; Tran, T. T. T.; Manh, T. D.; Le, V. T.; Dinh, Q. K.; Nguyen, X. C. Cu₂O/Fe₃O₄/UiO-66 nanocomposite as an efficient fenton-like catalyst: Performance in organic pollutant degradation and influencing factors based machinelearning. **Heliyon**, 9(10), e20466, 2023.

Li, D.; Zhao, Z.; Guo, J.; Shen, R.; Xu, F. Magnetic nanoscaled Fe₃O₄-CeO₂-TiO₂ composite: UV-Fenton reaction to degrade AO-7 dye. **Inorganic Chemistry Communications**, 149, 110389, 2023.

Li, W.; Zhu, Q.; Yin, X.; Gao, Z.; Wei, K.; Liu, S.; Zhang, X.; Chen, H.; Zhang, Y.; Han, W. Enhanced heterogeneous Fenton catalysis by carbon nanotube-loaded Mn doped FeS₂ catalysts for pollutant degradation: Co-enhancement effect of Fe-S-Mn and Fe-SC linkages. **Separation and Purification Technology**, 335, 126150, 2024.

Luo, Y.; Wu, X.; Ding, X. Environmental impacts of textiles in the use stage: A systematic review. **Sustainable Production and Consumption**, 36, 233-245, 2023.

Mehrkah, R.; Park, S. Y.; Lee, J. H.; Kim, S. Y.; Lee, B. H. A comparative study of advanced oxidation-based hybrid technologies for industrial wastewater treatment: An engineering perspective. **Chemical Engineering Science**, 286, 119675, 2024.

Moradi, M.; Elahinia, A.; Vasseghian, Y.; Dragoi, E. N.; Omidi, F.; Khaneghah, A. M. A review on pollutants removal by sono-photo-Fenton processes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 8(5), 104330, 2020.

Mukherjee, J.; Lodh, B. K.; Sharma, R.; Mahata, N.; Shah, M. P.; Mandal, S.; Ghanta, S.; Bhunia, B. Advanced oxidation process for the treatment of industrial wastewater: A review on strategies, mechanisms, bottlenecks and prospects. **Chemosphere**, 345, 140473, 2023.

Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. J. L.; Ruther, R.; Abreu, S.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. F. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2 nd ed. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, E-book (88 pp), 2017.

Ponnusami, A. B.; Sinha, S.; Ashokan, H.; Paul, M. V.; Hariharan, S. P.; Arun, J.; Gopinath, K. P.; Le, Q. H.; Pugazhendhi, A. Advanced oxidation process (AOP) combined biological process for wastewater treatment: A review on advancements, feasibility and practicability of combined techniques. **Environmental Research**, 237(1), 116944, 2023.

Rubina, S.; Vineetha, P. K.; Anas, S. An efficient polymer supported Fenton type catalyst for photodegradation of organic dyes. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 449, 115410, 2024.

Saleh, R.; Taufik, A. Degradation of methylene blue and congo-red dyes using Fenton, photo-Fenton, sono-Fenton, and sonophoto-Fenton methods in the presence of iron (II, III) oxide/zinc oxide/graphene (Fe₃O₄/ZnO/graphene) composites. **Separation and Purification Technology**, 210, 563-573, 2019.

Scaria, J.; Gopinath, A.; Nidheesh, P. V. A versatile strategy to eliminate emerging contaminants from the aqueous environment: Heterogeneous Fenton process. **Journal of Cleaner Production**, 278, 124014, 2021.

Shekho, M. S.; Hassan, N. E. A review on techniques for the cleaning of wastewater. **GSC Advanced Research and Reviews**, 18(1), 118-128, 2024.

Unal, B. O.; Bilici, Z.; Ugur, N.; Isik, Z.; Harputlu, E.; Dizge, N.; Ocakoglu, K. Adsorption and Fenton oxidation of azo dyes by magnetite nanoparticles deposited on a glass substrate. **Journal of Water Process Engineering**, 32, 100897, 2019.

Wahid, F.; Zhao, X. Q.; Cui, J. X.; Wang, Y. Y.; Wang, F. P.; Jia, S. R.; Zhong, C. Fabrication of bacterial cellulose with TiO₂-ZnO nanocomposites as a multifunctional membrane for water remediation. **Journal of Colloid and Interface Science**, 620, 1-13, 2022.

Yan, P.; Wang, H.; Wang, M.; Chai, C.; Ye, Y. Efficient degradation of methylene blue by FeS₂/MoS₂ in heterogeneous Fenton-like process. **Journal of Water Process Engineering**, 56, 104479, 2023.

Zhang, Q.; Zhang, Y.; Li, Y.; Ding, P.; Xu, S.; Cao, J. Green synthesis of magnetite nanoparticle and its regulatory effect on fermentative hydrogen production from lignocellulosic hydrolysate by *Klebsiella* sp. **International Journal of Hydrogen Energy**, 46(39), 20413-20424, 2021.



63º Congresso Brasileiro de Química
05 a 08 de novembro de 2024
Salvador - BA

Zhu, Y.; Xie, Q.; Deng, F.; Ni, Z.; Lin, Q.; Cheng, L.; Chen, X.; Qiu, R.; Zhu, R. The differences in heterogeneous Fenton catalytic performance and mechanism of various iron minerals and their influencing factors: a review. **Separation and Purification Technology**, 325, 124702, 2023.