

Síntese, caracterização e aplicação de catalisadores a base de Clinoptilolita para a degradação do corante Reactive Blue via processo foto-Fenton

Pedro Antonio Galacci Reinert

Universidade Estadual de Maringá – Paraná

Jhenifer Scarlet de Sousa Monteiro

Universidade Estadual de Maringá – Paraná

Mara Heloisa Neves Olsen Scaliante

Universidade Estadual de Maringá – Paraná

Bruna Gonçalves de Souza

Universidade Estadual de Maringá – Paraná

RESUMO

A água é o recurso natural de maior importância para a sociedade, sendo essencial para satisfazer as necessidades básicas e industriais da população. No entanto, a poluição de corpos hídricos pela enorme quantidade de produtos químicos lançados a cada ano em rios, lagos e oceanos representa um sério risco a esse recurso tão valioso, sendo a causa primária disso o descarte inadequado de águas residuais de processos industriais (Adam et al., 2022). Como resultado, há um esforço contínuo da comunidade científica, principalmente na área das engenharias, para propor formas de tratar tais poluentes na tentativa de frear a contaminação crescente dos corpos hídricos.

Palavras-chave: Recursos naturais, Poluentes, Lixo urbano.

1 INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural de maior importância para a sociedade, sendo essencial para satisfazer as necessidades básicas e industriais da população. No entanto, a poluição de corpos hídricos pela enorme quantidade de produtos químicos lançados a cada ano em rios, lagos e oceanos representa um sério risco a esse recurso tão valioso, sendo a causa primária disso o descarte inadequado de águas residuais de processos industriais (Adam et al., 2022). Como resultado, há um esforço contínuo da comunidade científica, principalmente na área das engenharias, para propor formas de tratar tais poluentes na tentativa de frear a contaminação crescente dos corpos hídricos.

A poluição por metais pesados, agrotóxicos ou lixo urbano são as fontes de contaminação da água mais comentadas, porém uma muitas vezes despercebida pelo olhar alheio é o descarte inadequado de efluentes industriais. Nesse cenário, destaca-se os resíduos advindos da indústria têxtil, os quais são caracterizados pela presença de corantes. A presença destes em corpos hídricos é preocupante, pois eles comprometem a qualidade da água pela poluição visual devido a presença de cor, interferindo no processo



de fotossíntese de plantas e algas, o que leva a prejuízos consideráveis no ecossistema aquático (Macedo, Lima & Silva, 2020; Romualdo et al., 2019). Além disso, os corantes correspondem a uma série de compostos aromáticos, muitos fortemente reativos, que apresentam comportamento mutagênico e carcinogênico, ocasionando sérios problemas de saúde (Romualdo et al., 2019).

Tais contaminantes compõem a classe dos poluentes emergentes, cuja degradação por métodos usuais é altamente difícil devido à complexidade estrutural que possuem. Com isso, opta-se, no caso dos corantes, por técnicas como membranas de ultrafiltração e de adsorção de resíduos, porém elas são eficientes apenas para separá-los da água e não os remover de forma definitiva (Torres & Carvalho, 2019; Silva, Martins & Sena et. al., 2018). Por isso nos últimos anos, conforme apresentado por Guaratini e Zanoni (2000), vem ganhando destaque o desenvolvimento de tecnologias capazes de degradá-los por processos fotoquímicos, eletroquímicos ou biológicos.

Nesse contexto, aponta-se o uso de processos oxidativos avançados (POA's) como uma solução para a contaminação de corpos hídricos pela presença de corantes advindos de efluentes têxteis. Partindo disso, tem-se que para o corante *Reactive Blue*, um dos mais utilizados na indústria têxtil, uma classe de POA's que vem apresentando resultados satisfatórios de degradação é a da fotocatalise, em especial o processo foto-Fenton (Santana, Nascimento & Napoleão et. al., 2017; Araujo, 2002).

O processo fotocatalítico é caracterizado pela liberação de radicais altamente reativos, a citar radicais hidróxi (OH), por meio do uso, por exemplo, de um óxido metálico semicondutor atuando como catalisador pela atuação da luz. O composto mais utilizado nesta aplicação é o dióxido de titânio (TiO₂), porém, de acordo com Dagherir (2013), ele apresenta algumas desvantagens, como a rápida recombinação dos pares elétron/lacuna, reduzindo a eficiência do processo, e também a elevada energia de *Band Gap*, restringindo a sua aplicação à utilização de fontes luminosas altamente potentes na faixa do UV e, conseqüentemente, artificiais.

Uma alternativa é o emprego das zeólitas naturais, como é o caso da Clinoptilolita. Conforme descrito por Jewur (1985), em termos de catálise heterogênea, as zeólitas ocupam um lugar de destaque devido ao fato de promoverem reação químicas seletivas em relação ao tamanho molecular em seus poros uniformes e canais bem definidos, apresentando, inclusive, a capacidade de troca iônica em razão da estrutura cristalina formada por tetraedros de AlO₄ e SiO₄, o que possibilita uma modificação prática e econômica.

2 OBJETIVO

Sintetizar catalisadores a base de Clinoptilolita impregnados com diferentes frações mássicas de ferro (2,5 e 5% p/p), caracterizando-os pelas técnicas de Digestão Ácida assistida por micro-ondas seguida de análise por espectrofotometria de absorção atômica (AAS), Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia

de Mössbauer e Espectroscopia Fotoacústica (PAS), e realizar uma avaliação fotocatalítica do uso deles para a degradação do corante *Reactive Blue* via processo foto-Fenton.

3 METODOLOGIA

Foram preparados dois catalisadores, sendo todos a base de Clinoptilolita e impregnados com ferro para o processo foto-Fenton em diferentes teores mássicos: 2,5 e 5% p/p, os quais foram identificados conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos catalisadores.

IDENTIFICAÇÃO	COMPOSIÇÃO
2,5Fe-Clp	2,5% (p/p) de ferro e clinoptilolita (Clp).
5Fe-Clp	5% (p/p) de ferro e clinoptilolita (Clp).

Fonte: Elaboração própria.

Para o preparo os seguintes materiais foram utilizados: zeólita natural do tipo Clinoptilolita (CELTABRASIL), cloreto férrico P.A hexahidratado e água deionizada. A rota de síntese empregada é conhecida como troca iônica por via úmida (Sousa, 2007), esta consistiu na adição de 10g de Clinoptilolita em soluções de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ com a massa necessária para os teores de 2,5 e 5% p/p em agitação magnética por 2 dias. Após isso, seguiu-se para filtração à vácuo em filtro de papel comum e secagem em estufa a 60°C por 60min.

Os catalisadores foram caracterizados pelas seguintes técnicas: Digestão Ácida assistida por micro-ondas seguida de análise por espectrofotometria de absorção atômica (AAS), Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia de Mössbauer e Espectroscopia Fotoacústica (PAS). As três primeiras foram realizadas para investigar a composição e a estrutura, e a última para determinar a energia de *Band Gap*, possibilitando dessa forma uma maior compreensão do processo foto-Fenton, o que permitiu o prosseguimento do trabalho.

Para a avaliação fotocatalítica foram executados 15 testes reacionais em duplicata seguindo um planejamento experimental do tipo Box-Behnken explicitado pela Tabela 2 com três fatores (pH, concentração de catalisador e tempo de reação), cujos níveis foram retirados da literatura (Anchieta et al., 2016), sendo a variável dependente o rendimento percentual médio (R) do processo foto-Fenton, dado por Eq. (1). Cada teste consistiu na agitação por duas horas no escuro de 40mL de uma solução 20ppm de *Reactive Blue* no pH e com a concentração de catalisador especificados para a etapa de adsorção, seguida da adição de 2mL de peróxido de hidrogênio para que então a lâmpada fosse acesa, permanecendo ligada pelo tempo também especificado no estudo com o sistema ainda em agitação.

Tabela 2. Planejamento Experimental.

TESTE REACIONAL	pH	CONCENTRAÇÃO (mg/mL)	TEMPO (min)
1	2,0	100,0	60,0
2	4,0	100,0	60,0
3	2,0	400,0	60,0
4	4,0	400,0	60,0
5	2,0	250,0	30,0
6	4,0	250,0	30,0
7	2,0	250,0	90,0
8	3,0	250,0	90,0
9	3,0	100,0	30,0
10	3,0	400,0	30,0
11	3,0	100,0	90,0
12	3,0	400,0	90,0
13	3,0	250,0	60,0
14	3,0	250,0	60,0
15	3,0	250,0	60,0

Fonte: Elaboração própria.

$$R(\%) = \frac{(A_0 - A_t)}{A_0} \cdot 100 \quad (1)$$

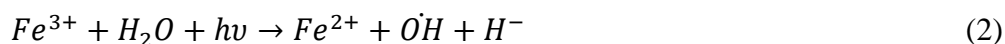
Sendo A_0 a absorvância da solução de corante 20ppm, e A_t a absorvância após o teste reacional, a qual é adquirida após filtração por espectroscopia de absorção na região UV-VIS.

A partir dos resultados obtidos pelos testes reacionais, foi realizado um mapeamento para o rendimento do processo foto-Fenton, sendo os maiores valores reproduzidos para a construção de curvas cinéticas, as quais foram utilizadas para aferir sobre o estudo fotocatalítico apresentado.

4 DESENVOLVIMENTO

A execução do presente trabalho foi dividida em duas partes, sendo a primeira destinada a validar o uso dos catalisadores preparados por meio de técnicas de caracterização para investigar a presença de íons Fe^{3+} e determinar a energia de *Band Gap*, pois conforme ilustrado nas Eq. (2) e Eq. (3), nas quais $h\nu$ se refere à energia fornecida pela fonte luminosa utilizada, que foram apresentadas por Souza, Figueira, Carvalho et al. (2021), tais fatores são essenciais para garantir o funcionamento do processo foto-Fenton, e

a segunda parte correspondeu a avaliação fotocatalítica para a degradação do corante *Reactive Blue* seguindo o planejamento experimental Box-Behnken.



5 DETERMINAÇÃO DA PRESENÇA DE Fe^{3+}

É necessária a presença da forma trivalente dos íons de ferro para que ocorra a redução destes para a forma bivalente, então foi necessário investigar a estrutura dos catalisadores sintetizados. Para isso, foram executadas três técnicas de caracterização: Digestão Ácida assistida por micro-ondas seguida de análise por espectrofotometria de absorção atômica (AAS), Difração de Raios-X (DRX) e Espectroscopia de Mössbauer.

A Digestão Ácida assistida por micro-ondas foi realizada para os dois catalisadores e também para Clinoptilolita (Clp) não modificada para fins comparativos, sendo a metodologia adaptada de um manual fornecido pela empresa Provecto Analítica. Após a execução, as amostradas foram submetidas à análise de espectrometria de absorção atômica (AAS), fornecendo uma análise composicional de quais elementos estavam presentes. A partir dos resultados apresentados na Tabela 3, é possível afirmar que em todos os catalisadores houve a impregnação de ferro, e que os valores não são iguais ao esperado pelo processo de formação e mineração da zeólita natural.

Tabela 3. Sistema de reação.

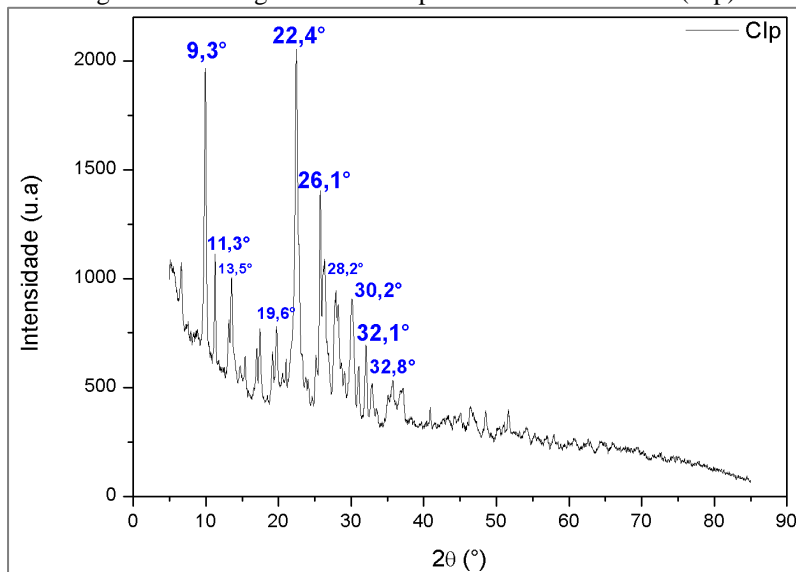
IDENTIFICAÇÃO	VALOR ESPERADO (ppm de Fe)	LEITURA NO AAS (ppm de Fe)
Clp	-	64,39
2,5Fe-Clp	17,46	30,45
5Fe-Clp	34,92	56,68

Fonte: Elaboração própria.

Para complementar essa afirmação, foi utilizada a técnica de Difração de Raios-X (DRX), principalmente para fornecer uma análise preliminar da estrutura adquirida pelos catalisadores em comparação a Clinoptilolita e da ocorrência da troca iônica.

De acordo com Moradi, Karimzadeh e Moosavi (2018), os picos de difração característicos da Clinoptilolita ocorrem em $2\theta = 9,8^\circ, 12,2^\circ, 13,3^\circ, 17,3^\circ, 19,1^\circ, 22,7^\circ, 26,1^\circ, 28,2^\circ, 28,5^\circ, 30,2^\circ, 31,9^\circ, 32,8^\circ$ (JCPDS File Card N. 25-1349), e, conforme ilustrada na Figura 1, pode-se observar que para a zeólita natural (Clp) houve a presença de picos nos seguintes ângulos: $9,3^\circ, 11,3^\circ, 13,5^\circ, 19,6^\circ, 22,4^\circ, 26,1^\circ, 28,2^\circ, 30,2^\circ, 32,1^\circ$ e $32,8^\circ$. Tais valores são próximos e em muitos casos até iguais aos presentes na literatura.

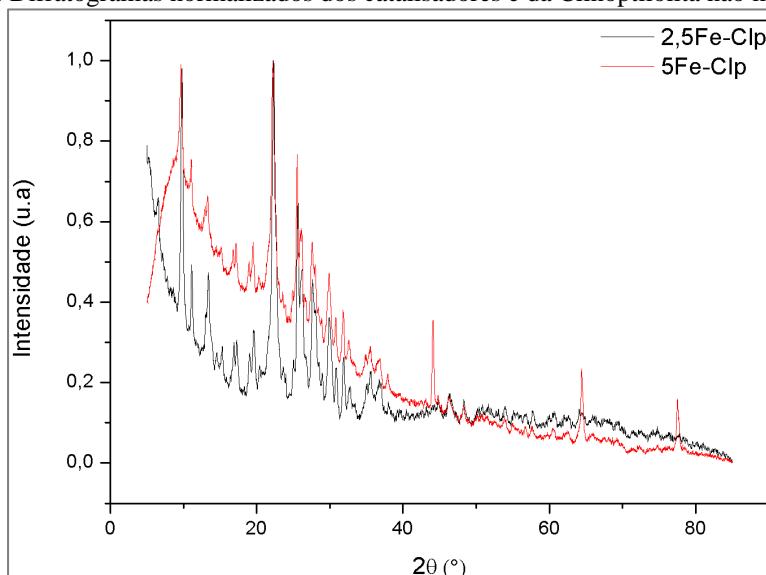
Figura 1. Difratograma da Clinoptilolita não modificada (Clp).



Fonte: Elaboração própria.

Pela comparação com os difratogramas dos catalisadores, Figura 2, é possível perceber a ausência, deslocamento ou variação na intensidade de picos característicos, ou seja, houve mudanças na estrutura cristalina, sendo um indicativo inicial da ocorrência de troca iônica.

Figura 2. Difratogramas normalizados dos catalisadores e da Clinoptilolita não modificada.

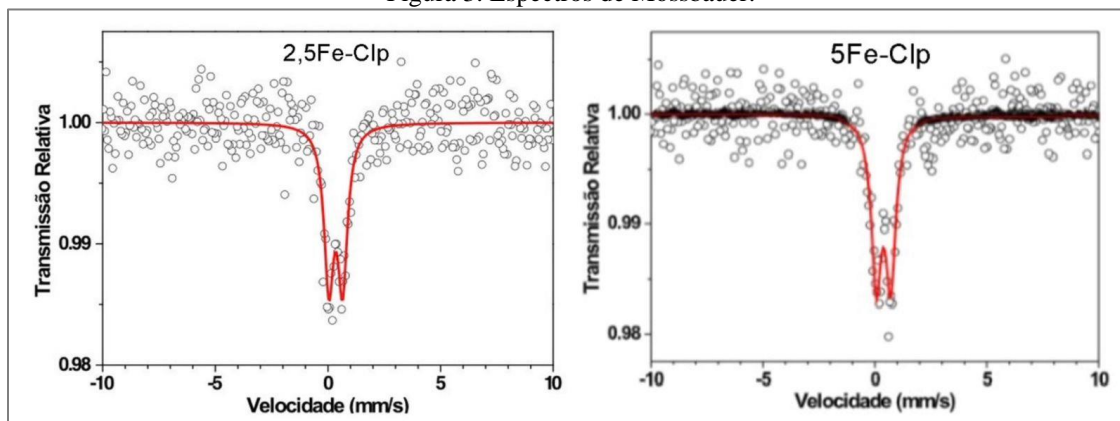


Fonte: Elaboração própria.

Então, com a confirmação de que o ferro foi impregnado, ou seja, a rota de síntese utilizada foi eficiente, é necessária avaliar em qual forma iônica ele foi capaz de se estabilizar. Para isso, foi executada a técnica da Espectroscopia de Mössbauer. Conforme relatado por Blanco e Andrés (2016), valores de deslocamento isomérico (IS) inferiores a 0,8mm/s indicam a estabilização de Fe^{3+} , e com essa caracterização foram obtidos para 2,5Fe-Clp e 5Fe-Clp respectivamente os valores de 0,41 e 0,39mm/s. Isso pode ser

observado de forma preliminar pela presença de um pico simples, e não de um dubleto, conforme descrito pela Figura 3.

Figura 3. Espectros de Mössbauer.

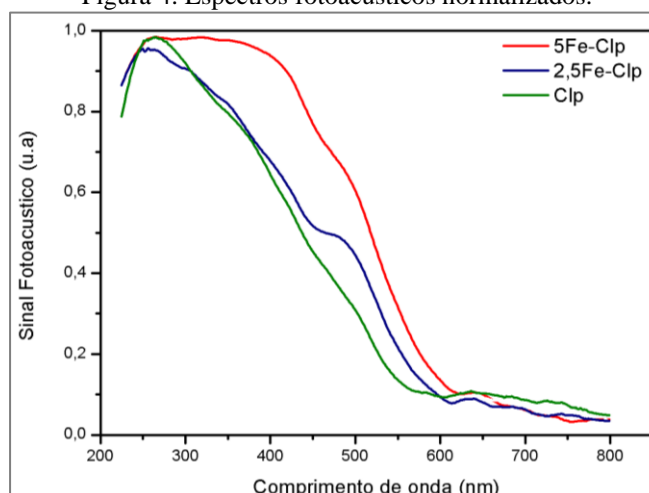


Fonte: Elaboração própria.

5 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE BAND GAP

A Espectroscopia Fotoacústica (PAS) foi realizada para determinar a energia de *Band Gap* dos catalisadores com finalidade de auxiliar na escolha da lâmpada para o processo fotocatalítico. O espectro dos catalisadores e da Clinoptilolita natural estão dispostos na Figura 4, e, a partir deles, é possível obter o valor do *Band Gap* pelo método linear relatado por Frederichi (2019), cujos valores estão dispostos na Tabela 4. Com isso, pode-se perceber que os catalisadores possuem uma faixa de transição óptica entre 400 e 700nm, englobando o espectro visível e também que um maior teor mássico de ferro implica um menor valor para o *Band Gap*. A partir disso, a escolha da lâmpada se limitou àquelas que mais se encaixem nessa faixa, distanciando-se das escolhas convencionais de lâmpadas do tipo UV, e, por isso e também por fatores como disponibilidade e custo, optou-se pela utilização da lâmpada Xenon 35W.

Figura 4. Espectros fotoacústicos normalizados.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4. Energia de *Band Gap* pelo método linear.

IDENTIFICAÇÃO	ENERGIA DE BAND GAP (eV)
Clp	2,64
2,5Fe-Clp	2,38
5Fe-Clp	2

Fonte: Elaboração própria.

6 AVALIAÇÃO FOTOCATALÍTICA

Os rendimentos percentuais obtidos para cada catalisador estão presentes na Tabela 5, sendo as condições de cada teste reacional descritas na Tabela 2. Com isso, é possível afirmar que ambos apresentaram um melhor desempenho em condições nas quais o pH da solução contendo o corante estava mais ácido e para tempos de reação maiores, enquanto que em relação a concentração de catalisador para aquele impregnado com 5% de ferro (5Fe-Clp) baixas concentrações apresentaram bons desempenhos e para o com 2,5% (2,5Fe-Clp), altas concentrações. Isso significa que para um maior teor mássico de ferro presente no catalisador uma menor quantidade dele é necessária para garantir um bom desempenho na degradação.

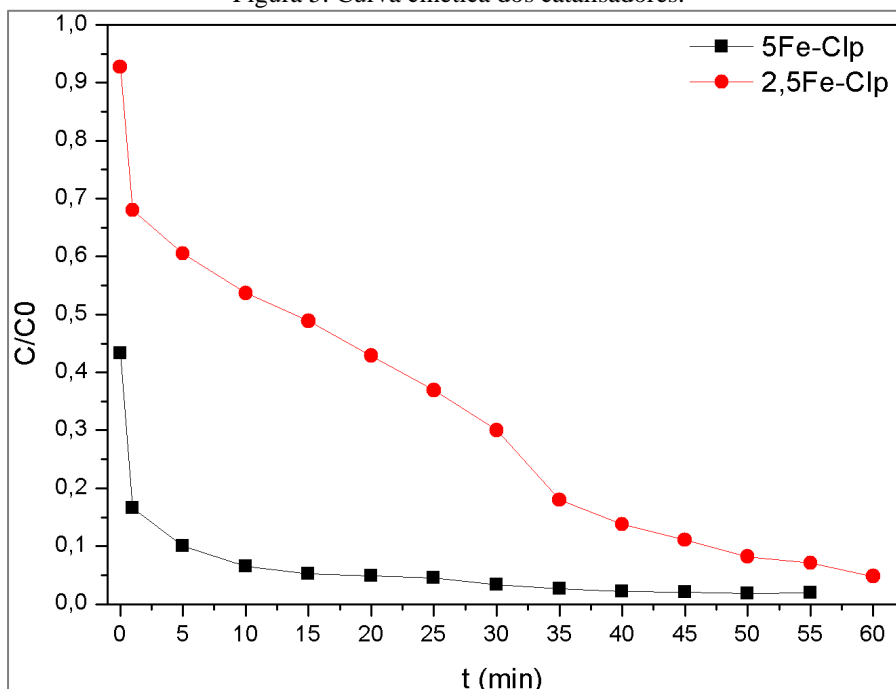
Tabela 5. Rendimentos percentuais obtidos.

TESTE REACIONAL	R _{2,5Fe-Clp} (%)	R _{5Fe-Clp} (%)
1	93,65	96,88
2	40,48	33,81
3	98,68	85,51
4	43,65	76,70
5	96,56	92,33
6	41,80	57,39
7	97,09	96,31
8	31,22	52,84
9	51,59	92,05
10	53,17	92,61
11	43,65	95,45
12	56,08	92,33
13	42,06	92,33
14	46,56	95,17
15	47,09	94,89

Fonte: Elaboração própria.

A partir do planejamento experimental Box-Behnken, foi realizado um mapeamento para o rendimento da reação foto-Fenton, constatando que para 2,5Fe-Clp as condições de maior rendimento foram as do teste 3, enquanto que para 5Fe-Clp foram as do teste 1. Dessa forma, foram construídas as curvas cinéticas presentes na Figura 5 que ilustram a evolução desse processo com o tempo em que a lâmpada ficou acesa.

Figura 5. Curva cinética dos catalisadores.



Fonte: Elaboração própria.

É possível observar que ambos os catalisadores apresentaram resultados satisfatórios, sendo as taxas de degradação iguais a 95,21% para 2,5Fe-Clp e 98,06% para 5Fe-Clp em relação a concentração original do corante em solução. É válido destacar também que a diferença entre os pontos iniciais se deve ao período de agitação por duas horas no escuro, ou seja, anterior ao início da reação foto-Fenton, isso indica que o catalisador 5Fe-Clp foi capaz de retirar mais o contaminante da solução quando comparado ao outra, sendo essa retirada devido à adsorção na superfície do catalisador.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comprovou-se que a rota de síntese utilizada foi uma alternativa econômica, simples e eficiente para a impregnação de Fe^{3+} em Clinoptilolita e que o processo foto-Fenton pode ser efetuado com lâmpadas fora da faixa UV, aproximando-o de possíveis aplicações em luz natural. Além disso, com o estudo fatorial realizado pelo planejamento Box-Behnken, foi possível mapear as melhores condições de pH, concentração de catalisador e tempo de reação necessárias para garantir elevadas taxas de degradação, otimizando o processo, conforme ilustrado pelas curvas cinéticas construídas. Dessa forma, os dois catalisadores representam uma alternativa promissora para a degradação do corante *Reactive Blue*, sendo uma contribuição para o combate da poluição de corpos hídricos por efluentes têxteis.

Como sugestão para futuros trabalhos, é válido analisar a aplicabilidade de catalisadores a base de Clinoptilolita em processos movidos a luz solar, devido à baixa energia de Band Gap obtida pela



impregnação de metais. Além disso, é interessante também investigar a combinação do ferro com outros compostos que apresentem propriedades catalíticas, como ZnO e TiO₂.

Por fim, os AGRADECIMENTOS do presente trabalho são destinados à Fundação Araucária (FA/UEM) pelo apoio financeiro e ao DEQ-UEM pelo apoio técnico e científico.



REFERÊNCIAS

ADAM, M. R.; OTHMAN, M. H. D.; HUBADILLAH, S. K.; AZIZ M. H. A. et. al. Application of natural zeolite clinoptilolite for the removal of ammonia in wastewater. *Materials Today: Proceedings*, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322075794>. Acesso em: 24 fev. 2024.

ANCHIETA, Chayene G. et al. Statistical optimization of Reactive Red 141 removal by heterogeneous photo-Fenton reaction using ZnFe₂O₄ oxide prepared by microwave irradiation. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 33, p. 15603-15611, 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19443994.2015.1070761>. Acesso em: 24 fev. 2024.

ARAÚJO, Renata Nogueira de. Degradação do corante azul reativo 19 usando UV; H₂O₂; UV/H₂O₂; Fenton e foto-Fenton: aplicação em efluentes têxteis. 2002. 135p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1591888>. Acesso em: 24 fev. 2024.

BLANCO, O.; ANDRÉS, A. Preparación de pseudo-brookita por vía sol-gel para la degradación de fenol empleando foto-fenton heterogéneo: Efecto de la relación Fe: Ti, pH del medio y temperatura de calcinación. Tese de Doutorado, 2016. Disponível em: <http://saber.ucv.ve/handle/10872/15081>. Acesso em: 2 mar. 2024.

DAGHRIR, R.; DROGUI, P.; ROBERT, D.. Modified TiO₂ For Environmental Photocatalytic Applications: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(10), 3581–3599, 2013. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie303468t?openMendeleyModalAfterReload=true&selectedShareOption=&selectedShareOption=#>. Acesso em: 24 fev. 2024.

FREDERICHI, Diógenes. Avaliação de um sistema fotocatalítico na descoloração de corantes têxteis utilizando telas de poliéster revestidas com TiO₂ e ZnO. 2019. 109 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, 2019, Maringá, PR. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/6174>. Acesso em: 2 mar. 2024.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B.. Corantes têxteis. *Química Nova*, v. 23, n. 1, p. 71–78, jan. 2000. Disponível em: [http://submission.quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/2000/vol23n1/v23_n1_%20\(12\).pdf](http://submission.quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/2000/vol23n1/v23_n1_%20(12).pdf). Acesso em: 24 fev. 2024.

JEWUR, S. S.. Química de Zeólitas e Catálise. *Química Nova*, v. 8, p. 99-104, 1985. Disponível em: [http://submission.quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/1985/vol8n2/v08_n2_%20\(5\).pdf](http://submission.quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/1985/vol8n2/v08_n2_%20(5).pdf). Acesso em: 24 fev. 2024.

MACEDO, K. R.; LIMA, C. K. M. de; SILVA FILHO, L. F. da. Métodos de tratamento de efluentes gerados pela indústria têxtil. *Tratamento de Água*, 2020. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/tratamento-efluentes-industria-textil/>. Acesso em: 24 fev. 2024.

MORADI, M.; KARIMZADEH, R.; MOOSAVI, E. S.. Modified and ion exchanged clinoptilolite for the adsorptive removal of sulfur compounds in a model fuel: New adsorbents for desulfurization. *Fuel*, v. 217, p. 467–477, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236117316770>. Acesso em: 2 mar. 2024.



PROVETTO ANALÍTICA. Manual de Método para Uso do Digestor Ácido Assistido por Micro-ondas. Ano 2003.

ROMOALDO, B. P.; SILVEIRA, F. O de.; ALBERNAZ, R. T.; AZEVEDO, O. A. de.. Corantes têxteis: o descarte inadequado e os impactos ambientais. Cachoeiro de Itapemirim: São Camilo, 2019. Disponível em: <https://vest.saocamilo-es.br/midias/documentos/ebooks/livros/brunela-fagner-e-robertainapdf>. Acesso em: 24 fev. 2024.

SANTANA, R. M. da. R.; NASCIMENTO, G. E. do; NAPOLEÃO, D. C.; DUARTE, M. M. M. B. Degradation and kinetic study of Reactive blue BF-5G and Remazol red RB 133% dyes using Fenton and photo-Fenton process. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 104–118, 2017. DOI: 10.5902/2236117027358. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/27358>. Acesso em: 24 fev. 2024.

SILVA, L. T. V; MARTINS, I. A.; SENA, L. M. G.; NETO, E. F. A.; NETO, B. C. V. et. al. Estudo da Remoção do Corante Remazol Reactive Blue 19 por Eletrocoagulação utilizando Eletrodos de Alumínio Nitretados. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/54189/1/2018_eve_ltvsilva.pdf. Acesso em: 24 fev. 2024.

SOUSA, C. D. C. de. Síntese e modificação de zeólita ferrierita visando a redução catalítica de NOx com propano. 2007. Disponível em: <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/2007-1/233-sintese-e-modificacao-com-ferro-de-zeolita-ferrierita-visando-a-reducao-catalitica-de-nox-com-propano/file>. Acesso em: 24 fev. 2024.

SOUZA, B. G. de.; FIGUEIRA, G.; CARVALHO, M. H.; ALCARAZ-GONZALES, V.; SALDAÑA-FLORES, K. E. et al.. A novel synthesis route to obtain magnetic nanocrystalline cobalt ferrite with photo-Fenton activity. *Materials Chemistry and Physics*, v. 257, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058420311007#:~:text=A%20novel%20unconventional%20coprecipitation%20procedure>. Acesso em: 2 mar. 2024.

TORRES, L. M.; CARVALHO, W. A.. Estudo comparativo de degradação do corante reactive blue 222 aplicando os sistemas: UV/H₂O₂, FENTON, FOTO FENTON E OZÔNIO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Natal. Anais, 2019. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anais eletronicos/45_Download/Trabalhos Completos PDF/II-288.pdf. Acesso em: 24 fev. 2024.