

AVALIAÇÃO DE ADSORVENTE À BASE DE FIBRA DE CARBONO ATIVADA FUNCIONALIZADO COM NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE FERRO NA REMOÇÃO DE ÁCIDO ACETILSALICÍLICO DE ÁGUAS CONTAMINADAS

Talles Neves de Toffolli¹, Gabriela Maria Matos Demit², Eduarda Freitas Diogo Januário³, Caio Luiz Rodrigues de Souza⁴, Jossano Saldanha Marcuzzo⁵, Rosângela Bergamasco⁶

¹Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá - UEM, Maringá/PR. Bolsista CAPES-UEM. tallesndt@gmail.com

²Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Mestre, Universidade Estadual de Maringá - UEM, Maringá/PR. Bolsista CNPq-UEM. gabrielademit@gmail.com

³Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Mestre, Universidade Estadual de Maringá - UEM, Maringá/PR. Bolsista CNPq-UEM. eduardafjanuario@gmail.com

⁴Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá - UEM, Maringá/PR. caioluiz0606@hotmail.com

⁵Doutor, Departamento de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, JMHP Consultoria em Materiais e Informática LDTA, Jacareí/SP. jossano@gmail.com

⁶Orientadora, Doutora, Docente do Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química - DEQ, Universidade Estadual de Maringá - UEM, Maringá/PR. Pesquisadora da Universidade Estadual de Maringá - UEM. rbergamasco@uem.br

RESUMO

Os fármacos, integrantes dos contaminantes emergentes, são compostos estáveis e que não são eficientemente removidos dos recursos hídricos pelos sistemas convencionais de tratamento, sendo necessária a aplicação de processos avançados. O ácido acetilsalicílico (AAS), por exemplo, um fármaco do grupo dos anti-inflamatórios não-esteroides (AINEs), têm sido avaliado por diferentes processos de remoção e/ou de degradação, dentre eles a adsorção. A adsorção apresenta características promissoras sob os aspectos econômicos e de eficiência de remoção desses poluentes, sendo aplicada, por exemplo, na remoção do ácido acetilsalicílico do meio aquoso. Assim, esse estudo teve como objetivo o desenvolvimento e aplicação de um adsorvente de fibra de carbono ativada funcionalizada com nanopartículas de óxido de ferro (FCA-Fe₃O₄) na remoção de ácido acetilsalicílico de águas contaminadas. A morfologia do material foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e foram realizados ensaios para avaliar as condições ótimas de operação no processo de remoção do contaminante, variando a massa do material adsorvente e o pH da solução. A caracterização demonstrou êxito na aderência das nanopartículas a superfície da fibra de carbono ativada, além disso os experimentos indicaram, em condições ótimas, remoção de 84,8% do ácido acetilsalicílico (5 mg L⁻¹).

PALAVRAS-CHAVE: Adsorção; Fármaco; Nanopartículas magnéticas; Micropoluentes; Tratamento de água.

1 INTRODUÇÃO

Os fármacos são compostos com atividade biológica, desenvolvidos para promover a saúde e o bem-estar humano. Esses compostos entram no ambiente de diversas formas, inclusive após a metabolização e excreção pelo organismo humano, visto que, geralmente, somente uma fração deles é utilizada (KÜMMERER, 2001; BOLONG *et al.*, 2009; TAYLOR; SENAC, 2014; MARQUES *et al.*, 2017). Além disso, apresentam baixa biodegradabilidade, causando persistência e bioacumulação, podendo gerar efeitos adversos ao meio ambiente e aos seres vivos (HOMEM; ALVES; SANTOS, 2013; SECONDES *et al.*, 2014; CIMIRRO *et al.*, 2020).

O ácido acetilsalicílico (AAS), um fármaco do grupo dos anti-inflamatórios não-esteroides, utilizado como anti-inflamatório, antipirético, analgésico e/ou anticoagulante, que além de possuir essas características, pode se degradar, por hidrólise, em ácido salicílico (AS) que também é persistente no ambiente (GARZA-CAMPOS *et al.*, 2016; MEISCHL *et al.*, 2016; HOPPEN *et al.*, 2019).

Isso posto, o tratamento de água torna-se uma condição mínima necessária para garantir o acesso à água que atenda padrões de qualidade, visto que essa é essencial a

manutenção da vida dos seres vivos, principalmente dos seres humanos; pois, tal recurso é utilizado para atender suas necessidades básicas, assim como para o desenvolvimento de suas atividades econômicas, culturais e de lazer.

Diferentes formas de tratamento têm sido aplicadas para a remoção de fármacos da água, podendo citar a adsorção (ADEWUYI, 2020; JIN *et al.*, 2020), processos de oxidação avançada (VARMA *et al.*, 2020; OLVERA-VARGAS *et al.*, 2021; VELEMPINI; PRABAKARAN; PILLAY, 2021), biorremediação (SHAH; SHAH, 2020; AKERMAN-SANCHEZ; ROJAS-JIMENEZ, 2021), e até mesmo a combinação dessas e outras técnicas (DINDAŞ *et al.*, 2020; FANOURLAKIS *et al.*, 2020). Embora diferentes abordagens tenham suas vantagens inerentes, o processo de adsorção se destaca devido ao seu baixo custo e facilidade de operação (QUESADA *et al.*, 2019; SHEN *et al.*, 2019).

Nos processos adsorptivos, diversos materiais têm sido aplicados para a descontaminação de fármacos da água. Balasubramani, Sivarajasekar e Naushad (2020) aplicaram o óxido de grafeno para a descontaminação de metformina. Hounfodji *et al.* (2020) por meio da caulinita, avaliaram a remoção de diferentes fármacos anti-inflamatórios e antiepiléticos de águas contaminadas. Liu, Xu e Li (2020) utilizaram como material adsorvente um *biochar* proveniente da pirolise de lodo farmacêutico para a descontaminação de tetraciclina. Zhuang e Wang (2021) obtiveram alta afinidade de adsorção do diclofenaco por meio de redes organometálicas. Destaca-se também as fibras de carbono ativadas (FCA), que demonstram eficiência na remoção de diferentes fármacos (MARQUES *et al.*, 2017; GE *et al.* 2020; LIANG; KINSEY; AN, 2020).

As fibras de carbono ativadas podem ser originadas a partir de diversos materiais precursores, podendo ser funcionalizadas com diferentes tipos de nanopartículas, tal como óxidos de alumínio, cobalto, ferro, níquel e titânio. A modificação do material tem como objetivo melhorar a capacidade adsorptiva do material, aumentando a interação adsorvente/adsorvato, visto que a modificação pode alterar as propriedades físico químicas do adsorvente, proporcionando o aumento da área superficial e uma maior disponibilidade de sítios ativos (PRASAD *et al.*, 2017; YUE; VAKILI; WANG, 2017; ZUO *et al.*, 2019). Alguns estudos utilizaram materiais a base de fibras carbono ativadas com óxido de ferro, onde obtiveram resultados significativos no tratamento de águas contaminadas com o ácido acetilsalicílico (AAS) (MOACĂ *et al.*, 2019; JUNG *et al.*, 2019).

Assim, teve-se como objetivo o desenvolvimento e aplicação de um adsorvente de fibra de carbono ativada funcionalizada com nanopartículas de óxido de ferro na remoção de ácido acetilsalicílico de águas contaminadas. Para tanto, teve-se como objetivos específicos:

- Caracterizar a morfologia do material adsorvente por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura e, determinar a magnitude da atração/repulsão eletrostática entre partículas por meio do potencial zeta;
- Avaliar a capacidade de adsorção do contaminante em diferentes concentrações de adsorvente, bem como em diferentes condições de pH da solução de ácido acetilsalicílico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental (LGCPA), bem como com o apoio do Complexo de Centrais de Apoio a Pesquisa (COMCAP), ambos da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

2.1 SÍNTESE DO MATERIAL ADSORVENTE

A fibra de carbono ativada via úmida foi sintetizada segundo a metodologia descrita por Marcuzzo *et al.* (2013). A fibra produzida utiliza como matéria-prima o produto da oxidação térmica da fibra têxtil de poliacrilonitrila (5 dtex em cabo de 200 mil filamentos), e que passam pelos processos de carbonização (900 °C) em atmosfera de argônio (Ar), e ativação (1000 °C) em atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) com injeção de vapor de água.

A funcionalização foi realizada por meio do método de coprecipitação em solução aquosa, com base em metodologia descrita por Rashad *et al.* (2012) e Khalil (2015). A fibra de carbono ativada (FCA), 5 g, o sulfato de ferro (FeSO₄), 2,8 g, e o nitrato de ferro hidratado (Fe(NO₃)₃·9H₂O), 1,1 g, foram mantidos sob agitação em um béquer durante uma hora. O grau de basicidade da solução foi ajustado com solução de hidróxido de sódio (1 mol L⁻¹) até alcançar pH 13. Em seguida, o material foi lavado até atingir pH neutro e, por fim, seco em estufa a 60 °C por 24 horas.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ADSORVENTE

2.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) fornece informações sobre a superfície de uma amostra (CHAPMAN, 1996). Assim, a fim de verificar a morfologia do material adsorvente (homogeneidade e a formação de poros) utilizou-se o equipamento Quanta™ 250 FEG SEM, da FEI.

2.2.2 Potencial Zeta

O potencial zeta é uma propriedade física capaz de determinar a carga superficial do adsorvente, por meio da análise das partículas da amostra em suspensão (SILVA, 2015; VOGEL, 2017). Para avaliar as cargas superficiais do adsorvente, as suspensões contendo o adsorvente tiveram seus pHs corrigidos em 2, 4, 6, 8, 10 e 12, com soluções de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH), ambas em concentrações de 0,1 e 1 mol L⁻¹, e, analisadas em um equipamento Delsa™ Nano Submicron Particle Size and Zeta Potential, da Beckman Coulter.

2.3 ESTUDOS DE ADSORÇÃO

Os ensaios de adsorção foram realizados em batelada, utilizando frascos de polietileno, em banho metabólico tipo Dubnoff com agitação recíprocante de 150 rpm a 25 °C, com duração de 24 horas. Para os experimentos foram utilizados 20 mL de solução de ácido acetilsalicílico, preparada com água destilada, com concentração de 5 mg L⁻¹.

Ao final do experimento, a separação do material adsorvente magnético foi realizada com o auxílio de um ímã de neodímio. A solução de contaminante foi filtrada em membranas de acetato de celulose (Unifil), com poros de 0,45 µm e diâmetro de 47 mm.

As concentrações do fármaco foram quantificadas por intermédio de espectrofotômetro UV/VIS, modelo DR 5000, da Hach, em comprimento de onda 224 nm. Com esses dados, foi possível verificar a capacidade de adsorção do material adsorvente, além da porcentagem de remoção do contaminante, por meio das equações (1) e (2), respectivamente.

$$q_e = (C_0 - C_{eq}) * (V/m) \quad (1)$$

$$R = [(C_0 - C_{eq}) / C_{eq}] * 100 \quad (2)$$

Das equações (1) e (2), tem-se que q_e é a capacidade de adsorção (mg g^{-1}), C_0 é a concentração inicial do adsorvato (mg L^{-1}), C_{eq} é a concentração do adsorvato no equilíbrio (mg L^{-1}), V é o volume da solução (L), m é a massa do adsorvente (g) e, R corresponde a porcentagem de remoção do adsorvato (%).

As condições ótimas de operação para o processo de adsorção do ácido acetilsalicílico (AAS) frente a fibra de carbono ativada funcionalizada com nanopartículas de óxido de ferro (FCA- Fe_3O_4) foram avaliadas a partir da influência da concentração de adsorvente, bem como da influência do pH da solução. Os ensaios referentes a influência da concentração de adsorvente utilizaram 10, 20 e 30 mg de adsorvente para a remoção do contaminante. Para os ensaios da influência do pH da solução, esses foram ajustados para os valores de 4, 7 e 10 por meio de soluções de HCl e NaOH, as duas em concentrações de 0,1 e mol L^{-1} .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ADSORVENTE

3.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

Nota-se (Figura 1), por meio da imagem obtida pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), uma superfície levemente estriada e sem deformidades. Além disso, há a presença de aglomerados, caracterizando a aderência do óxido de ferro aos filamentos da fibra de carbono ativada fornecido pelo processo de funcionalização, tornando a superfície do material mais áspera.

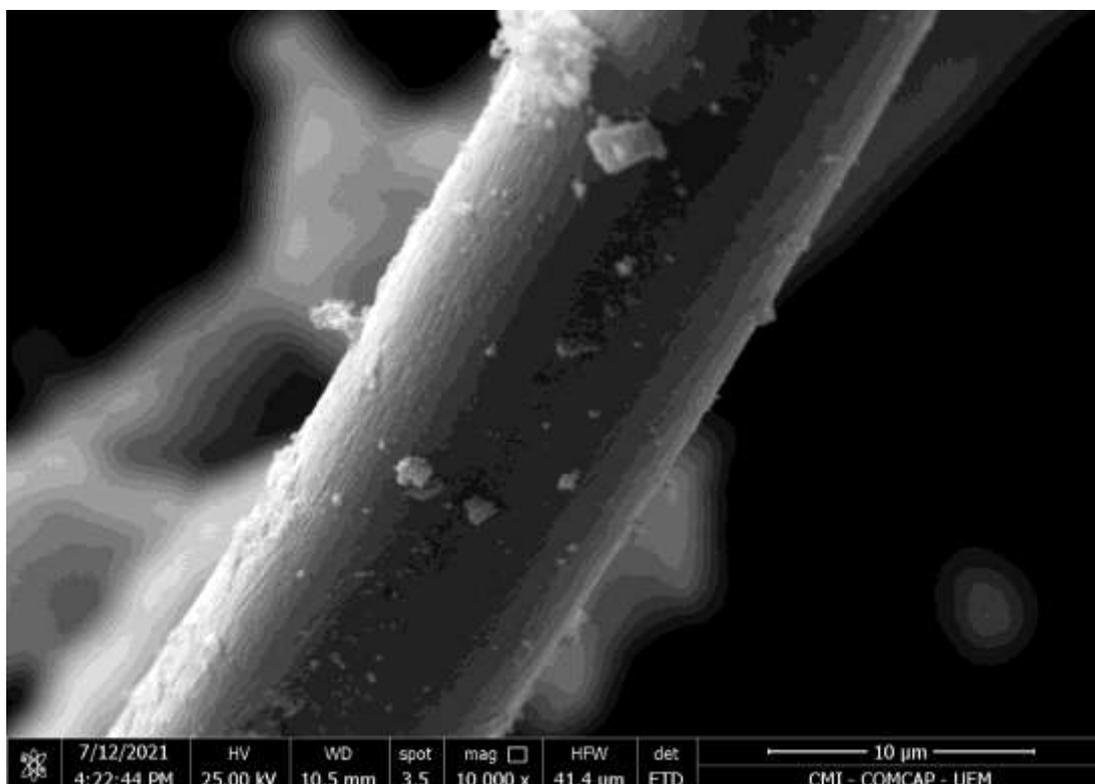


Figura 1: Microscopia eletrônica de varredura do adsorvente à base fibra de carbono ativada via úmida funcionalizado com nanopartículas de óxido de ferro com 10.000 vezes de ampliação

Fonte: Dados da pesquisa

3.1.2 Potencial Zeta

A partir da análise das cargas superficiais, verificou-se um comportamento de estabilidade moderado, com valores variando de -35 a +20 mV, e ponto de carga zero (PCZ), aproximadamente, em pH 5. Dessa forma, a superfície do material tende a ocorrer com cargas negativas em pHs inferiores ao PCZ e, positivas em superiores.

3.2 ESTUDOS DE ADSORÇÃO

3.2.1 Influência da Concentração de Adsorvente

A relação entre a concentração de adsorvente na solução de ácido acetilsalicílico, a capacidade de adsorção e a porcentagem de remoção do fármaco da solução é demonstrada pelo Gráfico 1. Por meio da análise do gráfico, nota-se que quanto maior a concentração de adsorvente, maior a remoção do contaminante, visto que há o aumento de sítios ativos disponíveis.

A concentração de 1 g de adsorvente por litro de solução (Gráfico 1), referente à 20 mg de FCA-Fe₃O₄ em 20 mL de solução de AAS, demonstra a melhor relação entre a capacidade de adsorção e a porcentagem de remoção em relação a massa de adsorvente, na qual obteve-se 3,56 mg g⁻¹ e 51,4%, respectivamente.

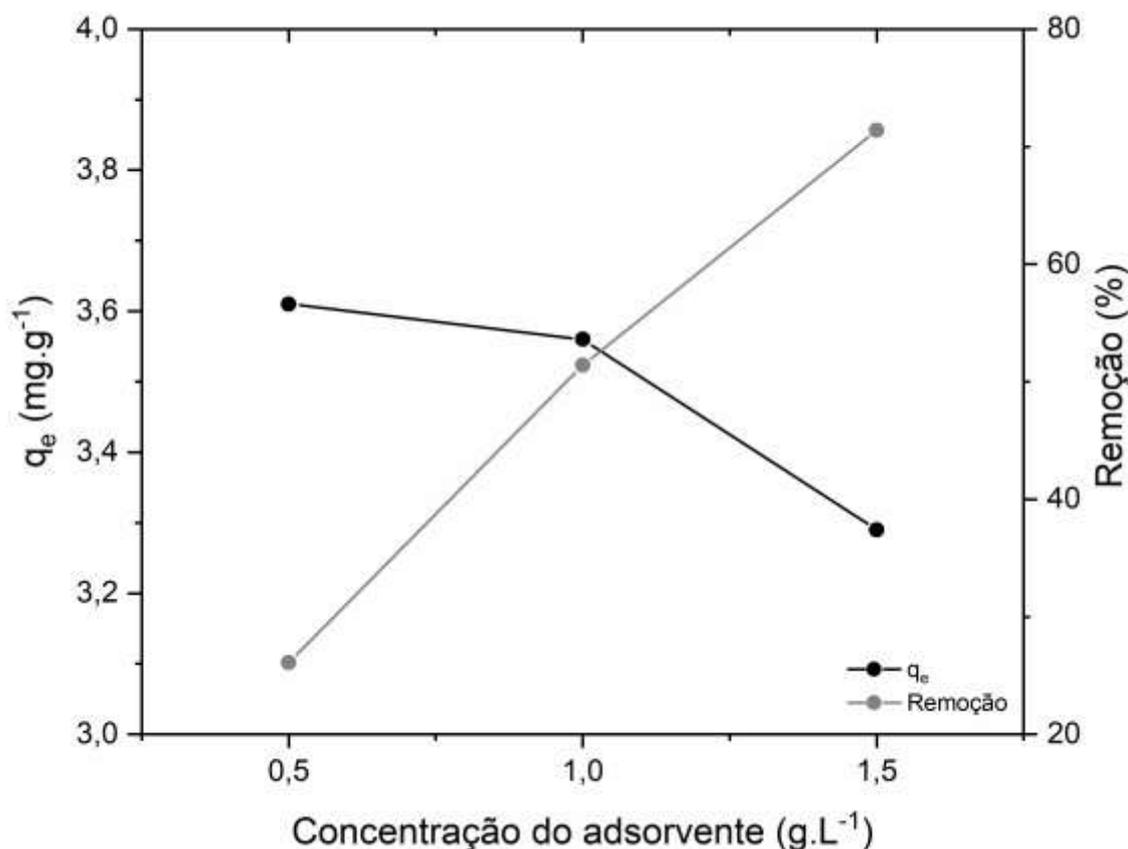


Gráfico 1: Influência da concentração de adsorvente na adsorção do ácido acetilsalicílico (AAS)

Fonte: Dados da pesquisa

Ainda que tenha sido obtida uma alta porcentagem de remoção (71,4%) para a massa de 30 mg, ou seja, concentração de adsorvente de 1,5 g L⁻¹, sem grande perda de capacidade de adsorção (redução de 12%), há um aumento de 50% na massa de adsorvente para tal aumento da remoção. Dessa forma, a massa de 20 mg de adsorvente foi estabelecida como uma das condições ótimas de operação.

3.2.2 Influência do pH da Solução

O Gráfico 2 apresenta relação entre o pH da solução do ácido acetilsalicílico, a capacidade de adsorção e a porcentagem de remoção do fármaco da solução. Verifica-se que o aumento do pH ocasionou a redução da remoção do contaminante, uma vez que em soluções cujo pH > pKa, as moléculas de compostos com caráter ácido, como ácido acetilsalicílico (pKa = 3,5), prevalecem na forma aniônica. Logo, a capacidade adsortiva e a porcentagem de remoção do contaminante são beneficiadas em valores de pH mais baixos.

Observa-se (Gráfico 2) que com a redução do pH, tanto a capacidade de adsorção, quanto a porcentagem de remoção do contaminante tem um aumento, chegando a atingir, em pH 4, valores de 5,36 mg g⁻¹ e 84,8%. Contudo, é necessário verificar a viabilidade da acidificação da água para obter tais resultados, visto que o fármaco apresentou resultados satisfatórios de remoção em pH natural (5,62) e neutro (7), ou seja, condizente com os valores, normalmente observados, de pH da água bruta e da água pós-tratamento convencional (6 ≤ pH ≤ 9) (CHAPMAN, 1996; FRITZSONS *et al.*, 2009; BRASIL, 2021).

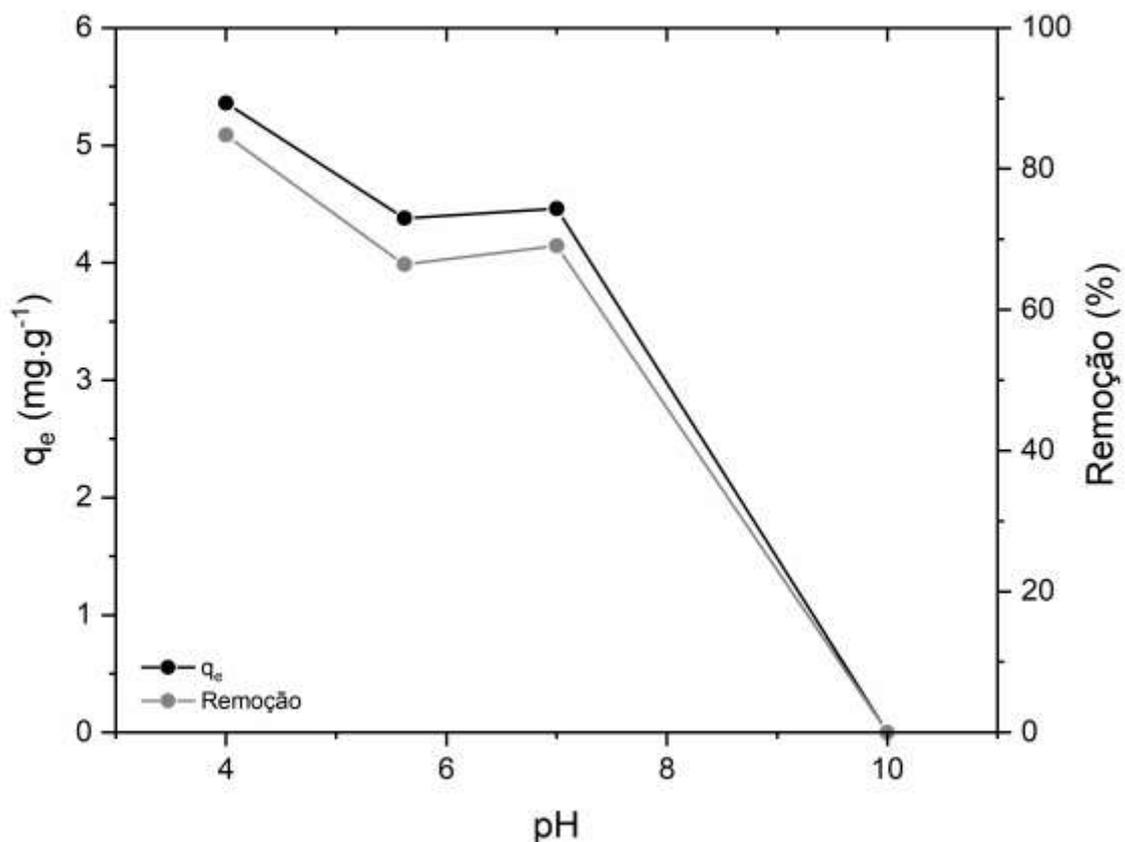


Gráfico 2: Influência do pH da solução na adsorção do ácido acetilsalicílico (AAS)
Fonte: Dados da pesquisa

4 CONCLUSÃO

Mediante a caracterização do material adsorvente, observou-se por meio das imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura, que as nanopartículas de óxido de ferro se aderiram com êxito a superfície da fibra de carbono ativada, formando o material adsorvente (FCA-Fe₃O₄). Além disso, por meio do potencial zeta, verificou-se que o material possui cargas negativas em pHs inferiores a 5, favorecendo a interação com partículas de cargas positivas.

A avaliação do adsorvente evidenciou que o material apresenta condições ótimas de operação com massa de 20 mg em pH 4, removendo 84,8% do contaminante. Assim, salienta-se que em vista dos resultados obtidos esse estudo pode contribuir com a purificação de águas contaminadas com ácido acetilsalicílico.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- ADEWUYI, A. Chemically modified biosorbents and their role in the removal of emerging pharmaceutical waste in the water system. **Water**, v. 12, n. 6, 1551, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12061551>. Acesso em: 21 jul. 2021.
- AKERMAN-SANCHEZ, G.; ROJAS-JIMENEZ, K. Fungi for the bioremediation of pharmaceutical-derived pollutants: a bioengineering approach to water treatment. **Environmental Advances**, v. 4, 100071, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100071>. Acesso em: 21 jul. 2021.
- BALASUBRAMANI, K.; SIVARAJASEKAR, N; NAUSHAD, M. Effective adsorption of antidiabetic pharmaceutical (metformin) from aqueous medium using graphene oxide nanoparticles: Equilibrium and statistical modelling. **Journal of Molecular Liquids**, v. 301, 112426, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112426>. Acesso em: 21 jul. 2021.
- BOLONG, N.; ISMAIL, A. F.; SALIM, M. R.; MATSUURA, T. A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. **Desalination**, v. 239, n. 1-3, p. 229-246. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- BRASIL. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 20 jul. 2021.
- CHAPMAN, D. V. **Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring**. 2nd ed. UNESCO/WHO/UNEP, 1996. 651 p.

CIMIRRO, N. F. G. M.; LIMA, E. C.; CUNHA, M. R.; DIAS, S. L. P.; THUE, P. S.; MAZZOCATO, A. C.; DOTTO, G. L.; GELESKY, M. A.; PAVAN, F. A. Removal of pharmaceutical compounds from aqueous solution by novel activated carbon synthesized from lovegrass (Poaceae). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 21442-21454, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08617-3>. Acesso em: 20 jul. 2021.

DINDAŞ, G. B.; ÇALIŞKAN, Y.; ÇELEBI, E. E.; TEKBAŞ, M.; BEKTAŞ, N.; CENGİZ YATMAZ, H. Treatment of pharmaceutical wastewater by combination of electrocoagulation, electro-fenton and photocatalytic oxidation processes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 3, 103777, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103777>. Acesso em: 21 jul. 2021.

FANOURAKIS, S. K.; PEÑA-BAHAMONDE, J.; BANDARA, P.; RODRIGUES, D. F. Nano-based adsorbent and photocatalyst use for pharmaceutical contaminant removal during indirect potable water reuse. **npj Clean Water**, v. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0048-8>. Acesso em: 21 jul. 2021.

FRITZSONS, E.; MATOVANI, L. E.; NETO, A. C.; HINDI, E. C. A influência das atividades mineradoras na alteração do pH e da alcalinidade em águas fluviais: o exemplo do rio Capivari, região do carste paranaense. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 381-390, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000300012>. Acesso em: 20 jul. 2021.

GARZA-CAMPOS, B.; BRILLAS, E.; HERNÁNDEZ-RAMÍREZ, A.; EL-GHENYMY, A.; GUZMÁN-MAR, J. L.; RUIZ-RUIZ, E. J. Salicylic acid degradation by advanced oxidation processes. Coupling of solar photoelectro-Fenton and solar heterogeneous photocatalysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 319, p. 34-42, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.050>. Acesso em: 20 jul. 2021.

GE, Y.; CHENG, B.; WANG, X.; ZHAO, T. Rapid preparation of activated carbon fiber felt under microwaves: pore structures, adsorption of tetracycline in water, and mechanism. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 59, p. 146-153, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b04259>. Acesso em: 27 jul. 2021.

HOMEM, V.; ALVES, A.; SANTOS, L. Microwave-assisted Fenton's oxidation of amoxicillin. **Chemical Engineering Journal**, v. 220, p. 35-44, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.01.047>. Acesso em: 20 jul. 2021.

HOPPEN, M. I.; CARVALHO, K. Q.; FERREIRA, R. C.; PASSIG, F. H.; PEREIRA, I. C.; RIZZO-DOMINGUES, R. C. P.; LENZI, M. K.; BOTTINI, R. C. R. Adsorption and desorption of acetylsalicylic acid onto activated carbon of babassu coconut mesocarp. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 1, 102862, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102862>. Acesso em: 20 jul. 2021.

HOUNFODJI, J. W.; KANHOUNNON, W. G.; KPOTIN, G.; ATOHOUN, G. S.; LAINÉ, J.; FOUCAUD, Y.; BADAWI, M. Molecular insights on the adsorption of some pharmaceutical residues from wastewater on kaolinite surfaces. **Chemical Engineering Journal**, v. 407, 127176, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127176>. Acesso em: 21 jul. 2021.

JIN, E.; LEE, S.; KANG, E.; KIM, Y.; CHOE, W. Metal-organic frameworks as advanced adsorbents for pharmaceutical and personal care products. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 425, 213526, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213526>. Acesso em: 21 jul. 2021.

JUNG, K.-W.; CHOI, B. H.; SONG, K. G.; CHOI, J.-W. Statistical optimization of preparing marine macroalgae derived activated carbon/iron oxide magnetic composites for sequestering acetylsalicylic acid from aqueous media using response surface methodologies. **Chemosphere**, v. 215, p. 432-443, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.069>. Acesso em: 20 jul. 2021.

KHALIL, M. I. Co-precipitation in aqueous solution synthesis of magnetite nanoparticles using iron(III) salts as precursors. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 8, n. 2, p. 279-284, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2015.02.008>. Acesso em: 19. jul. 2021.

KÜMMERER, K. Drugs in the environment: emission of drugs, diagnostic aids and disinfectants into wastewater by hospitals in relation to other sources – a review. **Chemosphere**, v. 45, n. 6-7, p. 957-969, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00144-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00144-8). Acesso em: 20 jul. 2021.

LIANG, L. J.; KINSEY, Y. Y. H.; AN, T. W. A novel electrochemical enhancement of activated carbon fibres for the purification of contaminated pharmaceutical effluents. *In*: GUO, H.; REN, H.; KIM, N (eds). **IRC-SET 2020**. Springer, Singapore, 2020. p. 689-701. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9472-4_59. Acesso em: 27 jul. 2021.

LIU, H.; XU, G.; LI, G. The characteristics of pharmaceutical sludge-derived biochar and its application for the adsorption of tetracycline. **Science of the Total Environment**, v. 747, 141492, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141492>. Acesso em: 21 jul. 2021.

MARCUZZO, J. S.; OTANI, C.; POLIDORO, H. A.; OTANI, S. Influence of thermal treatment on porosity formation on carbon fiber from textile PAN. **Materials Research**, v. 16, n. 1, p. 137-144, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000165>. Acesso em: 19. jul. 2021.

MARQUES, S. C. R.; MARCUZZO, J. M.; BALDAN, M. R.; MESTRE, A. S.; CARVALHO, A. P. Pharmaceuticals removal by activated carbons: Role of morphology on cyclic thermal regeneration. **Chemical Engineering Journal**, v. 321, p. 233-244, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.101>. Acesso em: 20 jul. 2021.

MEISCHL, F.; SCHEMETH, D.; HARDER, M.; KÖPFLE, N.; TESSADRI, R.; RAINER, M. Synthesis and evaluation of a novel molecularly imprinted polymer for the selective isolation of acetylsalicylic acid from aqueous solutions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 4, p. 4083–4090, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.013>. Acesso em: 20 jul. 2021.

MOACĂ, E.-A.; MIHALI, C.-V.; MACAȘOI, I.-G.; RACOVICIANU (BĂBUȚĂ), R.; ȘOICA, C.; DEHELEAN, C.-A.; PĂCURARIU, C.; FLORESCU, S. Fe₃O₄@C matrix with tailorable adsorption capacities for paracetamol and acetylsalicylic acid: synthesis, characterization,

and kinetic modeling. **Molecules**, v. 24, n. 9, 1727, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules24091727>. Acesso em: 20 jul. 2021.

OLVERA-VARGAS, H.; GORE-DATAR, N.; GARCIA-RODRIGUEZ, O.; MUTNURI, S.; LEFEBVRE, O. Electro-Fenton treatment of real pharmaceutical wastewater paired with a BDD anode: Reaction mechanisms and respective contribution of homogeneous and heterogeneous radical OH. **Chemical Engineering Journal**, v. 404, 126524, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126524>. Acesso em: 21 jul. 2021.

PRASAD, C.; KARLAPUDI, S.; VENKATESWARLU, P.; BAHADUR, I.; KUMAR S. Green arbitrated synthesis of Fe₃O₄ magnetic nanoparticles with nanorod structure from pomegranate leaves and Congo red dye degradation studies for water treatment. **Journal of Molecular Liquids**, v. 240, p. 322-328, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.05.100>. Acesso em: 21 jul. 2021.

QUESADA, H. B.; BAPTISTA, A. T. A.; CUSIOLI, L. F.; SEIBERT, D.; BEZERRA, C. O.; BERGAMASCO, R. Surface water pollution by pharmaceuticals and an alternative of removal by low-cost adsorbents: A review. **Chemosphere**, v. 222, p. 766-780, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.009>. Acesso em: 21 jul. 2021.

RASHAD, M. M.; EL-SAYED, H. M.; RASLY, M.; NASR, M. I. Induction heating studies of magnetite nanospheres synthesized at room temperature for magnetic hyperthermia. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 324, n. 23, p. 4019-4023, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.07.010>. Acesso em: 19 jul. 2021.

SECONDES, M. F. N.; NADDEO, V.; BELGIORNO, V.; BALLESTEROS JUNIOR, F. Removal of emerging contaminants by simultaneous application of membrane ultrafiltration, activated carbon adsorption, and ultrasound irradiation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 264, p. 342-349, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.039>. Acesso em: 20 jul. 2021.

SHAH, A.; SHAH, M. Characterisation and bioremediation of wastewater: A review exploring bioremediation as a sustainable technique for pharmaceutical wastewater. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, 100383, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100383>. Acesso em: 21 jul. 2021.

SHEN, C.; ZHAO, Y.; LI, W.; YANG, Y.; LIU, R.; MORGEN, D. Global profile of heavy metals and semimetals adsorption using drinking water treatment residual. **Chemical Engineering Journal**, v. 372, p. 1019–1027, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.219>. Acesso em: 21 jul. 2021.

SILVA, F. L. **Efeito de campo magnético sobre as características físico-químicas de uma solução de albumina de soro bovino (BSA) e seu desempenho na ultrafiltração**. 2015. 90f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/159047>. Acesso em: 20 jul. 2021.

TAYLOR, D.; SENAC, T. Human pharmaceutical products in the environment - The “problem” in perspective. **Chemosphere**, v. 115, p. 95-99, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.011>. Acesso em: 20 jul. 2021.

VARMA, K. S.; TAYADE, R. J.; SHAH, K. J.; JOSHI, P. A.; SHUKLA, A. D.; GANDHI, V. G. Photocatalytic degradation of pharmaceutical and pesticide compounds (PPCs) using doped TiO₂ nanomaterials: A review. **Water-Energy Nexus**, v. 3, p. 46-61, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.03.008>. Acesso em: 21 jul. 2021.

VELEMPINI, T.; PRABAKARAN, E.; PILLAY, K. Recent developments in the use of metal oxides for photocatalytic degradation of pharmaceutical pollutants in water - a review. **Materials Today Chemistry**, v. 19, 100380, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100380>. Acesso em: 21 jul. 2021.

VOGEL, R.; PAL, A. K.; JAMBHURUNKAR, S.; PATEL, P.; THAKUR, S. S.; REÁTEGUI, E.; PAREKH, H. S.; SAÁ, P.; STASSINOPOULOS, A.; BROOM, M. F. High-resolution single particle zeta potential characterisation of biological nanoparticles using tunable resistive pulse sensing. **Scientific Reports**, v. 7, 17479, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14981-x>. Acesso em: 20 jul. 2021.

YUE, Z.; VAKILI, A.; WANG, J. Activated carbon fibers from meltblown isotropic pitch fiber webs for vapor phase adsorption of volatile organic compounds. **Chemical Engineering Journal**, v. 330, p. 183-190, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.150>. Acesso em: 21 jul. 2021.

ZHUANG, S.; WANG, J. Adsorptive removal of pharmaceutical pollutants by defective metal organic framework UiO-66: Insight into the contribution of defects. **Chemosphere**, v. 281, 130997, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130997>. Acesso em: 21 jul. 2021.

ZUO, Q.; ZHAN, Y.; ZHENG, H.; ZHANG, P.; YANG, H.; YU, J.; TANG, J.; ZHEN, Y.; MAI, J. A facile method to modify activated carbon fibers for drinking water purification. **Chemical Engineering Journal**, v. 365, p. 175-182, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.047>. Acesso em: 21 jul. 2021.