

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DEGRADAÇÃO DE FENOL EM ÁGUA VIA PERSULFATO ATIVADO POR SEDIMENTO ARENOSO CONTENDO FERRO E LUZ VISÍVEL

AUTORES:

Joyce Azevedo Bezerra de Souza; Letícia Pontes de Araujo; Edson Luiz Foletto; Osvaldo Chiavone-Filho

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

DEGRADAÇÃO DE FENOL EM ÁGUA VIA PERSULFATO ATIVADO POR SEDIMENTO ARENOSO CONTENDO FERRO E LUZ VISÍVEL

Resumo

A água produzida de petróleo (APP) é um efluente obtido nas atividades desenvolvidas na indústria petrolífera, que possui em sua composição inúmeros compostos orgânicos e inorgânicos. O fenol é um poluente orgânico que possui propriedades tóxicas, possíveis de causar desequilíbrios ambientais, além de problemas de saúde para o ser humano. Assim, é necessário que haja o tratamento deste efluente com o intuito de reduzir as concentrações dos contaminantes e evitar problemas ambientais. Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são largamente utilizados para o tratamento da APP por possuírem a capacidade de degradar os contaminantes, especialmente os recalcitrantes. Um tipo de POA utilizado para este fim é o que faz uso do persulfato de sódio (PS) para geração de radical sulfato, com ativação via catálise metálica, associado à quelantes, usando ou não a irradiação. O ferro é muito usado na ativação do PS e pode ser obtido por inúmeras fontes, incluindo materiais arenosos que o contêm em sua composição. Assim sendo, este trabalho possuiu como objetivo avaliar a eficiência da degradação do fenol em soluções aquosas, por meio da utilização de POA, utilizando como fonte de ferro sedimentos arenosos integrados à quelante, para ativação de persulfato com e sem irradiação de luz visível. O catalisador foi caracterizado por meio da análise de FRX, DRX e MEV. Para o estudo da degradação do fenol, foram feitos ensaios experimentais, variando as concentrações de persulfato de sódio e da concentração dos sedimentos arenosos, fixando a concentração do quelante (ácido cítrico), expondo um sistema à irradiação de luz visível e o outro, não. A concentração inicial da solução foi de 40 mg.L⁻¹, o tempo reacional foi de 120 min e as amostras foram lidas por meio da cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). Os resultados obtidos com o sólido arenoso indicaram a presença de 47,21% de óxido de ferro (III) em sua composição e o DRX indicou a presença da fase de ferro no material. Dos resultados de degradação, o melhor desempenho foi obtido com o planejamento PS/SA/Q/Luz visível, com remoção de 51,94% do fenol inicial, indicando que a irradiação intensificou a degradação do fenol, frente ao sistema com ausência da luz.

Palavras-chave: tratamento de efluentes, catalisador heterogêneo, foto-Fenton, óxido de ferro

Abstract

Produced Water from Petroleum (PWP) is an effluent generated from activities in the oil industry, containing numerous organic and inorganic compounds in its composition. Phenol is an organic pollutant with toxic properties, capable of causing environmental imbalances as well as health issues in humans. Therefore, it is essential to treat this effluent to reduce contaminant concentrations and prevent environmental problems. Advanced Oxidation Processes (AOPs) are widely used for the treatment of PWP due to their ability to degrade contaminants, mainly recalcitrant species. One type of AOP employed for this purpose involves the use of sodium persulfate (PS) to generate sulfate radicals, with activation via metal catalysis, associated with chelating agents, with or without irradiation. Iron is commonly used in PS activation and can be sourced from various materials, including sandy materials containing it in their composition. This study aimed to evaluate the efficiency of phenol degradation in aqueous solutions through the use of AOP, utilizing sandy sediments, as the iron source for persulfate activation, integrated with a chelating agent (citric acid), both with and without irradiation (visible light). The catalyst was characterized using XRF, XRD, and SEM analyses. For the phenol degradation study,

experimental tests were conducted by varying the concentrations of sodium persulfate and sandy sediments, while fixing the concentration of the chelating agent (5 mM), exposing one system to irradiation and the other without. The initial concentration of the solution was 40 mg.L⁻¹, the reaction time was 120 minutes, and the samples were analyzed using high-performance liquid chromatography (HPLC). The results obtained with the sandy solid indicated the presence of 47.21% iron(III) oxide in its composition, and XRD confirmed the presence of the iron phase in the material. From the degradation results, the best performance was achieved with the PS/SA/Q/Light setup, with a 51.94% removal of the initial phenol, indicating that irradiation enhanced phenol degradation compared to the system without light.

Keywords: effluent treatment, heterogeneous catalyst, photo-Fenton, iron oxide

Introdução

Atualmente, as águas estão sendo continuamente contaminadas por águas residuais oriundas das indústrias e esta poluição tornou-se um grave problema ambiental mundial (Ahmed *et al.*, 2024). A indústria do petróleo é um setor que possui uma grande parcela na contribuição da contaminação das águas, já que durante as atividades desenvolvidas na extração e tratamento do óleo, são produzidas grandes volumes de água produzida de petróleo (APP), que pode ser compreendida como o efluente originado da água de formação geológica e a água injetada no processo para realização de algumas atividades, como manutenção da pressão interna do poço e melhoria da recuperação de óleo (Costa *et al.*, 2023; Aghazadeh *et al.*, 2023).

Para cada barril de óleo são gerados três barris de APP, devido esta alta produção, a APP é um grave problema mundial por conter elementos como sais, metais pesados e compostos orgânicos com propriedades tóxicas para a saúde humana, além de acarretar problemas para a fauna e flora (Costa *et al.*, 2023). Dentre os poluentes orgânicos, o fenol destaca-se por ser um contaminante largamente encontrado nesse meio. Além de ser recalcitrante, pode provocar desde leves irritações cutâneas até o comprometimento do sistema nervoso (Györi *et al.*, 2022). Desta forma, há a necessidade de medidas de tratamento que realizem a redução da concentração destes poluentes da APP para que ela possa ser reutilizada no processamento da indústria petrolífera, sem trazer problemas operacionais por causa dos contaminantes ou descartada de uma forma segura, sem contaminar os ambientes aos quais for introduzida.

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são métodos eficientes para degradação/mineralização de compostos orgânicos por possuírem a capacidade de gerar radicais reativos que permitem a degradação de uma grande escala de contaminantes (Yazdanbakhsh *et al.*, 2020). Os POAs baseados nos radicais persulfato, como por exemplo o persulfato de sódio, possuem como vantagens a capacidade de degradar poluentes recalcitrantes, visto que ao ser ativado, gera o radical sulfato ($\text{SO}_4^{\bullet-}$) que possui um elevado potencial redox (2,5 – 3,1 V), além da geração de radicais hidroxilas (Equação 3), permitindo um desempenho superior na mineralização dos contaminantes, apresentam alta solubilidade, podem ser utilizados em uma larga faixa operacional de pH e que possuem um tempo de meia-vida mais longo (How *et al.*, 2024). O persulfato pode ser ativado de diversas formas, como por metais de transição, como o ferro (Equações 1 e 2), calor, irradiação com luz (Equação 4) e micro-ondas. Associado ao uso do persulfato, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a combinação

do uso de técnicas fotocatalíticas heterogêneas, que, concomitante, utilizam uma fonte de energia luminosa com catalisadores heterogêneos metálicos que unidos permitirão uma maior ativação do persulfato, gerando mais radicais, resultando em uma maior taxa de degradação dos contaminantes, provocando a mineralização dos compostos orgânicos (Equação 5) (Yazdanbakhsh *et al.*, 2020).



Catalisadores heterogêneos mais comuns são os metais, sulfetos e óxidos. Diversos materiais podem ser utilizados como catalisadores, incluindo zeólitas, porfirinas e outros materiais carregados com metais, além de resíduos de diferentes materiais, como sedimentos arenosos, cinzas de termelétrica, entre outros, que podem possuir em sua composição metais, como o ferro (Drumm *et al.*, 2019; Györi *et al.*, 2022).

O sistema de obtenção de radicais sulfato por meio da associação do Fe^{2+} com o PS possui vantagem na geração de radicais, frente a processos em que o PS está associado a irradiação, por causa da facilidade com que o oxidante está disponível. Entretanto, se o pH reacional não se mantiver inferior a 3,0, poderá ocorrer a precipitação do Fe^{3+} obtido por meio da interação entre o Fe^{2+} e o $\text{SO}_4^{\bullet-}$ (Equação 3), reduzindo as taxas de degradação. Desta forma, para que haja a formação de radicais em sua plenitude, deve ocorrer uma manutenção constante do fornecimento de Fe^{2+} ao sistema. Para suprir a demanda de Fe^{2+} , pode-se utilizar a irradiação, pois ela promove a regeneração de Fe^{2+} partindo do Fe^{3+} e, para manter o Fe^{3+} em solução, agente ligantes (também conhecidos como quelantes) são costumeiramente utilizados, uma vez que possuem a capacidade de formar complexos solúveis entre o Fe^{3+} e o ligante (Fe(III)-Ligante), evitando a formação de um decantado férrico (Ahmed *et al.*, 2024).

Assim sendo, este trabalho teve por objetivo, realizar o tratamento de soluções aquosas contaminadas com fenol por meio da utilização de persulfato ativado por sedimentos arenosos com ferro na composição, associados a quelante e a irradiação de luz visível, buscando verificar quais as melhores condições experimentais forneceram as melhores taxas de degradação do fenol.

Metodologia

A solução aquosa contaminada com fenol foi preparada adicionando 40 mg de fenol (Solução fenol 5%, Dinâmica) em 1 L de água destilada, com o intuito de obter uma solução com concentração inicial aproximada de 40 mg. L⁻¹. O efluente preparado foi mantido sob refrigeração até sua utilização, acondicionado em frasco âmbar.

Foi utilizado como catalisador heterogêneo sedimentos arenosos (SA) obtidos nos arredores da Praia de Ponta Negra, Natal, Rio Grande do Norte. Estes sedimentos foram escolhidos por tratar-se de um recurso vasto, que possui uma coloração que indica que há a presença de ferro e que poderia ser utilizado para um fim mais nobre. Depois de recolhidos, a amostra passou por maceração com almofariz

e pistilo, sendo posteriormente peneirada em uma peneira de 150 Mesh (0,106 mm), sendo o material passante utilizado como catalisador. Este material foi analisado por fluorescência de raios X (EDX-720, Shimadzu), por difração raios X (XRD-700 X-ray diffractometer, Shimadzu) e por microscopia de varredura (MEV) (Hitachi Tabletop Microscope TM 3000, Hitachi).

Para o estudo da degradação do fenol foi utilizado como oxidante persulfato de sódio P.A (Dinâmica), como catalisador heterogêneo os sedimentos arenosos e como quelante, ácido cítrico P.A (Dinâmica). Os ensaios em batelada foram realizados seguindo um planejamento experimental $2^2 + 3$ pontos centrais, adicionados de 2 pontos controle, totalizando 9 experimentos, variando a concentração de persulfato de sódio (5 – 15 mM), a concentração de catalisador heterogêneo (1 – 3 g. L⁻¹) e a concentração do quelante foi fixada em 5 mM. Para os ensaios experimentais de fotocatalise, a radiação luminosa foi obtida utilizando lâmpada de iodetos metálicos (Ourolux, 150 W) com a presença de invólucro, que apresentou resposta espectral na região visível (400 a 1000 nm), sendo denominada por luz visível. Nestes experimentos foram avaliados apenas os extremos do planejamento anterior 1 e 3 g. L⁻¹ de catalisador heterogêneo e 5 e 15 mM de PS, mantendo a concentração de ácido cítrico 5 mM. Para cada reator (béquer encamisado de 250 mL), foram adicionados 50 mL da solução aquosa contaminada com fenol, os volumes do oxidante e do quelante, assim como a massa do catalisador, seguindo o planejamento experimental elaborado. O pH da solução inicial foi ajustado para cerca de 3,0 (Hollanda *et al.*, 2024), utilizando ácido sulfúrico P.A (Neon), 0,5 M. Os sistemas de degradação foram mantidos sob agitação magnética e o reator encamisado estava acoplado a água de recirculação de um banho termostático, que manteve o sistema a uma temperatura de 20 °C. O tempo reacional foi de 120 min. Os ensaios de controle realizados foram um apenas solução de fenol, com o PS (10 mM) e o quelante e outro em que foi analisado a solução de fenol, com o quelante e o catalisador (2 g.L⁻¹), buscando identificar se houve alguma ação de degradação individual das substâncias.

Ao final da reação, a matriz sólida foi filtrada por meio da associação de seringas e filtros (PTFE Hidrofílico 0,46 µm, Nova Analítica) e 0,9 mL do filtrado foi adicionado a um vial que continha 0,1 mL de metanol, com o intuito de cessar a reação. A concentração de fenol foi medida por um cromatógrafo líquido de alta eficiência (CLAE) (Prominence UFLCXR, Shimadzu), sob um comprimento de onda de 270 nm.

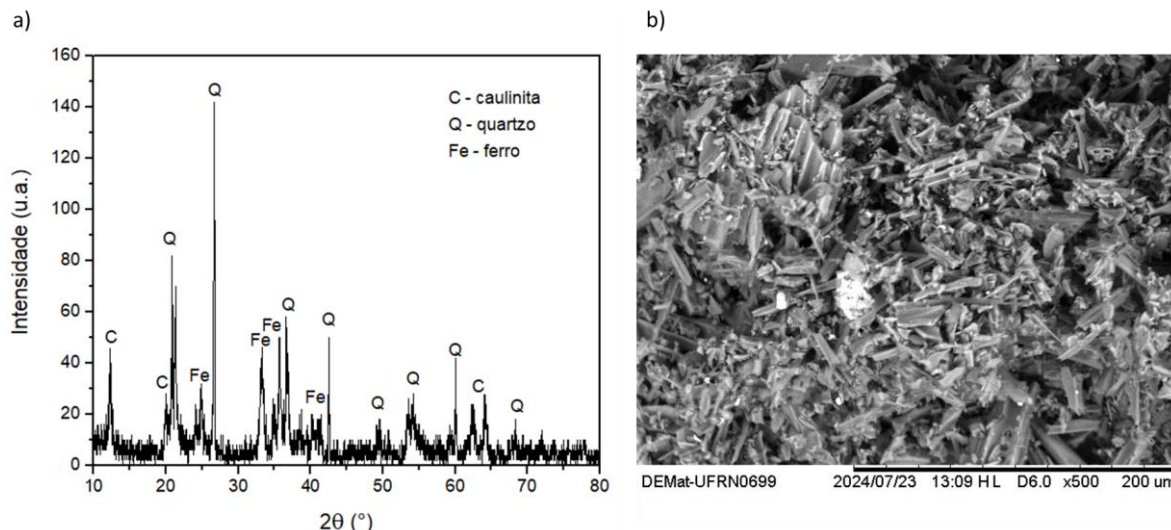
Resultados e Discussão

A análise do FRX para o catalisador heterogêneo identificou que, nos sedimentos arenosos, os principais óxidos encontrados foram o óxido de ferro (Fe₂O₃), com 47,21%, óxido de alumínio (Al₂O₃), 27,08% e o dióxido de silício (Si₂O), 24,19%, além de traços de outros óxidos. Tais resultados similares foram identificados por Freire *et al.* (2022).

A Figura 1a apresenta o espectro obtido com a difração de raios X dos sedimentos arenosos. As principais fases identificadas foram a caulinita, quartzo e óxido de ferro. A caulinita (Al₂O₃) encontra-se nos picos 12,30°, 19,98° e 64,26°. O quartzo (SiO₂) é identificado nos picos 20,88°, 26,60°, 36,66°, 42,52°, 49,46°, 54,28°, 60,04° e 68,40°. E o ferro, possivelmente hematita e/ou magnetita, encontra-se presente no pico 24,84°, 33,34°, 35,68° e 40,13° (Varela *et al.*, 2005; Correa *et al.*, 2008; Morais *et al.*, 2020).

A Figura 1b apresenta imagens obtidas com a análise MEV. Por meio dela, é possível detectar a morfologia dos sedimentos, indicando que o material possui uma morfologia irregular com partículas de diferentes diâmetros e que possuem filamentos pontiagudos, ocasionados pela maceração do material.

Figura 1 – a) Difratograma dos sedimentos arenosos utilizados com catalisador heterogêneo e b) Imagem obtida com o MEV dos sedimentos arenosos.



Os resultados dos processos de degradação para o fenol para o sistema em que não houve a inserção da irradiação UV encontra-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Degradação do fenol no sistema PS/SA/Q com duas horas de reação com $[\text{fenol}]_0 = 40 \text{ mg/L}$; quelante: $[\text{ácido cítrico}] = 5 \text{ mM}$

Ensaio Experimental	Nível (x1) [SA] g/L	Nível (x2) [PS] mM	Degradação de fenol (%)
1	1,0	5,0	34,86
2	3,0	5,0	33,39
3	1,0	15,0	10,28
4	3,0	15,0	7,34
5	2,0	10,0	19,46
6	2,0	10,0	21,88
7	1,0	5,0	23,83

Os resultados do sistema utilizando PS/SA/Q apresentaram diferentes taxas de degradação e, a melhor condição experimental encontrada foi a referente ao ensaio 1, com os níveis -1 e -1, com as condições 1 g. L^{-1} do catalisador heterogêneo e 5 mM do PS, com 5 mM do ácido cítrico e apresentou uma degradação máxima de 34,86%. Nesta condição, percebemos que temos a menor concentração tanto do oxidante, quanto do catalisador, e este arranjo possibilitou o melhor desempenho de degradação do fenol. Tal fato pode ser explicado pelo fato de que todo o PS presente foi totalmente ativado por todo o ferro presente no meio ter sido utilizado. O ensaio 4 foi o que apresentou a menor degradação (7,34%), podendo este resultado ser explicado pela quantidade excessiva de catalisador presente no meio,

o que provocou uma maior geração de radicais hidroxila, que acabam por possuírem um efeito sequestrante entre eles, levando a uma consequente queda na ativação do PS, com diminuição da formação de radicais sulfato. Fato semelhante ocorre com o PS, considerando que neste ponto ele estava em uma elevada concentração, houve a formação de uma grande quantidade de radicais sulfato e hidroxilas, ao ponto destes começarem a reagir entre si, por meio de reações colaterais indesejadas, passando a gerar $S_2O_8^{2-}$, reduzindo a degradação do fenol (Ahmed *et al.*, 2024). Os pontos centrais do planejamento, com níveis 0 e 0, valores intermediários entre as condições, apresentaram degradação média de fenol 21,72%, com desvio de 1,8 % entre eles, indicando que o processo foi reprodutivo. Os pontos controle, realizados apenas com a solução de fenol juntamente com o catalisador e quelante e outro com solução de fenol com PS e quelante apresentaram uma remoção muito pequena de contaminante (inferior a 1%), indicando que sozinhos não possuem a capacidade de degradar fenol.

Na Tabela 2, encontram-se os resultados pertencentes aos ensaios experimentais realizados com o sistema PS/SA/Q/Luz visível, que corresponde às 4 condições iniciais do sistema anterior acrescido da irradiação da luz visível.

Tabela 2 - Degradação do fenol no sistema PS/SA/Q/Luz visível com duas horas de reação com $[fenol]_0 = 40$ mg/L; quelante: [ácido cítrico] = 5 mM.

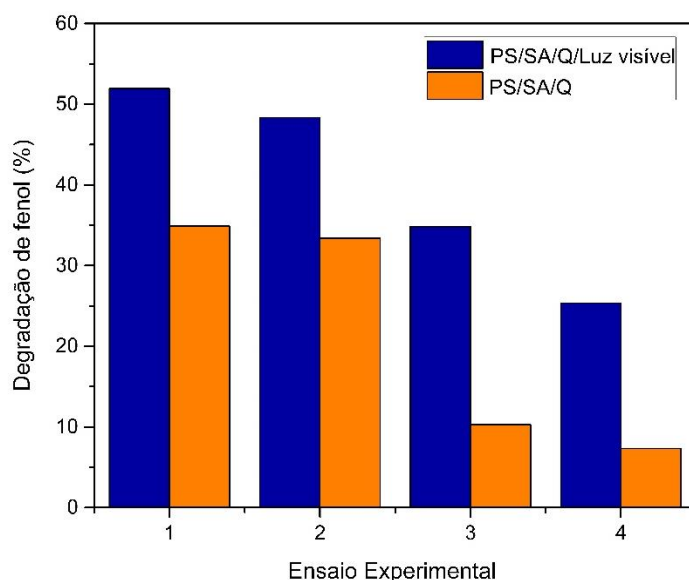
Ensaio Experimental	Nível (x1) [SA] g/L	Nível (x2) [PS] mM	Degradação de fenol (%)
1	1,0	5,0	51,94
2	3,0	5,0	48,32
3	1,0	15,0	34,81
4	3,0	15,0	25,37

Nestes experimentos de degradação, foi obtido como melhor condição o ensaio experimental 1, similar ao ocorrido com o sistema PS/SA/Q. As condições foram 1 g. L^{-1} do catalisador heterogêneo e 5 mM do PS, com 5 mM do ácido cítrico e a degradação alcançada foi de 51,94%. O mesmo padrão dos resultados foi observado neste sistema, sendo o ensaio experimental 4 o que apresentou o menor teor de degradação de fenol, pelos mesmos motivos comentados anteriormente. Outro aspecto a ser observado para o resultado deste ponto foi a elevada concentração do catalisador, que dificultou que o catalisador fosse irradiado pela luz visível (dificuldade obtida pelo layout do reator), dificultando sua ativação e subsequente ativação do PS. Pesquisas desenvolvidas com catalisadores heterogêneos alternativos contendo Fe também apresentaram resultados promissores de degradação de fenol por meio do uso de processos Fenton/foto-Fenton heterogêneo com dosagem de catalisador semelhante a utilizada neste trabalho, indicando a eficácia destes sistemas para a degradação do fenol em soluções aquosas (Drumm *et al.*, 2019; Hollanda *et al.*, 2023).

A Figura 1 apresenta a comparação entre as 4 condições iniciais estudadas neste trabalho. Por meio de uma análise visual, percebe-se que há uma melhoria na taxa de degradação do fenol com a inserção da irradiação de luz visível, conseguindo um aumento da remoção em todos os pontos experimentais, alcançando um aumento de 24,53% de degradação no ensaio com a maior diferença de remoção (Ensaio 3). Como resultado geral, a inserção da irradiação de luz visível proporcionou ao sistema um aumento da degradação média geral de 18,63% de degradação do fenol. Esse aumento na degradação do fenol no segundo tipo de processo estudado deve-se ao fato de que, com a inserção da radiação luminosa, houve uma maior geração de radicais sulfato e hidroxilas e, consequentemente, uma

maior mineralização do fenol, frente ao primeiro sistema, em que a geração dos radicais foi obtida apenas com a ativação do PS por meio da catálise metálica.

Figura 1 - Comparação entre os resultados de degradação de fenol com os sistemas PS/SA/Q/Luz visível e PS/SA/Q, evidenciando o efeito da radiação para os processos de duas horas, com $[\text{fenol}]_0 = 40 \text{ mg/L}$; quelante: $[\text{ácido cítrico}] = 5 \text{ mM}$; **exp 1:** $[\text{SA}] = 1,0 \text{ g/L}$ e $[\text{PS}] = 5,0 \text{ mM}$; **exp 2:** $[\text{SA}] = 3,0 \text{ g/L}$ e $[\text{PS}] = 5,0 \text{ mM}$; **exp 3:** $[\text{SA}] = 1,0 \text{ g/L}$ e $[\text{PS}] = 15,0 \text{ mM}$; **exp 4:** $[\text{SA}] = 3,0 \text{ g/L}$ e $[\text{PS}] = 15,0 \text{ mM}$.



Conclusões

De acordo com os estudos laboratoriais realizados, verificou-se que os sedimentos arenosos utilizados como catalisador heterogêneo, de acordo com a análise de FRX apresentaram ferro em sua composição e, por meio do DRX, foi identificada as fases de caulinita, quartzo e de ferro na estrutura do material. Em relação aos planejamentos experimentais, com base nos dois sistemas analisados, verificou-se que o melhor desempenho de degradação obtido foi o que realizou a associação da PS/SA/Q/Luz visível, que apresentou uma degradação máxima de 52% de degradação do fenol presente na amostra. Desta forma, se deduz que o sistema proposto foi eficiente para o tratamento de efluentes contaminados com fenol, e evidencia que a radiação da luz visível promove a ativação de oxidantes, sendo uma alternativa para o uso de processos de tratamento de compostos recalcitrantes com um viés mais econômico e eficiente. Ressalta-se, ainda, que melhorias podem ser feitas nos próximos planejamentos experimentais, com intuito de aprimorar ainda mais os resultados obtidos, como suprimindo a utilização do agente quelante, procurando verificar se este realmente é necessário.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP e a Central Analítica do Instituto de Química da UFRN, pela colaboração.

Referências Bibliográficas

- Aghazadeh, M., Hassani, AH & Borghei, M. Aplicação do processo fotocatalítico proxona para tratamento de águas residuais petroquímicas. **Sci Rep** 13 , 12738, 2023.
- Ahmed, Sameh; Gogina, Elena; Makisha, Nikolay. Photodegradation of phenol using UVC-activated persulfate and chelated-Fe(III) combined system: rsm modeling, mechanism, effect of coexisting ions, and effect of heavy species. **J. Water Process Eng.** [S.L.], v. 60, p. 105104, abr, 2024.
- Correa, M. M.; KER, J. C.; BÁRRON, V.; FONTES, M. P. F.; TORRENT, J.; CURI, N. Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente tabuleiros costeiros. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:1017-1031, 2008
- Costa, Sabryna I.G. *et al.* Towards the removal of soluble organic compounds present in oilfield produced water by advanced oxidation processes: critical review and future directions. **Process Saf. Environ. Prot.**, [S.L.], v. 174, p. 608-626, jun, 2023.
- Drumm, F.C., Grassi, P., Sulkovski, A.A. *et al.* Applicability of Coal Bottom Ash from Thermoelectric Power Plant as an Alternative Heterogeneous Catalyst in Photo-Fenton Reaction. **Water Air Soil Pollut** 230, 274, 2019.
- FREIRE, L. V.; JÚNIOR, . O. F. dos S.; INGUNZA, M. del P. D.; CHAVES, L. F. M.; NETO, O. de F. Caracterização química, mineralógica e geotécnica de sedimentos da formação barreiras e pós-barreiras - litoral sul do Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 8, p. 76–90, 2022.
- Győri, E.; Kecskeméti, Á.; Fábián, I.; Szarka, M.; Lázár, I. Environment-Friendly Catalytic Mineralization of Phenol and Chlorophenols with Cu- and Fe- Tetrakis(4-aminophenyl)-porphyrin—Silica Hybrid Aerogels. **Gels** , 8, 202, 2022.
- Hollanda, L.R., de Souza, J.A.B., Foletto, E.L. *et al.* Applying bottom ash as an alternative Fenton catalyst for effective removal of phenol from aqueous environment. **Environ Sci Pollut Res** 30, 120763–120774, 2023.
- Hollanda, Luana R. *et al.* Iron-bearing mining reject as an alternative and effective catalyst for photo-Fenton oxidation of phenol in water, **Environ Sci Pollut Res** 31, 21291–21301 (2024).
- How, Zuo Tong *et al.* Ozone-activated peroxymonosulfate (O₃/PMS) process for the removal of model naphthenic acids compounds: kinetics, reactivity, and contribution of oxidative species. **J. Environ. Chem. Eng.**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 109935, jun. 2023.
- MORAIS, A. D.; SANTOS JR, O. F.; FREITAS NETO, O. Geotechnical properties of the barreiras formation sediments in the cliffs of Barra de Tabatinga, eastern coast of Rio Grande do Norte / Brazil. **Holos**, v. 7, n. 36, 2020.
- Varela, M. L.; Nascimento, R. M. do; Martinelli, A. E.; Hotza, D.; Melo, D. M. A.; Melo, M. A. F.. Otimização de uma metodologia para análise mineralógica racional de argilominerais. **Cerâmica**, v. 51, n. 320, p. 388-392, dez. 2005.
- Yazdanbakhsh Ahmadreza, Aliyari Asma, Sheikhmohammadi Amir, Aghayani Ehsan. Application of the enhanced sono-photo-Fenton-like process in the presence of persulfate for the simultaneous removal of chromium and phenol from the aqueous solution **J. Water Process Eng.**, v. 34, 2020.