

Estudo da degradação fotocatalítica de matéria orgânica presente em esgoto doméstico utilizando TiO_2 , Nb_2O_5 e WO_3

Kayky Augusto da Silva¹, Válber Rodrigo Ribeiro de Medeiros², Maria Gabriela de Medeiros Costa¹, Ila Gabriele Diniz Dias de Azevedo^{2,3}, Magna Angelica dos Santos Bezerra Sousa¹, André Luís Lopes Moriyama^{1,2*}

*Autor correspondente: andre.moriyama@ufrn.br

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química (DEQ), Natal/RN.

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ), Natal/RN.

³ Université de Toulon, Aix Marseille Univ, CNRS, IM2NP, Toulon, France.

Resumo/Abstract

RESUMO - A crescente escassez de água e o aumento do volume de efluentes demandam alternativas sustentáveis para o tratamento de águas residuais. A fotocatalise heterogênea, um Processo Oxidativo Avançado (POA), se destaca por sua eficiência na degradação de contaminantes, principalmente com a utilização de luz solar. Esse trabalho explora a degradação da matéria orgânica em esgoto doméstico sintético utilizando os fotocatalisadores TiO_2 , Nb_2O_5 e WO_3 , além de seu comportamento cinético. Os experimentos revelaram que o TiO_2 foi o fotocatalisador mais eficiente, alcançando uma remoção de até 40,93% de matéria orgânica em 240 minutos. A cinética da reação seguiu um modelo de ordem zero, sugerindo uma degradação constante ao longo do tempo. Esses resultados indicam que a fotocatalise solar é uma alternativa com potencial significativo para a remoção de matéria orgânica e ambientalmente sustentável para o tratamento de esgoto, especialmente em áreas com alta incidência solar, como o Nordeste do Brasil.

Palavras-chave: Fotocatalise heterogênea, luz solar, esgoto doméstico sintético, cinética de reação.

ABSTRACT - This study investigates the kinetic degradation of organic matter in synthetic domestic wastewater using TiO_2 , Nb_2O_5 , and WO_3 photocatalysts. The growing water scarcity and increasing effluent production demand sustainable alternatives for wastewater treatment. Heterogeneous photocatalysis, an advanced oxidative process (AOP), is particularly efficient in degrading contaminants, especially when utilizing solar light. The experiments showed that TiO_2 was the most efficient photocatalyst, achieving up to 40.93% removal of organic matter in 240 minutes. The reaction kinetics followed a zero-order model, indicating a constant degradation over time. These results suggest that solar photocatalysis is an effective and environmentally sustainable solution for wastewater treatment, particularly in regions with high solar incidence, such as Northeast Brazil.

Keywords: Heterogeneous photocatalysis, Wastewater treatment, Reaction kinetics, Solar photocatalysis.

Introdução

A escassez de recursos hídricos tem se consolidado como uma preocupação crescente entre os governos, impactando diretamente a sobrevivência humana e o desenvolvimento econômico [1]. A rápida industrialização, o aumento populacional e as secas

prolongadas intensificam a escassez de água doce e aumentam significativamente a produção de efluentes, sobrecarregando as infraestruturas de tratamento existentes e tornando ainda mais urgente a adoção de sistemas de gestão hídrica sustentáveis e integrados [3-4]. A situação se agrava quando efluentes contaminam aquíferos subterrâneos ou corpos d'água doce, representando uma

grave ameaça à qualidade da água disponível [3]. Dessa forma, os serviços de saneamento de esgoto desempenham um papel crucial na conservação da água e na promoção da saúde pública [2].

Estima-se que 2,01 bilhões de toneladas de efluentes sejam produzidos anualmente, sendo que 33% desse volume permanece sem tratamento. Além dessa carência, muitas tecnologias convencionais, como filtração, sedimentação e floculação, acabam por gerar resíduos poluentes que impactam também o meio ambiente e ocupam áreas em aterros sanitários [3]. Em resposta a isso, cresce a busca por processos alternativos para o tratamento de esgotos domésticos, destacando-se os processos oxidativos avançados (POAs). Esses processos utilizam radicais altamente reativos, sendo o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$) o principal agente de degradação de contaminantes. Embora os POAs sejam vantajosos por promoverem a destruição dos poluentes e não apenas sua transferência para outra fase, sua viabilidade é frequentemente questionada devido à alta demanda energética [5-6].

Dentre os POA's, a fotocatalise heterogênea se destaca por ser um processo baseado em reações redox (redução oxidação) que são induzidas pela radiação sobre semicondutores, como TiO_2 , CdS , XnO , WO_3 e Fe_2O_3 [8]. Nos últimos anos, a fotocatalise com dióxido de titânio (TiO_2) tem sido amplamente utilizada na degradação de poluentes, evidenciando sua eficiência no tratamento de efluentes industriais e domésticos, chorume, descontaminação do solo e emissões gasosas [8-9]. No entanto, o uso da fotocatalise heterogênea solar no tratamento de esgoto sanitário ainda necessita de mais estudos sobre sua viabilidade para tornar-se uma alternativa competitiva em escala industrial frente aos métodos convencionais.

O aproveitamento da luz solar para a fotocatalise heterogênea no Brasil é favorecido pela alta incidência solar, especialmente no Nordeste. Além disso, o estudo da degradação fotocatalítica da matéria orgânica deve se expandir para incluir outros óxidos, como Nb_2O_5 e WO_3 , amplamente disponíveis no país, sendo essencial para o avanço e otimização dessa tecnologia.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo a remoção de matéria orgânica oriunda de em esgoto doméstico em um fotorreator solar, utilizando TiO_2 , Nb_2O_5 e WO_3 , como fotocatalisadores. Para isso, serão determinadas as condições ideais de operação e processo, como concentração do fotocatalisador, e investigada a cinética de fotodegradação da matéria orgânica em cada situação.

Experimental

Foram utilizados como catalisadores o dióxido de titânio (Sigma-Aldrich), o trióxido de tungstênio (Ludwig Biotec) e o pentóxido de nióbio (Sigma-Aldrich), todos adquiridos comercialmente. Os semicondutores foram avaliados em quatro concentrações: 0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

O sistema operacional é composto por um reator do tipo batelada, com superfície interna aletada e equipado com agitação magnética, conforme ilustrado na figura 1. O fotorreator foi instalado em uma posição estrategicamente selecionada para evitar sombreamento por edificações adjacentes, garantindo assim a incidência direta da luz solar como fonte de radiação.



Figura 1: Esquema do sistema operacional: reator batelada com aletas e agitação magnética.

Para o estudo experimental, utilizou-se como modelo uma solução sintética de esgoto doméstico, preparada de acordo com o método descrito pela OECD Guidelines for the Testing of Chemicals[11] com concentração aproximada de 106 mg/L de carbono orgânico.

Inicialmente, foi adicionado um determinado volume de solução sintética ao reator, com o pH previamente ajustado para 3,0. Os experimentos foram realizados com duração de quatro horas, iniciando-se às 10h e finalizando às 14h, correspondendo ao período de maior incidência de radiação solar. Todos os ensaios ocorreram em dias de céu claro.

Como parâmetro de avaliação, foi utilizada a Demanda Química de Oxigênio (DQO), conforme a metodologia descrita na literatura [10]. Amostras foram coletadas a intervalos de 40 minutos, totalizando seis amostras por experimento, incluindo a amostra inicial antes do início da fotocatalise. Ao final de cada coleta, as amostras foram filtradas a vácuo e preparadas para análise de DQO.

Resultados e Discussão

Inicialmente, foi realizada a caracterização morfológica de cada fotocatalisador por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de correlacionar os resultados de degradação com suas respectivas características morfológicas. As micrografias obtidas estão apresentadas na Figura 2.

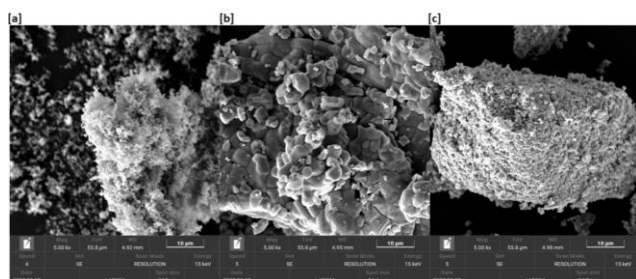


Figura 2: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos catalisadores (a) TiO_2 , (b) Nb_2O_5 e (c) WO_3 , obtidas com ampliação de 5000 vezes.

A partir das imagens de MEV, observa-se que os óxidos analisados apresentam morfologia composta por partículas de formato irregular, atribuída a sua natureza fina. Conforme mostrado na Figura 2-b, o Nb_2O_5 exibe a formação de aglomerados menores em comparação aos demais óxidos, indicando uma estrutura mais porosa e potencialmente maior área superficial, o que pode favorecer processos de adsorção. Além disso, o WO_3 (figura 2-c)

apresenta aglomerados com morfologia mais regular, tendendo ao formato cúbico.

Posteriormente à caracterização estrutural, o tratamento fotocatalítico foi aplicado às amostras em quatro concentrações distintas de catalisador: 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 g/L em presença de luz solar, como mostrado na figura 3.

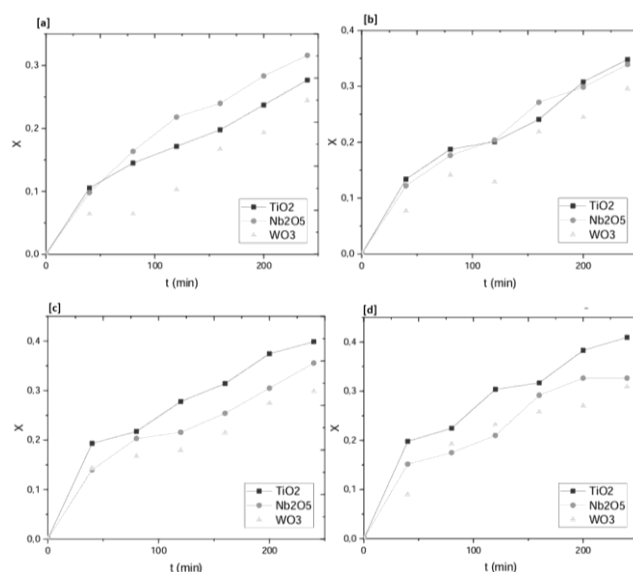


Figura 3: Remoção de matéria orgânica em amostras de esgoto doméstico sintético utilizando diferentes concentrações de catalisadores: (a) 0,25 g/L; (b) 0,5 g/L; (c) 0,75 g/L e (d) 1,0 g/L.

O estudo de eficiência demonstrou que a maior capacidade de remoção de matéria orgânica foi observada com o uso de TiO_2 na concentração de 1,0 g/L, alcançando 40,93% de remoção (figura 3-d). Na menor concentração avaliada (figura 3-a), o Nb_2O_5 apresentou o melhor desempenho entre os catalisadores, o que pode estar relacionado ao seu maior poder de adsorção, atribuído à sua estrutura mais porosa, conforme evidenciado nas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para o WO_3 , a maior eficiência foi registrada também na concentração de 1,0 g/L, com 30,87% de remoção (figura 3-d). Já para o Nb_2O_5 , o melhor resultado foi alcançado na concentração de 0,75 g/L, com uma remoção de 35,56% (figura 3-c).

A cinética de reação foi estudada considerando a concentração de 0,25 g/L para todos os catalisadores (TiO_2 , Nb_2O_5 , WO_3), como mostrado na figura 4.

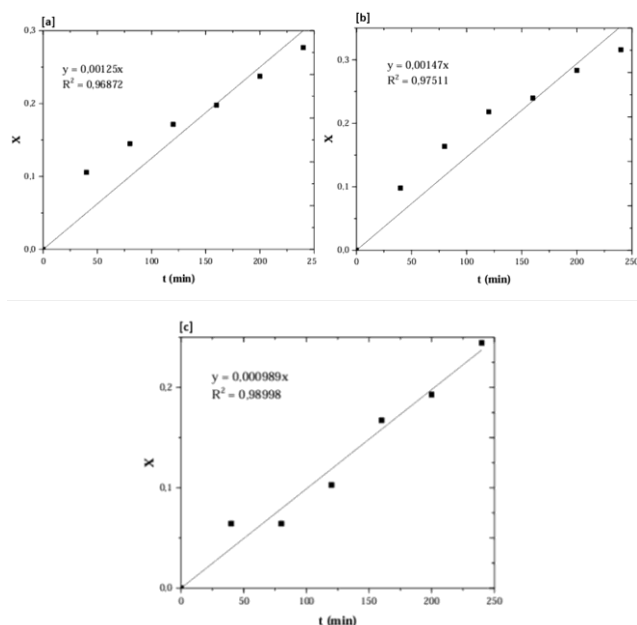


Figura 4: Cinética de degradação do esgoto doméstico sintético na presença dos catalisadores a uma concentração de 0,25 g/L, com ajustes ao modelo cinético de ordem zero. (a) TiO_2 ; (b) Nb_2O_5 ; (c) WO_3 .

A partir da figura 4, verifica-se que a cinética de ordem zero consegue representar de forma adequada a degradação fotocatalítica em todos os cenários estudados.

Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo permitiram elucidar aspectos relevantes da cinética envolvida na fotocatalise aplicada ao tratamento de esgoto doméstico sintético. Verificou-se que o processo apresenta potencial significativo para a remoção de matéria orgânica, mesmo na ausência de agentes oxidantes auxiliares, como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Os fotocatalisadores utilizados, em sua forma pura e comercial, foram capazes de promover remoções superiores a 30%, com destaque para o TiO_2 , que atingiu uma eficiência máxima de 40,93%. Adicionalmente, observou-se que o perfil ascendente das curvas de remoção ao longo do tempo indica a possibilidade de obtenção de eficiências ainda maiores com o prolongamento da exposição à radiação solar.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Agradecemos também ao laboratório de cimentos (LABCIM) pelas análises de microscopia eletrônica de varredura.

Referências

1. He, J., Gao, Y., Li, J., Zhang, Y., Wang, Y., Zhu, M., Zhang, J., Cao, M., Wei, X., & Qu, M. (2025). Assemble a removable dual-function solar photothermal evaporator with wetting gradient: Efficient desalination and wastewater treatment. *Desalination*, 599, 118423. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118423>
2. Ferreira, M. M., Fiore, F. A., Saron, A., & Silva, G. H. R. da. (2021). Systematic review of the last 20 years of research on decentralized domestic wastewater treatment in Brazil: state of the art and potentials. *Water Science and Technology*, 84(12), 3469–3488. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.487>
3. Iqbal, M. A., Akram, S., Khalid, S., Lal, B., Ul Hassan, S., Ashraf, R., Kezembayeva, G., Mushtaq, M., Chinibayeva, N., & Hosseini-Bandegharai, A. (2024). Advanced photocatalysis as a viable and sustainable wastewater treatment process: A comprehensive review. *Environmental Research*, 253, 118947. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118947>
4. Lema, M.W. Wastewater crisis in East African cities: challenges and emerging opportunities. *Discov Environ* 3, 18 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00206-w>
5. Araújo, B. A., Souza, J. E. S. de, Sarmiento, K. K. F., Rebouças, L. D., Medeiros, K. M. de, & Lima, C. A. P. de. (2021). Advanced oxidative processes applied in effluents treatment of membranes production: a review. *Research, Society and Development*, 10(4), e27210414253. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14253>

6. Hübner, U., Spahr, S., Lutz, H., Rüting, S., Gernjak, W., & Wenki, J. (2024). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. *Heliyon*, 10(e30402). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30402>
7. Mousa, S. A., Abdallah, H., & Khairy, S. A. (2025). The use of green synthesized TiO₂/MnO₂ nanoparticles in solar power membranes for pulp and paper industry wastewater treatment. *Scientific Reports*, 15, 2102. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-85075-8>
8. Medeiros, V. R. R. de. (2020). *Estudo da fotodegradação da matéria orgânica presente em esgoto doméstico utilizando TiO₂, Nb₂O₅ e WO₃* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte
9. Spáčilová, M., Krejčíková, S., Maleterova, Y., Kastanek, F., & Solcova, O. (2022). Scale-up of photoreactor with TiO₂ thin layer for wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 86(8), 1981–1990. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.313>
10. A. D. Eaton; L. S. Clesceri; E. W. Rice; A. E. Greenberg in *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed.; American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF), Eds.; APHA: Washington, D.C., 2012; 4-50 – 4-56.
11. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Organisation for Economic Co-operation and Development, Ed.; OECD Publishing: Paris, 1999; Section 303A.