

ESTUDO DA PROPRIEDADE FOTOCATALÍTICA DA HETEROESTRUTURA CeO₂-ZnO/SOD DERIVADA DA ESTRUTURA METAL-ORGÂNICA ZIF-8

Klebson L. P. Cardozo¹; Jayne S. Martins¹; Mayara M. Teixeira¹; Ana C. S. Alcântara¹.

¹Universidade Federal do Maranhão, UFMA.

Palavras-Chave: ZIF-8, Sodalita, Fotocatálise.

Introdução

Atualmente, a contaminação dos recursos hídricos por ações antropológicas tornou-se uma grande preocupação, uma vez que resíduos domésticos, industriais e agrícola têm afetado de forma negativa à saúde humana e à preservação ambiental. No intuito de remediar este problema, a água passa por tratamento como coagulação, filtração, desinfecção, sedimentação, descoloração, adsorção em carvão ativado e precipitação química (ABDEL-RAOUF, 2019). Contudo, a ineficiência na degradação de compostos orgânicos ainda é um fator limitante dessas técnicas. Diante disso, os tratamentos avançados como a fotocatalise torna-se uma alternativa viável e eficaz para a degradação de contaminantes orgânicos.

A fotocatalise é um processo de degradação de poluentes que utiliza a luz para ativar um catalisador, promovendo reações químicas que transformam substâncias contaminantes em produtos menos tóxicos ou completamente inofensivos. Este processo tem ganhado crescente atenção devido à sua capacidade de tratar e purificar água e ar de forma eficiente e sustentável. A fotocatalise é frequentemente empregada no tratamento de águas residuais, remoção de corantes e desinfecção de ambientes contaminados (HOFFMANN, 1995; ZHANG, 2021).

O mecanismo fundamental da fotocatalise envolve a geração de pares de elétron-buraco (e^-/h^+) quando um semicondutor é excitado pela luz. Estes pares são responsáveis pela formação de espécies reativas de oxigênio, como radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) e peróxidos ($\bullet\text{O}_2^-$), que atacam e degradam os poluentes orgânicos (KHAN, 2021). Semicondutores como TiO₂, ZnO e CeO₂ são frequentemente utilizados devido à sua estabilidade, eficiência e disponibilidade. No entanto, a eficácia desses materiais pode ser limitada pela rápida recombinação dos pares e pela necessidade de radiação UV, que não é abundante em luz solar (LEE, 2019; LI, 2022).

Avanços recentes têm focado na modificação dos semicondutores para melhorar sua eficiência fotocatalítica, incluindo a dopagem com metais ou não-metais, a criação de heteroestruturas e a incorporação de materiais de suporte, como zeólitas e MOFs (Metal-Organic Frameworks) (CAO, 2020; ZHANG, 2022). Essas abordagens visam aumentar a absorção de luz visível, prolongar o tempo de vida dos pares de elétron-buraco e proporcionar mais sítios ativos para a reação.

Os ZIFs (Zeolitic Imidazolate Frameworks), como o ZIF-8, são estruturas de rede de metal-orgânico que combinam a porosidade de zeólitas com a flexibilidade dos ligantes orgânicos. O ZIF-8 tem sido amplamente estudado por suas propriedades fotocatalíticas, incluindo sua capacidade de adsorver e reter contaminantes, facilitando a interação com a luz e a geração de radicais livres (YUAN, 2017; WANG, 2020). A integração de ZIF-8 com outros materiais pode potencializar suas propriedades fotocatalíticas e oferecer novas soluções para a

remoção de poluentes. Por outro lado, a sodalita, uma zeólita com uma estrutura altamente estável, também desempenha um papel importante como suporte em sistemas fotocatalíticos. Suas propriedades de adsorção e troca iônica permitem a captura e remoção de poluentes, além de oferecer um suporte estável para semicondutores e outros catalisadores (ZHANG, 2021; BRECK, 1974). A combinação da sodalita com materiais como CeO_2 e ZIF-8 pode criar heteroestruturas que aproveitam as vantagens de cada componente, aumentando a eficiência e a estabilidade dos sistemas fotocatalíticos e oxidativos.

Diante disso, este trabalho explora a funcionalização da superfície do CeO_2 com a estrutura metal-orgânica ZIF-8 suportado em sodalita, no intuito de realizar o tratamento térmico para obter uma nanoestrutura funcionalizada formada por $\text{ZnO-CeO}_2/\text{SOD}$. A heteroestrutura será aplicada como sistema fotocatalítico, visando melhorar a eficácia na degradação do poluente rodamina b. A abordagem combinada busca maximizar a atividade fotocatalítica e a capacidade de adsorção, oferecendo uma solução integrada para desafios ambientais atuais.

Material e Métodos

Inicialmente trabalhou-se na obtenção do CeO_2 , onde foi utilizado 2,5 g do precursor $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ que foi dissolvido em 50 mL de água deionizada e foi deixada em agitação por 10 minutos, em temperatura ambiente. Então, foi adicionado 10 mL de uma solução de NaOH 5,0M, até o pH atingir o valor de 14, então foi mantido em agitação magnética por 24 h. O material obtido foi lavado com água em centrifuga a 4000 rpm por 10 min até o pH atingir o valor de 7, então o material foi seco a 100 °C por 24 h.

Já para obtenção da estrutura ZIF-8 seguiu-se a metodologia de Schejn, 2014, onde separadamente foi dissolvido 0,595 g de $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ em 20 mL de metanol e 1,642 g de 2-metilimidazol em 20 mL de metanol, em temperatura ambiente. As soluções permaneceram em agitação constante por 10 min, em seguida a solução do sal de zinco é vertida na solução na solução do ligante orgânico e mantido em agitação durante 24 h. O precipitado obtido foi centrifugado a 4000 rpm por 15 min e lavado três vezes com metanol e seco a 70 °C por 24 h.

A zeólita sodalita foi sintetizada pelo método hidrotermal com base na metodologia de Santos, 2023. Em que foram necessárias duas soluções (1) contendo o sal de sódio, hidróxido de sódio e a sílica hidratada, e a outra (2) contendo hidróxido de sódio e hidróxido de alumínio. As soluções foram preparadas sob agitação constante a temperatura de 90 °C. A solução 2 foi vertida na solução 1 sob agitação rápida sendo mantida durante 5 min. A etapa seguinte foi a etapa de cristalização, que consiste em adicionar o material obtido em autoclave que foi aquecido a 90 °C durante 24 h. Após a etapa de cristalização o material obtido foi filtrado com água deionizada e seco a 110 °C por 24 h.

Para o preparo da heteroestrutura, foi utilizada a formação in situ do CeO_2 em uma proporção de 1:1. Primeiramente, a zeólita sodalita previamente sintetizada foi adicionada a solução de $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ com água destilada, sob agitação por 20 min. Após, foi adicionado 10 mL da solução de NaOH 5M até atingir o pH 14. Então, foi deixado sob agitação por 24 h. O material CeO_2/SOD foi lavado com água destilada e seco a 100 °C por 24 h.

A estrutura da ZIF-8 foi formada in situ na presença do material CeO_2/SOD pré-formado considerando a proporção de massa 1:1, para a obtenção da heteroestrutura $\text{CeO}_2\text{-ZIF-8}/\text{SOD}$. Após o processo de centrifugação e lavagem com metanol três vezes, o material é seco e calcinado à 500 °C por 5 h para a formação da heteroestrutura $\text{CeO}_2\text{-ZnO}/\text{SOD}$.

Resultados e Discussão

A análise de DRX possibilita avaliar a natureza cristalina dos materiais preparados. Os difratogramas referentes aos desenvolvidos são apresentados na Figura 1. Observa-se para o ZIF-8 reflexões de alta intensidade em $7,30^\circ$; $10,32^\circ$; $12,70^\circ$ e 18° de 2θ os quais são referentes aos planos (110), (002), (211) e (222), respectivamente (FALAMARZI, 2019). Para a SOD, são observadas reflexões características em $14,10^\circ$; $24,47^\circ$; $31,79^\circ$; $34,87^\circ$; $37,88^\circ$ e $43,13^\circ$ de 2θ , associados aos planos (110), (211), (210), (311), (222) e (411) respectivamente (BAERLOCHER, 1996).

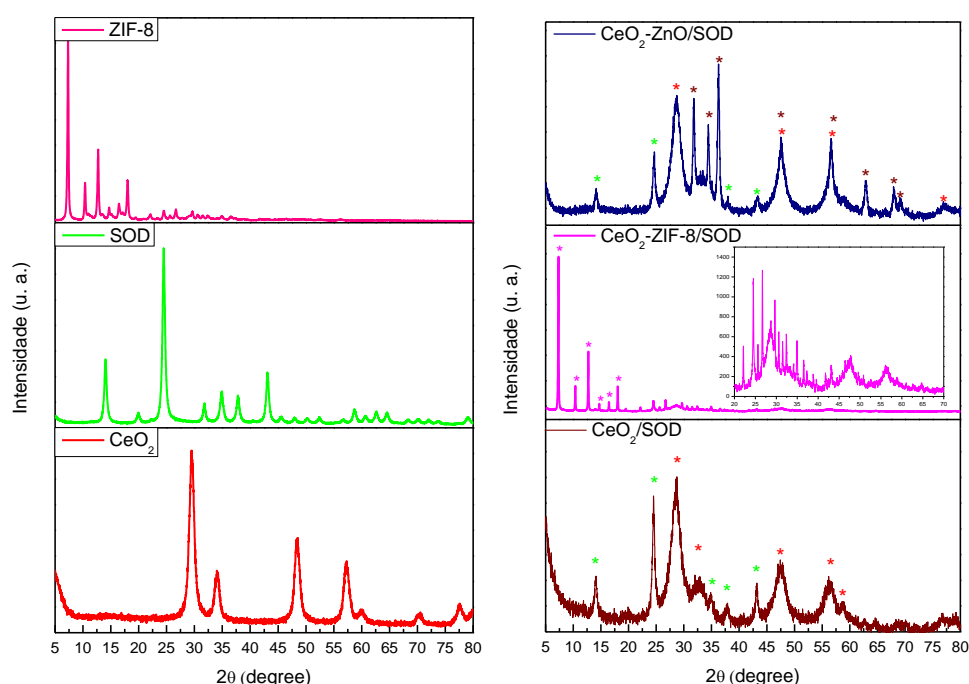


Figura 1 – Padrões de DRX para: (—) ZIF-8, (—) SOD, (—) CeO_2 (—) CeO_2/SOD , (—) $\text{CeO}_2\text{-ZIF-8/SOD}$, (—) $\text{CeO}_2\text{-ZnO/SOD}$. Os símbolos (*) CeO_2 , (*) SOD e (*) ZIF-8 e (*) ZnO são referentes as estruturas.

Todos os picos de difração do semicondutor CeO_2 estão localizados em valores 2θ de $29,47^\circ$; $34,00^\circ$; $48,39^\circ$; $57,38^\circ$; $60,02^\circ$; $70,4^\circ$; $77,5^\circ$ e $79,9^\circ$ associados aos planos cristalinos (111), (200), (220), (311), (222), (400), (331) e (420) que corresponde a uma estrutura cúbica do tipo fluorita Fm-3m (JCPDS n° 34 0394) (LAOUEDJ, 2018). Os padrões de DRX mostraram picos bem definidos dos materiais em questão demonstrando a boa formação dos materiais.

Os difratogramas mostram picos bem definidos, sugerindo a formação e o bom crescimento e cristalização das heteroestruturas CeO_2/SOD , $\text{CeO}_2\text{-ZIF-8/SOD}$ e $\text{CeO}_2\text{-ZnO/SOD}$. A heteroestrutura $\text{CeO}_2\text{-ZIF-8/SOD}$ apresentou pico bem intensos e bem definidos correspondendo a estrutura da ZIF-8 sendo necessário uma amplificação na região $20\text{-}70^\circ$ para observar os picos correspondentes ao CeO_2 e SOD. Após o processo de calcinação, a heteroestrutura $\text{CeO}_2\text{-ZnO/SOD}$ apresentou picos referentes a estrutura do ZnO em $31,7^\circ$, $34,4^\circ$, $36,2^\circ$, $47,5^\circ$ e 56° que correspondem as reflexões dos planos (100), (002), (101), (102), (110), respectivamente (FENG, 2020).

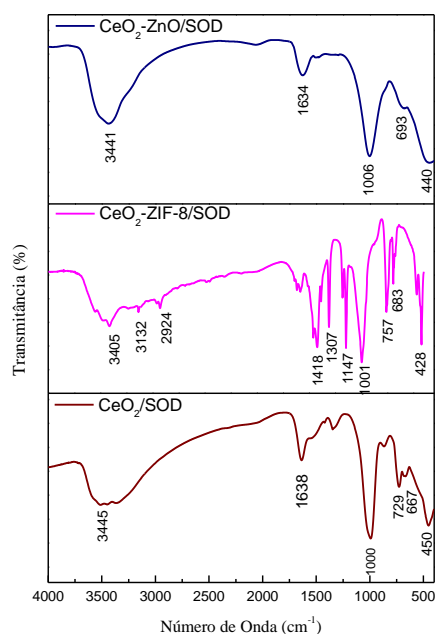


Figura 3 - Espectro de Infravermelho referente as heteroestruturas (—) CeO_2/SOD , (—) $\text{CeO}_2\text{-ZIF-8}/\text{SOD}$ e (—) $\text{CeO}_2\text{-ZnO}/\text{SOD}$.

A heteroestrutura CeO_2/SOD apresentou alongamentos do grupo silanol (Si-OH) em 3445 cm^{-1} que está relacionado a defeitos de conectividade comuns as zeólitas, enquanto que a banda 1638 cm^{-1} está atribuída a deformação angular da água e a banda em 1000 cm^{-1} estar atribuída ao alongamento assimétrico do tetraedro Si-O-Si e ao tetraedro Al-O-Al (SANTOS, 2023). Já o semicondutor CeO_2 exibiu uma banda de absorção em torno de 450 cm^{-1} que está atribuída a vibração de estiramento de Ce-O , em 1500 e 1345 cm^{-1} estão relacionados a vibração de reflexão da água associada a ligação O-H , o que indica a presença de água residual (SONAWANE, 2024).

Para a heteroestrutura $\text{CeO}_2\text{-ZIF-8}/\text{SOD}$, é possível observar bandas característica do ZIF-8 em 3132 cm^{-1} relacionado ao alongamento C-H dos anéis aromáticos imidazol e em 2924 cm^{-1} correspondente ao alongamento alifático C-H nos grupos metil. A banda em 1418 cm^{-1} corresponde a todo alongamento do anel, enquanto as bandas de 1001 cm^{-1} e 1147 cm^{-1} são atribuídas ao alongamento C-N no plano do anel imidazólico. O modo de curvatura no plano do anel imidazol e o modo de curvatura aromático de $\text{sp}^2\text{ C-H}$ são atribuídos as bandas em 1307 cm^{-1} e 757 cm^{-1} , respectivamente. Em 683 cm^{-1} é atribuído a curvatura fora do plano do anel do 2-metilimidazol. A banda em 428 cm^{-1} é referente ao alongamento M-N , o que sugere a coordenação entre o íon do metal e os ligantes orgânicos (CHANG, 2020; CHIN, 2018). Além disso, pode-se notar as bandas da ZIF-8 sobrepôs as bandas do semicondutor CeO_2 e da zeólita SOD.

Após o processo de calcinação, a heteroestrutura não apresenta as bandas referentes ao ZIF-8 devido a decomposição do ligante orgânico na estrutura. Assim, pode-se notar em 3441 cm^{-1} o alongamento do grupo silanol (Si-OH) que está relacionado a defeitos de conectividade comuns as zeólitas, a banda 1634 cm^{-1} que está atribuída a deformação angular da água e a banda em 1006 cm^{-1} que é atribuída ao alongamento assimétrico do tetraedro Si-O-Si e ao tetraedro Al-O-Al (SANTOS, 2023). O deslocamento nos comprimentos de onda das ligações da zeólita sodalita pode estar relacionado com a interação com o semicondutor ZnO formado

após o processo de calcinação. Além disso, em $500\text{-}440\text{ cm}^{-1}$ há a sobreposição de bandas referentes ao alongamento Zn-O e ao alongamento Ce-O) (SONAWANE, 2024).

Foi realizado a avaliação da capacidade fotoativa da heteroestrutura para da degradação do corante rodamina B. Assim, a Figura 4a mostra que após um período de 60 min no escuro as heteroestruturas CeO_2/SOD e $\text{CeO}_2\text{-ZnO}/\text{SOD}$ apresentaram a mesma porcentagem de adsorção em torno de 10%. Contudo, após serem ativadas pela luz UV, a heteroestrutura $\text{CeO}_2\text{-ZnO}/\text{SOD}$ apresentou uma maior eficiência de remoção do corante rodamina B. A fotodegradação da rodamina B utilizando a heteroestrutura $\text{CeO}_2\text{-ZnO}/\text{SOD}$ foi de 89% em relação a CeO_2/SOD , que seria a heteroestrutura inicial da síntese, onde é possível observada uma degradação de 35%. Diante disso, pode-se atribuir a maior parte da degradação ao $\text{CeO}_2\text{-ZnO}/\text{SOD}$ e mostrando que com a incorporação da ZIF-8 e posterior calcinação, o material apresentou uma maior disponibilidade de sítios ativos que melhorou seu desempenho fotocatalítico quando associado com um semicondutor (CeO_2) e a zeólita que também oferece sítios ativos. Além disso, pode notar o estudo da fotólise onde mostra que o contaminante na presença da radiação UV sem a presença do material teve uma degradação de 29% de corante em 90 minutos, podendo assim então atribuir 60% de degradação do corante ao material estudado.

Sabe-se que o processo de fotodegradação assistido por um semicondutor depende de vários parâmetros (LACHHEB *et al*, 2002), diante disso, foi realizado o estudo da concentração para a heteroestrutura (Figura 4b). O estudo foi feito considerando a concentração de 30 mg e 40 mg da heteroestrutura para 50 mL de rodamina B 10^{-5} mol/L. Pode-se notar que no processo de adsorção o material não apresentou propriedades adsorptivas após 60 min de ensaio. Além disso, o aumento da concentração de catalisador reduziu a eficiência fotocatalítica, isso pode ser justificado com a menor ativação do material. Diante disso, considerou-se que a concentração de 30 mg é mais satisfatória com remoção de 58% de rodamina B.

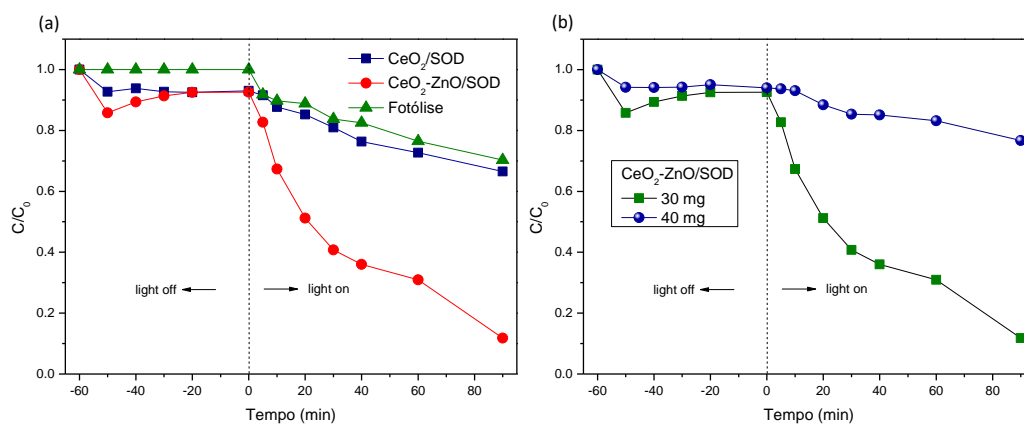


Figura 4 - (a) Comportamento fotocatalítico das heteroestruturas CeO_2/SOD e $\text{CeO}_2\text{-ZnO}/\text{SOD}$ para a degradação da Rodamina B e (b) estudo de concentração do $\text{CeO}_2\text{-ZnO}/\text{SOD}$.

O processo de fotocatalise ocorre por reações redox na superfície do catalisador que permite a formação de espécies reativas de oxigênio que atuam na degradação do

contaminante orgânico (KONSTANTINO, 2004). Então, buscando compreender melhor o mecanismo de fotocatalise da heteroestrutura CeO₂-ZnO/SOD foi realizado o teste de inibidores de radicais para analisar espécies ativas que atuam na degradação do corante rodamina B nas condições ótimas.

Ao adicionar no sistema os reagentes álcool isopropílico (ISO), álcool furfurílico (FUR) e EDTA houve alta inibição indicando que os radicais •OH, •O₂⁻ e h⁺ são as principais espécies ativas responsáveis pela quebra da molécula de rodamina B. Contudo, na presença de AgNO₃ observa-se uma pequena influencia na porcentagem de inibição, indicando que o radical elétron e⁻ apresentou uma menor influência no mecanismo de fotocatalise quando a heteroestrutura é irradiada sob luz UV.

Segundo FAUZI, 2022, o processo de degradação é viabilizado pelo radical •OH quando se é usado CeO₂ na qual os buracos de elétrons foto gerados são migrados para a superfície de CeO₂ e sofrem reações redox em resposta, e então algumas espécies reativas de oxigênio (ROS) são produzidas. Para o ZnO é relatado que o radical responsável pela foto degradação também é a hidroxila (•OH) resultantes de diversas reações redox, que são poderosos agentes oxidantes, atacam os poluentes adsorvidos na superfície do ZnO para produzir rapidamente compostos intermediários. Os intermediários eventualmente serão convertidos em compostos verdes, como CO₂, H₂O e ácidos minerais (FAUZI, 2022; ONG, 2018).

Conclusões

O estudo revela que a síntese da heteroestrutura CeO₂-ZnO/SOD foi eficaz, resultando em materiais com boa formação cristalina, mostrando que a coprecipitação in situ permitiu a incorporação bem-sucedida da estrutura do MOF na heteroestrutura CeO₂/SOD pré-formada, sendo evidenciada pelas análises de DRX e FTIR, além de propriedades fotocatalíticas promissora. Está demonstrou uma taxa de 89% de degradação do corante rodamina B, uma melhora significativa quando comparado com 35% para a heteroestrutura CeO₂/SOD. Este resultado destaca a eficácia do fotocatalisador, beneficiada pela interação e calcinação da ZIF-8, que proporcionaram um aumento nos sítios ativos e melhoraram a eficiência fotocatalítica.

A análise dos sequestradores de radicais indicou que as espécies ativas •OH, •O₂⁻ e h⁺ são as principais responsáveis pela fotodegradação do corante, enquanto que os elétrons têm menor impacto. Isso fornece insights valiosos sobre o mecanismo de fotocatalise. Em suma, a heteroestrutura CeO₂-ZnO/SOD apresenta um avanço significativo na capacidade de degradação de contaminantes, oferecendo uma solução promissora para aplicações em tratamento de água e remediação ambiental.

Agradecimentos

Agradeço a UFMA e as agências de fomento CAPES, CNPQ e FAPEMA.

Referências

- ABDEL-RAOUF, M. E.; EL-SHEIKH, S. M.; EL-TAWIL, A. S. Wastewater treatment methodologies: Review article. *International Journal of Environment & Agricultural Science*, v. 3, p. 12-25, 2019
- BAERLOCHER, C.; BAUR, W. H.; BENNETT, J. M.; GIES, H.; HIGGINS, J. B.; KIRCHNER, R.; MCCUSKER, L. B.; MEIER, W. M.; MORTIER, W. J.; NEWSAM, J. M. *Structure Commission of the International Zeolite Association. Zeolites*, v. 17, p. 1-230, 1996.

BRECK, D. W. Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use. John Wiley & Sons, New York, 1974.

CAO, L.; ZHU, X.; XIAO, Z.; LI, X. Modification of Semiconductor Photocatalysts for Enhanced Performance. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 397, p. 112320, 2020.

CHANG, C. W.; KAO, Y. H.; SHEN, P. H.; KANG, P. C.; WANG, C. Y. Nanoconfinement of metal oxide MgO and ZnO in zeolitic imidazolate framework ZIF-8 for CO₂ adsorption and regeneration. **Journal of Hazardous Materials**, v. 400, n. February, p. 122974, 2020.

CHIN, M.; CISNEROS, C.; ARAIZA, S. M.; VARGAS, K. M.; ISHIHARA, K. M.; TIAN, F. Rhodamine B degradation by nanosized zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8). **RSC Advances**, v. 8, n. 47, p. 26987-26997, 2018.

FALAMARZI, M.; AKBARZEDEH, E.; GHOLAMI, M. R. Zeolitic imidazolate framework-derived Ag/C/ZnO for rapid reduction of organic pollutant. **J. IRAN. CHEM. SOC.**, v. 16, p. 1105-1111, 2019.
Fauzi, A.A., Jalil, A.A., Hassan, N.S., Aziz, F.F.A., Azami, M.S., Hussain, I., Saravanan, R., & Vo, D.-V.N.. A critical review on relationship of CeO₂-based photocatalyst towards mechanistic degradation of organic pollutant. **Chemosphere**, 286(1), 131651. ISSN 0045-6535, 2022.

FENG, S. et al. One-pot synthesis of core-shell ZIF-8@ZnO porous nanospheres with improved ethanol gas sensing. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 31, p. 22534-22545, 2020.

HOFFMANN, M. R.; TODD, A. L.; CHENG, J. H.; MARTINEZ, C. M.; KISIEL, T. P.; WEHRMEISTER, M. A.; WILSON, D. L. Semiconductor Photocatalysis for Water Purification. **Journal of Catalysis**, v. 146, n. 2, p. 453-464, 1995.

KHAN, S. U.; KUMAR, S.; RAZA, A.; NIAZI, N. K. Mechanisms of Photocatalytic Reactions on Semiconductors. **Journal of Environmental Management**, v. 287, n. 1, p. 112-123, 2021.

KONSTANTINOU, I., K. ; TRIANTAFYLLOS, A. A. TiO₂-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution: kinetic and mechanistic investigations: A review. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 49, n. 1, p. 1-14, 2004.

LACHHEB, Hinda et al. Photocatalytic degradation of various types of dyes (Alizarin S, Crocein Orange G, Methyl Red, Congo Red, Methylene Blue) in water by UV-irradiated titania. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 39, n. 1, p. 75-90, 2002.

LAOUEJ, N.; ELAZIOUTI, A.; BENHADRIA, N.; BEKKA, A. CeO₂ nanoscale particles: Synthesis, characterization and photocatalytic activity under UVA light irradiation. **Journal of Rare Earths**, v. 36, n. 6, 2018.

LEE, J.; KIM, H.; PARK, J.; LEE, Y.; KIM, Y. H. Limitations of Photocatalysis: Challenges and Solutions. **Catalysis Science & Technology**, v. 9, n. 7, p. 1874- 1886, 2019.

LI, Z.; ZHANG, X.; WANG, H.; LIU, J.; SUN, X. Recent Developments in Photocatalytic Materials and Applications. **Advanced Materials**, v. 34, n. 15, p. 2103521, 2022.

ONG, Chin Boon; NG, Law Yong; MOHAMMAD, Abdul Wahab. A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: synthesis, mechanisms and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 536-551, 2018. ISSN 1364-0321, 2018.

SCHEJN, A.; BALAN, L.; FALK, V.; ARANDA, L.; MEDJAHDI, G.; SCHNEIDER, R. Controlling ZIF-8 nano- and microcrystal formation and reactivity through zinc salt variations. **CrystEngComm**, v. 16, n. 21, p. 4493- 4500, 2014.

SONAWANE, L. D.; ABHINAY, S. M. W.E; LAXMAN, N. B.; HUDA, I. A.; SWAPNIL, S. T.; YOGESH, B. A; ANIL, B. G; LATESH, K. N.; SARIKA, D. S.; GOTAN, H. J.; GANESH, E. P.; MAHENDRA, S. S. Sol-gel and hydrothermal synthesis of CeO₂ NPs: Their physiochemical properties and applications for gas sensor with photocatalytic activities. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 164, 2024.

WANG, T., Wang, Y., Sun, M., Hanif, A., Wu, H., Gu, Q., ... & Shang, J. Thermally treated zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) for visible light photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde. **Chemical science**, 11(26), 6670-6681 2020.

WEMERSON, D. C.; SANTOS, M.; TEIXEIRA, M. M.; CAMPOS, I. R.; DE LIMA, R. B.; MANTILLA, A.; OSAJIMA, J. A.; DE MENEZES, A. S.; MANZANI, D.; ROJAS, A.; ALCÂNTARA, A. C. S. Photocatalytic degradation of ciprofloxacin using semiconductor derived from heterostructured ZIF-8-based materials. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 359, 2023.

YUAN, X.; LI, Y.; LIU, Y.; ZHAO, X.; HU, Z. Photocatalytic Properties of ZIF-8 and Its Application in Environmental Remediation. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 5, n. 32, p. 16360-16367, 2017.

ZHANG, H.; LI, X.; YU, J.; WANG, J.; XIE, Y. Enhanced photocatalytic degradation of organic dyes using CeO₂/ZIF-8 composites. **Chemical Engineering Journal**, v. 438, p. 135567, 2022.

ZHANG, X.; LIU, W.; ZHANG, H.; LI, J.; ZHAO, X. Recent Advances in Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants. **Environmental Science & Technology**, v. 55, n. 4, p. 2001-2021, 2021.