

Fotodegradação de multipoluentes utilizando SBA-16/TiO₂ obtido por ancoragem *in situ*

Antony J. T. da Silva¹, Beatriz F. Paulino¹, Medly K. R. Morais^{1*}, Rayza B. de Lima², Gabriel e Silva Sales², Aline E. B. Lima³, Geraldo E. L. Júnior², Anne G. D. Santos¹

¹Laboratório de Catálise, Ambiente e Materiais, Universidade Estadual de Rio Grande do Norte (UERN), Mossoró-RN, 59.610-210, Brasil

²GrEEnTec, Universidade Estadual do Piauí-UESPI, Teresina-PI, 64018-030, Brasil.

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Araguatins-TO, 77.950-000, Brasil.

*E-mail: medlykailany47@gmail.com

Resumo/Abstract

RESUMO – A contaminação dos recursos hídricos por poluentes emergentes como o corante Rodamina B (RhB) e antibióticos como o ciprofloxacino (CIPRO) e metronidazol (MTZ) vêm aumentando. A fotocatalise heterogênea tem sido utilizada como alternativa, destacando o TiO₂ em suportes para elevar sua recuperação. Esse estudo objetiva produzir o material mesoporoso SBA-16 incorporado com TiO₂ pelo método de ancoragem *in situ* (ISA) para a fotodegradação de multipoluentes. Os resultados de DRX e MEV indicaram que a estrutura e morfologia do material foi mantida com a inserção do TiO₂. O EDS ilustrou boa distribuição das partículas de TiO₂. A adsorção e dessorção de N₂ mostrou que os poros não estão preenchidos por titânia, o que eleva a distribuição dos sítios ativos. Os testes fotocatalíticos comprovaram a eficiência do material incorporado com o titânio frente a degradação dos multipoluentes, com uma eficiência de 14% para o RhB, seguido de 6% para o CIPRO e 5% para o MTZ utilizando o fotocatalisador SBA-16/TiO₂ (25), que apresentou uma redução de 36 mg/L de TOC. O SBA-16 com titânia foi obtido com êxito pelo método ISA e apresentou uma significativa fotodegradação da RhB em multipoluentes.

Palavras chave: Processos oxidativos avançados, tratamento de água, ancoragem *in situ*, antibióticos, materiais mesoporosos.

ABSTRACT – The contamination of water resources by emerging pollutants such as Rhodamine B (RhB) and antibiotics such as ciprofloxacin (CIPRO) and metronidazole (MTZ) has been increasing. Heterogeneous photocatalysis has been used as an alternative, highlighting TiO₂ in supports to increase its recovery. This study aims to produce the mesoporous material SBA-16 incorporated with TiO₂ by the *in situ* anchoring (ISA) method for the photodegradation of multiple pollutants. The XRD and SEM results indicated that the structure and morphology of the material were maintained with the insertion of TiO₂. EDS illustrated a good distribution of TiO₂ particles. The adsorption and desorption of N₂ showed that the pores are not filled with titania, which increases the distribution of active sites. The photocatalytic tests confirmed the efficiency of the material incorporated with titanium against the degradation of multipollutants, with an efficiency of 14% for RhB, followed by 6% for CIPRO and 5% for MTZ using the SBA-16/TiO₂ photocatalyst (25), which presented a reduction of 36 mg/L of TOC. The SBA-16 with titania was successfully obtained by the ISA method and presented a significant photodegradation of RhB into multipollutants.

Keywords: Advanced oxidative processes, water treatment, *in situ* anchoring, antibiotics, mesoporous materials.

Introdução

A crescente presença de poluentes emergentes, como corantes industriais e antibióticos, tem levantado sérias preocupações ambientais e de saúde pública(1). Dentre esses, destacam-se a Rodamina B (RhB)(2), amplamente utilizada na indústria têxtil, e os antibióticos metronidazol (MTZ) e ciprofloxacino (CIPRO), ambos classificados como contaminantes emergentes devido à sua persistência no ambiente, toxicidade e potencial de promover resistência bacteriana (1). Esses compostos,

quando descartados inadequadamente, podem contaminar solos e corpos hídricos, afetando ecossistemas aquáticos e colocando em risco a saúde humana (1,2).

Neste cenário, a fotocatalise heterogênea tem ganhado destaque como uma técnica promissora para o tratamento de efluentes, sendo o dióxido de titânio (TiO₂) um dos semicondutores mais utilizados, devido à sua alta estabilidade química, boa atividade fotocatalítica, baixo custo e baixa toxicidade (3,4). O TiO₂ apresenta-se em três formas cristalinas, com a fase anatase sendo a mais

fotoativa. Contudo, sua aplicação direta é limitada por fatores como aglomeração das partículas e a difícil recuperação das partículas após o uso(3).

Para superar essas limitações, pesquisadores vêm investigando o uso de materiais mesoporosos como suportes para o TiO_2 . Entre esses, o SBA-16 se destaca por sua estrutura tridimensional cúbica, elevada área superficial e grande volume de poros, características que favorecem a dispersão dos sítios ativos e a difusão de poluentes até as regiões reativas. A incorporação do TiO_2 no SBA-16 por meio do método de ancoragem *in situ* (ISA) (5) tem se mostrado eficaz para garantir uma distribuição homogênea do semiconductor na matriz mesoporosa, como os trabalhos utilizando SBA-15/ TiO_2 (6) e KIT-6/ TiO_2 (4).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo a preparação de materiais mesoporosos SBA-16 padrão e modificados com TiO_2 utilizando o método ISA, visando a fotodegradação simultânea de poluentes orgânicos, como o corante RhB e os antibióticos MTZ e CIPRO simulando uma condição real. A proposta visa contribuir para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis no tratamento de águas contaminadas por compostos emergentes.

Experimental

Síntese do SBA-16.

O SBA-16 padrão foi sintetizado seguindo a metodologia proposta por Zhao e colaboradores (1998)(7), utilizando a seguinte composição molar para o gel de síntese: 1,0 TEOS; 0,0035 F_{127} ; 1,78 BuOH; 0,88 HCl; 119 H_2O .

Inicialmente, o direcionador orgânico F_{127} foi dissolvido em água destilada e HCl sob agitação a uma temperatura de 45 °C por 15 minutos. Em seguida, o BuOH foi adicionado gota a gota, mantendo a agitação e a mesma temperatura por mais 1 hora. Posteriormente, adicionou-se a fonte de silício (TEOS), também gota a gota, e a mistura permaneceu sob agitação 45 °C por 24 h. O gel formado foi transferido para uma autoclave e submetido ao tratamento hidrotérmico na estufa a temperatura de 100 °C por 24 h em condições estáticas. Após o tratamento, o material foi resfriado até a temperatura ambiente, separado por filtração e lavado com uma solução de etanol e HCl 2% para a remoção parcial do direcionador orgânico. O sólido obtido foi então colocado no dessecador por 3 dias. Finalmente, o material foi calcinado a 550 °C por 6 h, com uma rampa de aquecimento de 1 °C/min, para a remoção completa do direcionador orgânico residual.

A incorporação de TiO_2 foi realizada durante a síntese do SBA-16, de forma semelhante à metodologia utilizada para o material padrão. A modificação ocorreu logo após a adição do BuOH, etapa em que a mistura foi mantida sob agitação por 1 h. Em seguida, foi adicionado à solução coloidal de TiO_2 em razões molares de Si/Ti de 25,

50 e 75 com agitação mantida por mais 2 h. Por fim, adicionou-se o TEOS seguindo o procedimento descrito anteriormente.

Caracterizações.

O difratograma de raios-X (DRX) foi realizado em um equipamento Bruker D2Phaser com radiação de cobre ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda=1,54\text{\AA}$) com um filtro de Ni. Os dados coletados a baixo ângulo na faixa de 2θ de 0,5 a 3° e a alto ângulo na faixa de 2θ de 10 a 80 ° passo de 0,02°/s. A técnica de adsorção e dessorção de nitrogênio a 77 K foi no equipamento da MICROMERITICS modelo ASAP 2020. As amostras serão desgasificadas a vácuo a 300 °C durante 10 h. A análise Termogravimetria (TG) e a Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC), foram realizadas de forma simultânea no equipamento TG-DSC Netzsch, modelo STA 449 F3, submetida a uma rampa de aquecimento de 10 °C. min^{-1} , na faixa de temperatura de 30 °C a 900 °C em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 60 $\text{mL}/\text{min}^{-1}$. Para a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) foi utilizada o microscópio modelo MIRA 3 FERG da Shimadzu. As amostras foram primeiramente dispersas em acetona, em seguida suportadas em fita de carbono e coberta com uma fina camada de ouro. A investigação das propriedades ópticas foi realizada utilizando o espectrofotômetro da Shimadzu modelo UV-2600, na faixa de 200 a 800 nm. A energia de *band gap* óptica (Eg) foi estimada pelo método Kubelka-Munk, assumindo transição óptica indireta de acordo com a equação:

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde F (R) é a reflectância transformada e R é reflectância (%).

Testes fotocatalíticos

A atividade fotocatalítica dos materiais foi avaliada em uma solução aquosa contendo múltiplos poluentes, RhB, CIPRO e MTZ, sob irradiação de luz UV. Para isso, 50 mg do fotocatalisador foram adicionados a 50 mL da solução dos multipoluentes ($1,0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$). Em seguida, a mistura foi mantida sob agitação no escuro por 30 min, com o objetivo de alcançar o equilíbrio de adsorção/dessorção. Durante a irradiação, alíquotas foram coletadas em intervalos de tempo determinados, até um total de 150 min. As amostras foram centrifugadas e analisadas em um espectrofotômetro UV-Vis (Shimadzu, modelo UV-2600, de duplo feixe). As absorbâncias foram medidas em 526 nm

para o RhB, 275 nm para o CIPRO e 320 nm para o MTZ. A eficiência fotocatalítica (η) foi calculada de acordo com a Equação 2:

$$\eta (\%) = (1 - C_n / C_0) \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde C_0 é a concentração inicial do corante e C_n é a concentração do corante durante a irradiação em um determinado tempo "n".

A análise de Carbono Orgânico Total (TOC). Analisador de TOC/TOC-L series. Modelo TOC-L CSH, utilizando o método de análise: NPOC (carbono orgânico não-purgavel).

Resultados e Discussão

Difração de Raios-X (DRX)

Os difratogramas na Figura 1 (a e b) apresentaram reflexões em 2θ atribuídos aos planos de difração (110), pico característico do material SBA-16, típico de uma estrutura cúbica de corpo centrado(7) indicando que os materiais com TiO_2 possuem uma organização de poros bem ordenados e foram obtidos com êxito. Além disso, o aumento da concentração de titânia não danificou a estrutura dos suportes.

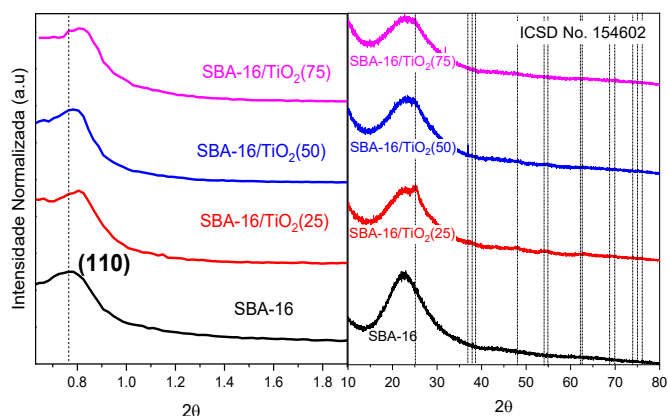


Figura 1: Difratogramas de raio-X do SBA-16 puro e com TiO_2 a) baixo ângulo e b) alto ângulo.

Nas amostras incorporadas, observa-se um pequeno deslocamento para a direita do pico correspondente ao plano (110), sugerindo uma diminuição no valor do parâmetro de rede. O material SBA-16 apresenta uma distância interplanar de 11,55 nm, enquanto os materiais contendo TiO_2 nas razões de 25 e 75 apresentam valor de 10,97 nm. Para a razão de 50, a distância interplanar é de 11,25 nm. Da mesma forma, observa-se uma redução no parâmetro da célula unitária com a incorporação do titânio: o SBA-16 padrão apresenta valor de 16,33 nm, enquanto os materiais com TiO_2 nas razões de 25 e 75 mostram valor de 15,51 nm, e na razão de 50, o parâmetro é de 15,90 nm. Comportamento semelhante foi observado em estudo anterior envolvendo a incorporação de TiO_2 no mesmo suporte(8). A fase amorfa a alto ângulo é referente a sílica e os picos secundários, como em $2\theta = 25^\circ$ mais evidente na razão molar de 25, indicam que o TiO_2 pode estar na forma

anatase de acordo com a carta cristalográfica ICSD No. 154602, bem com uma pequena quantidade de agregados na estão forma octaédrica (5,9,10).

Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)

Os materiais sintetizados passaram por análise de composição elementar para verificar as reais concentrações de titânio em relação as quantidades teóricas. Os valores determinados pelo ICP-OES foram próximos dos teóricos, sendo: razão molar $\text{Si/Ti} = 25$ (17,76), $\text{Si/Ti} = 50$ (40,40) e $\text{Si/Ti} = 75$ (52,78). Esses resultados sugerem que a síntese foi eficiente para a incorporação dos nanocristais de TiO_2 no suporte SBA-16.

Adsorção e Dessorção de Nitrogênio (N_2)

A Figura 3 apresenta isotermas do tipo IV com histerese do tipo H2 característico de materiais com mesoporos com estruturas semelhantes a gaiolas interconectados por aberturas relativamente estreitas, confirmando a incorporação do TiO_2 no suporte (8). A área superficial específica aumentou com a incorporação de TiO_2 nas razões de 25 ($494 \text{ m}^2/\text{g}$) e 50 ($513 \text{ m}^2/\text{g}$), em comparação com o SBA-16 ($481 \text{ m}^2/\text{g}$), indicando que o TiO_2 não se encontra na superfície externa do material. No entanto, para a razão 75, observou-se uma redução da área superficial para $451 \text{ m}^2/\text{g}$, valor inferior ao do SBA-16, indicando possível obstrução parcial dos poros. O volume total dos poros diminuiu de $0,39 \text{ m}^3/\text{g}$ do SBA-16 para até $0,29 \text{ m}^3/\text{g}$ com a presença de TiO_2 , indicando a incorporação na parte interna do suporte(8). Já o aumento no volume de microporos $0,02 \text{ m}^3/\text{g}$ do SBA-16 para até $0,08 \text{ m}^3/\text{g}$ sugerindo que os nanocristais de TiO_2 encontram-se dispersos, sem aglomeração significativa dentro dos poros.

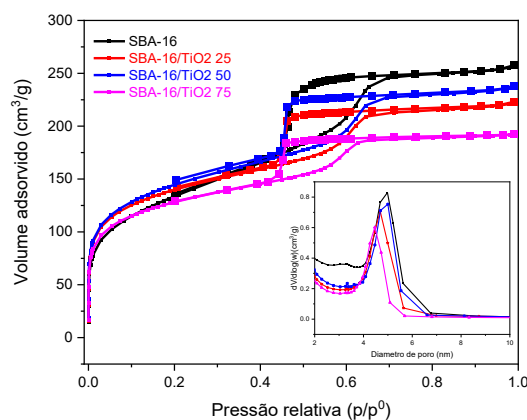


Figura 2. Isoterma de adsorção/dessorção de N_2 e distribuição do diâmetro de poros do SBA-16 puro e com TiO_2 .

Análise Termogravimétrica

É possível observar 3 eventos de perda de massas para todas as amostras na Figura 3. O primeiro evento de perda de massa na faixa de temperatura de 30 a 130°C ,

referente à saída de água fisissorvida. Já o segundo e terceiro evento, na faixa de 136 a 900 °C, são atribuídos à liberação de água quimissorvida, associada ao processo de desidroxilação da estrutura do SBA-16, característica típica de materiais silicatos porosos (11).

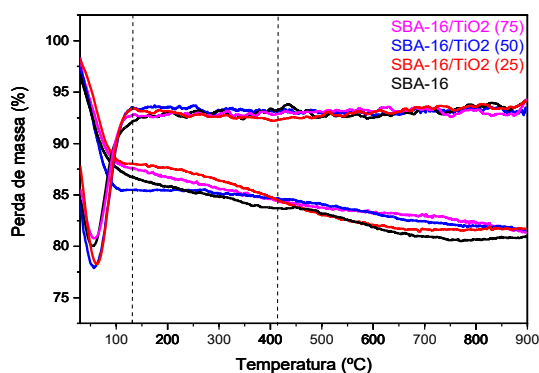


Figura 3. Curvas de TG/DTG do SBA-16 puro e com TiO₂.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

As morfologias dos materiais são apresentadas na Figura 4. O SBA-16 é mostrado na figura 4 (a) e a figura 4 (b) apresenta a micrografia do SBA-16/TiO₂ na razão Si/Ti = 50. É possível notar que a inserção de titânia não modificou a morfologia típica para o SBA-16, evidenciando a presença de partículas compactadas apresentando formas e tamanhos irregulares além de uma superfície rugosa, tais características são encontradas na literatura referente à estrutura característica do SBA-16(8).

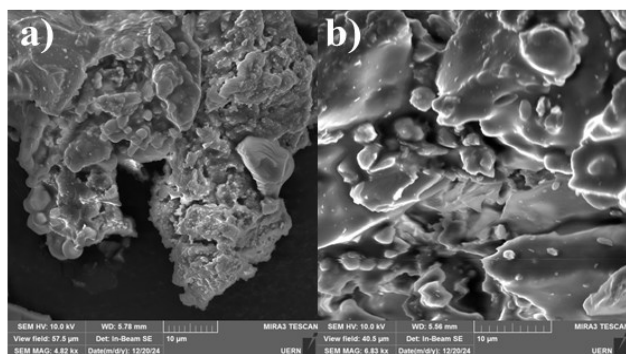


Figura 4. Imagens de MEV para a amostra: a) SBA-16 e b) SBA-16/TiO₂ (50).

A Figura 5 apresenta imagens representativas de EDS para o material SBA-16/TiO₂ na razão Si/Ti = 50. Na imagem (a), observa-se que o material é predominantemente constituído por silício, seguido por oxigênio e titânio, em concordância com as proporções elementares obtidas por meio da análise de ICP-OES. As imagens (b) e (c) mostram isoladamente como está distribuído o titânio e a sílica respectivamente, na estrutura do material, em que é possível observar a boa distribuição do titânio no material suporte,

não sendo evidenciado a presença de aglomerados, indicando que a metodologia ISA foi eficiente para dispersão dos nanocristais.

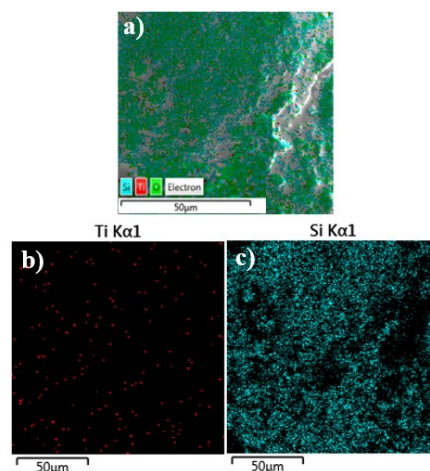


Figura 5. Imagens de EDS para a amostra SBA-16/TiO₂ (50).

Os catalisadores sintetizados apresentaram valores de E_g ente 3,2 a 3,4 eV, indicando sua eficiência na absorção de fótons na região do espectro correspondente à luz ultravioleta. Esse comportamento pode estar relacionado à interação entre as nanopartículas de titânio e a parede de sílica, que pode resultar em uma interface TiO₂/SiO₂ não cristalina. Essa não cristalinidade, por sua vez, pode contribuir para o aumento do valor de E_g (4,5).

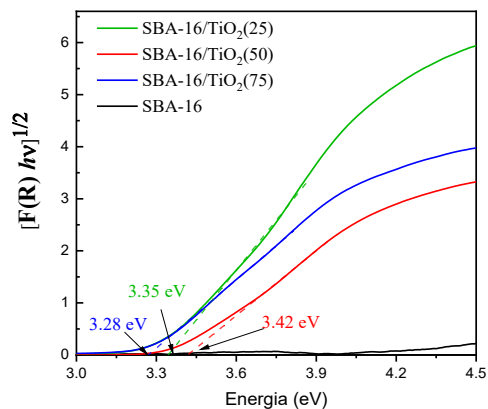


Figura 6. Gap de Energia (E_g) dos catalisadores TiO₂, SBA-16 puro e incorporado com TiO₂.

Testes Fotocatalíticos

As curvas de decaimento relativo da concentração do corante RhB em função do tempo de irradiação são apresentadas na Figura 7. Na ausência de luz, observou-se uma elevada porcentagem de adsorção do corante, comportamento esperado devido à natureza catiônica do RhB, que favorece sua interação com a estrutura mesoporosa da peneira molecular SBA-16 (12), com cerca de 37% ao final da reação. O catalisador SBA-16/TiO₂ (25) apresentou ao longo da adsorção cerca de 22% de adsorção.

E quando irradiado, a eficiência fotocatalítica alcançou cerca de 14%, resultado atribuído à maior dispersão dos sítios ativos. O catalisador SBA-16/TiO₂ (50) exibiu adsorção de maior que a razão de Si/Ti 25, com 27%; no entanto, ao longo do processo de fotodegradação, seu desempenho foi de aproximadamente 4%. O fotocatalisador SBA-16/TiO₂ (75) apresentou adsorção de 6% e fotodegradação também aproximadamente 6%, indicando uma melhor dispersão dos sítios ativos comparada a razão Si/Ti 50, podendo está relacionado com a recombinação de pares e⁻/h⁺, e a superfície pode estar mais ocupada pelos outros fármacos, como o MTZ (6). O TiO₂ puro apresentou eficiência de 9%, o que é esperado diante dos materiais suportados, considerando sua maior concentração mássica de catalisador disponível na suspensão. Como a peneira molecular SBA-16 não possui atividade fotocatalítica, sua contribuição limita-se à adsorção.

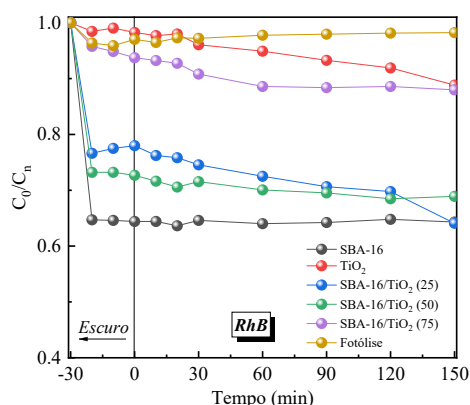


Figura 7. Curva de decaimento relativo da concentração do corante RhB no decorrer do tempo, C_n/C_0 na ausência de fotocatalisador e para as amostras utilizando SBA-16 padrão e incorporadas com titânia.

A Figura 8 apresenta as curvas de decaimento relativo da concentração do Ciprofloxacino ao longo do tempo de irradiação. Em escuro, os catalisadores SBA-16/TiO₂ (25), SBA-16/TiO₂ (50) e SBA-16/TiO₂ (75) apresentaram valores de adsorção de 17%, 21% e 17%, respectivamente. Na presença de radiação, as eficiências foram 6% para o SBA-16/TiO₂ (25), 4% para o SBA-16/TiO₂ (50) e 1% para o material SBA-16/TiO₂ (75). Esses valores refletem a maior resistência a fotodegradação do Ciprofloxacino, bem como indicam novamente a razão molar Si/Ti = 25 como a mais eficiente para a fotodegradação, possivelmente devido a maior quantidade e dispersão de Ti, que favoreceu uma melhor sinergia pela interface Si-O-Ti (13). O TiO₂ puro apresentou eficiência de cerca de 5%, novamente relacionado a maior quantidade mássica no meio reacional.

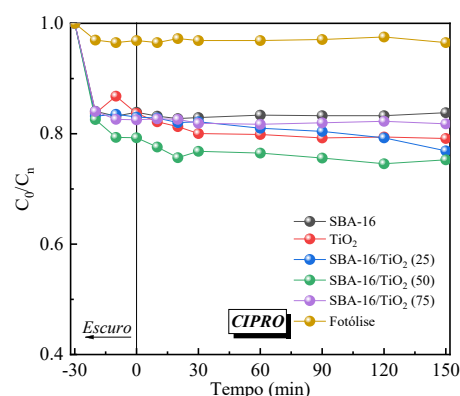


Figura 8. Curva de decaimento relativo da concentração do antibiótico CIPRO no decorrer do tempo, C_n/C_0 na ausência de fotocatalisador e para as amostras utilizando SBA-16 padrão e incorporadas com titânia.

As curvas de decaimento relativo da concentração do antibiótico MTZ em função do tempo de irradiação são apresentadas na Figura 9, no qual esse poluente se mostrou mais resistente à fotodegradação. Todos os fotocatalisadores apresentaram valores semelhantes de adsorção, com cerca de 2%, com exceção a razão Si/Ti 75, com cerca de 3%. O maior desempenho fotocatalítico foi observado para o SBA-16/TiO₂ (50) e (25), com aproximadamente 5% de degradação. A baixa atividade pode estar associada à estrutura da molécula, que contém um anel imidazólico ligado a um grupo nitro, tornando-a menos suscetível ao ataque de espécies reativas geradas no processo fotocatalítico (14). Além disso, a competição com compostos mais facilmente oxidáveis, como o corante RhB e o antibiótico CIPRO, pode ter contribuído para sua baixa degradação. Outro fator limitante é a reduzida afinidade do MTZ por suportes mesoporosos, o que resulta em baixa concentração do poluente na interface catalítica, desfavorecendo a fotodegradação (8,14).

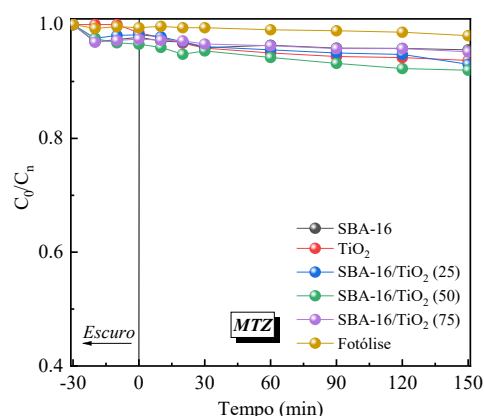


Figura 9. Curva de decaimento relativo da concentração do antibiótico MTZ no decorrer do tempo, C_n/C_0 na ausência de fotocatalisador e para as amostras utilizando SBA-16 padrão e incorporadas com titânia.

A Fig. 10 apresenta a eficiência de fotodegradação em 150 min para os três poluentes. Os dados indicam que o fotocatalisador SBA-16/TiO₂ (25) apresentou a melhor atividade fotocatalítica, em concordância com os resultados de carbono orgânico total mostrados na Figura 11.

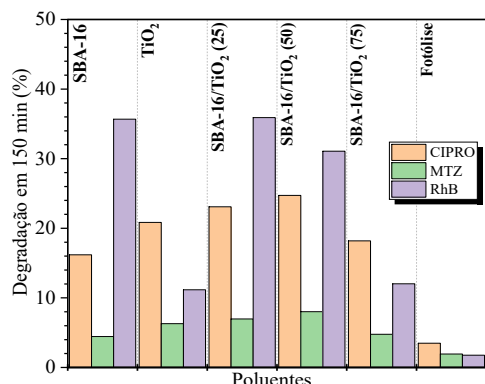


Figura 10. Relação dos catalisadores na degradação dos poluentes.

A Figura 11 apresenta os valores de TOC. A maior contribuição de Carbono é da RhB, e visto que o a razão molar Si/Ti = 50 adsorveu mais o corante, resultou na remoção de 56 mg/L da mistura de poluentes, valor decorrente da soma dos efeitos de adsorção e fotodegradação. Em seguida, a razão molar Si/Ti = 25, com melhor eficiência catalítica dos poluentes, apresentou TOC de cerca de 36 mg/L dos poluentes.

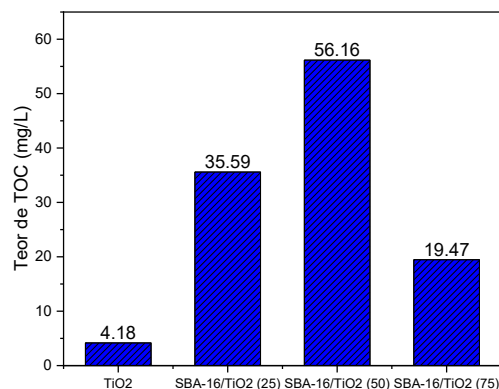


Figura 11. Teor de carbono orgânico total para os testes realizados com SBA-16 padrão e incorporado com TiO₂.

Conclusões

A síntese do material mesoporoso SBA-16 modificado com TiO₂ pelo método de ancoragem *in situ* (ISA) foi realizada com sucesso. A incorporação do TiO₂ manteve a estrutura do suporte, conforme os resultados de DRX. A análise de adsorção e dessorção de N₂ indicaram a obtenção de materiais mesoporosos, bem como a presença de titânia incorporada. A análise termogravimétrica evidenciou a estabilidade térmica dos materiais obtidos. Os resultados de MEV/EDS mostram que a inserção dos

nanocristais de TiO₂ não modificaram a morfologia típica do SBA-16 e as partículas não se encontram aglomeradas no suporte, estando bem distribuídas. Os testes fotocatalíticos demonstraram maior atividade para o fotocatalisador SBA-16/TiO₂ (50) na degradação de multipoluentes, corroborando os resultados de TOC, que indicaram uma redução de aproximadamente 56 mg/L no teor de carbono orgânico total. A degradação de sistemas multicomponentes representa uma simulação real de amostras ambientais, nas quais diferentes poluentes podem exercer efeitos competitivos e influenciar a eficiência do fotocatalisador.

Agradecimentos

A CAPES, ao CNPQ, a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, ao Laboratório de Análises Magnéticas e Ópticas (LAMOP) da UERN, ao Laboratório de Peneiras Moleculares (LABPEMOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, ao Grupo de Estudos em Energias Renováveis e Tecnologias em Catálise (GrEEnTeC) da Universidade Estadual do Piauí e ao IC2MP – França.

Referências

1. A. E. Gahrouei, S. Vakili, A. Zandifar, and S. Pourebrahimi, *Environ Res* **2024**, 252, 119029
2. B. S. Rathi, P. S. Kumar, and D.-V. N. Vo, *Science of The Total Environment* **2021**, 797, 149134
3. G. Liao, Y. Zhong, and T. Zhang, *J Environ Chem Eng* **2024**, 12,(5), 113346
4. L. G. Ribeiro *et al.*, *Environmental Science and Pollution Research* **2025**, 32,(7), 4150–4163
5. M. M. Araújo *et al.*, *Appl Surf Sci* **2016**, 389, 1137–1147
6. G. S. Sales *et al.*, *J Environ Chem Eng* **2023**, 11,(5), 110335
7. D. Zhao, Q. Huo, J. Feng, B. F. Chmelka, and G. D. Stucky, *J Am Chem Soc* **1998**, 120,(24), 6024–6036
8. C. Vanichvattanadecha *et al.*, *Journal of Porous Materials* **2021**, 28,(4), 1137–1153
9. Thi Hanh Truong, Duc Cuong Vu, and PGS. Phạm Xuân Núi - ĐH Mô địa chất, *Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption* **2024**, 13,(3), 36–41
10. G. EIMER, S. CASUSCELLI, G. GHIONE, M. CRIVELLO, and E. HERRERO, *Appl Catal A Gen* **2006**, 298, 232–242
11. Z. Ezzeddine, I. Batonneau-Gener, and Y. Pouilloux, *Toxics* **2023**, 11,(3), 205
12. S. S. El-Shafey, S. A. Sayed Ahmed, R. M. Aboelenin, and N. A. Fathy, *Desalination Water Treat* **2024**, 317, 100179
13. Z. Liang *et al.*, *Surfaces and Interfaces* **2024**, 51, 104715
14. M. El Bouraie and S. Ibrahim, *Int J Nanomedicine* **2020**, Volume 15, 7117–7141