



PROPOSTA DE UM FOTORREATOR DE BAIXO CUSTO PARA ENSAIOS DE DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DE POLUENTES ORGÂNICOS PERSISTENTES

Anne K. G. Pestana¹; Gabriel S. e Sales³; Iara de. S. Costa¹; Rhuan. C. Oliveira¹; Márcio A. P. Almeida²; Aline A. C. França^{1*}

¹Universidade Estadual do Maranhão, (DQM/CECEN), São Luís – MA, Brasil, CEP: 65055-310.

²Universidade Federal do Maranhão, (DEFIS/CCET), ^{2*}Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia (CCET), São Luís – MA, Brasil, CEP: 65080-805

³PPGQ-Departamento de Química Universidade Federal do Piauí, Federal -UFPI, 64049-550 Teresina, PI, Brasil

anne.pestana24@gmail.com

Palavras-Chave: Rodamina B, Fotocatálise heterogênea, Dióxido de Titânio.

Introdução

O crescimento populacional, aliado à expansão das atividades industriais e agrícolas, tem intensificado significativamente a demanda por recursos naturais, especialmente pelos recursos hídricos. A água desempenha papel essencial em diversos processos produtivos e, conseqüentemente, o aumento de sua utilização resulta também na geração de grandes volumes de efluentes contendo substâncias potencialmente contaminantes. Esse cenário tem contribuído para a deterioração da qualidade ambiental, tornando a poluição dos corpos hídricos um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável (Patrício; Boas; Galdino, 2021).

Entre os contaminantes de maior preocupação destacam-se os chamados poluentes emergentes, grupo que engloba fármacos, antibióticos, pesticidas, herbicidas, aditivos industriais, produtos de higiene pessoal, corantes e diversos compostos orgânicos sintéticos. Essas substâncias apresentam elevada estabilidade química, persistência ambiental e potencial tóxico para organismos aquáticos e seres humanos. Além disso, muitos desses compostos não são completamente removidos pelos sistemas convencionais de tratamento, favorecendo sua dispersão nos ecossistemas e aumentando os riscos de contaminação das águas superficiais e subterrâneas (Costa *et al.*, 2024).

Nesse contexto, torna-se indispensável aperfeiçoar as estratégias de gestão e tratamento de efluentes, buscando tecnologias que conciliem eficiência, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental. A gestão adequada dos recursos hídricos deve contemplar não apenas a redução da geração de efluentes, mas também a adoção de processos capazes de minimizar os impactos do lançamento de águas residuais nos corpos receptores, considerando aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais (Cavalcanti; Faustino, 2020).

Os processos biológicos continuam sendo amplamente empregados no tratamento de águas residuárias devido ao baixo custo operacional e à capacidade de tratar grandes volumes.



Entretanto, apresentam limitações na remoção de compostos orgânicos persistentes, cuja elevada estabilidade química dificulta sua biodegradação. Alterações na estrutura molecular dos contaminantes ou nas condições do meio podem comprometer a atividade microbiana, reduzindo a eficiência do tratamento. Em muitos casos, ocorre apenas a degradação parcial das moléculas, formando produtos intermediários potencialmente mais tóxicos que o composto original (Ramos *et al.*, 2020).

Entre os efluentes industriais de maior preocupação destacam-se aqueles com elevada coloração, decorrente principalmente da presença de corantes e compostos cromóforos. Além do impacto visual, a coloração reduz a penetração da luz solar na água, comprometendo a fotossíntese de algas e macrófitas aquáticas. Como consequência, ocorre diminuição da produção primária, redução da concentração de oxigênio dissolvido e desequilíbrio da biota aquática, afetando diretamente a qualidade ambiental dos corpos hídricos (Moura *et al.*, 2024).

Do ponto de vista tecnológico, a remoção desses compostos representa um dos maiores desafios para os tratamentos convencionais. Muitos corantes apresentam estruturas aromáticas complexas e elevada resistência à degradação biológica. Além disso, sua degradação incompleta pode gerar subprodutos ainda mais persistentes ou tóxicos, evidenciando a necessidade de processos capazes de promover sua completa mineralização (Silva *et al.*, 2021). Nesse cenário, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm recebido crescente destaque devido à elevada eficiência na degradação de contaminantes orgânicos recalcitrantes. Entre essas tecnologias, a fotocatalise heterogênea destaca-se por combinar elevada eficiência de degradação, baixo consumo de reagentes, reduzida geração de resíduos secundários e possibilidade de utilização de fontes renováveis de energia, como a radiação solar.

A fotocatalise heterogênea utiliza materiais semicondutores fotoativos, como o dióxido de titânio (TiO_2), capazes de absorver radiação com energia igual ou superior ao seu band gap. Sob irradiação, ocorre a excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução, formando pares elétron-lacuna que migram para a superfície do catalisador. Essas cargas reagem com moléculas de água e oxigênio adsorvidas, produzindo espécies reativas de oxigênio, principalmente radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$) e superóxido ($\text{O}_2\cdot^-$), responsáveis pela degradação oxidativa de uma ampla variedade de poluentes orgânicos até sua mineralização (Nogueira; Jardim, 1997; Cervantes; Zaia; Santana, 2009; Lopes *et al.*, 2015).

Em razão dessas características, a fotocatalise heterogênea vem sendo amplamente investigada como alternativa para o tratamento de águas residuais contendo corantes, pesticidas, fármacos e outros poluentes emergentes, demonstrando elevado potencial para superar as limitações dos métodos convencionais e contribuir para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis (Morais *et al.*, 2006).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema fotoquímico de baixo custo, prático e de fácil operação para aplicação em processos fotocatalíticos de degradação de poluentes orgânicos em meio aquoso. Espera-se que o reator desenvolvido contribua para ampliar estudos envolvendo fotocatalise e o tratamento de efluentes contendo poluentes emergentes, favorecendo o desenvolvimento de tecnologias



voltadas à mitigação da contaminação ambiental e à preservação da qualidade dos recursos hídricos.

Material e Métodos

Inicialmente, foi realizado um levantamento dos componentes necessários à construção do sistema fotoquímico, priorizando materiais que apresentassem elevada eficiência operacional, facilidade de aquisição e baixo custo. Com base nessa seleção, foi desenvolvido um protótipo estrutural do reator, permitindo definir a disposição dos componentes internos, os pontos de conexão e as dimensões mais adequadas do equipamento, considerando critérios de estabilidade, funcionalidade e segurança para experimentos em bancada.

A estrutura do reator foi confeccionada em placas de madeira do tipo *medium density fiberboard* (MDF), com espessura de 25 mm, material escolhido devido à sua resistência mecânica, facilidade de usinagem e baixo custo. Além de conferir robustez ao equipamento, o MDF proporciona adequado isolamento da radiação emitida durante os ensaios fotocatalíticos.

O sistema foi projetado para operar com controle de temperatura, condição necessária para garantir a reprodutibilidade dos experimentos. Em substituição ao banho ultratermostatizado convencional, foi desenvolvido um sistema alternativo de baixo custo constituído por uma caixa de isopor utilizada como reservatório térmico, acoplada a uma bomba submersa de aquário para promover a circulação contínua da água. A temperatura foi mantida em aproximadamente 25 °C por meio da adição manual de água fria ou gelo, sendo monitorada continuamente com termômetro convencional.

Como material fotocatalítico utilizado foi o dióxido de titânio (TiO_2), em razão de sua elevada estabilidade química, baixo custo e reconhecida atividade fotocatalítica. Além da amostra comercial P25 (Degussa), empregou-se o material $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$, obtido pela dispersão do semicondutor sobre peneira molecular mesoporosa SBA-15. Esse suporte apresenta elevada área superficial, estrutura ordenada e boa estabilidade térmica, características que favorecem maior dispersão do TiO_2 e podem aumentar a eficiência fotocatalítica.

A atividade fotocatalítica dos materiais foi avaliada por meio da degradação da Rodamina B (RhB), utilizada como molécula modelo. Para cada ensaio, aproximadamente 30 mg do fotocatalisador foram dispersos em 100 mL de solução aquosa de RhB (10 mg L^{-5}), mantendo-se o sistema sob agitação constante a 25 °C. Inicialmente, a suspensão permaneceu em ausência de luz durante 30 min para atingir o equilíbrio de adsorção/dessorção. Em seguida, a solução foi irradiada com luz UV-Vis por 120 min.

Durante os ensaios, alíquotas de 4,0 mL foram coletadas em intervalos predeterminados, centrifugadas por 5 min a 3500 rpm para remoção do catalisador e o sobrenadante analisado em espectrofotômetro UV-Vis de duplo feixe (Shimadzu UV-2600). As concentrações de RhB foram determinadas a partir das medidas de absorbância, utilizando água destilada como referência e aplicando a Lei de Lambert-Beer. Como controle experimental, também foi realizado o ensaio de fotólise da solução de RhB na ausência do fotocatalisador, permitindo avaliar a contribuição exclusiva da radiação UV para a degradação do corante.



Resultados e Discussão

Montagem do sistema catalítico

Após a realização de um levantamento criterioso dos componentes essenciais ao desenvolvimento do sistema, priorizando aqueles que atendessem simultaneamente aos critérios de maior eficiência operacional e viabilidade econômica, procedeu-se à montagem de um protótipo estrutural. Essa etapa foi fundamental para a materialização do projeto em escala preliminar, permitindo a visualização prática da disposição interna dos elementos do reator fotocatalítico, bem como a análise da organização espacial dos componentes e pontos de conexão. Além disso, o protótipo possibilitou a definição mais precisa das dimensões ideais do equipamento, considerando aspectos como estabilidade estrutural, segurança e funcionalidade.

A Figura 1 apresenta o reator fotoquímico após sua montagem. A estrutura foi confeccionada em placas de *medium density fiberboard* (MDF), com espessura de 25 mm, material selecionado em função de sua elevada resistência mecânica, facilidade de usinagem, baixo custo e capacidade de proporcionar adequado isolamento da radiação, conferindo robustez e estabilidade ao equipamento durante os ensaios experimentais.

O sistema de irradiação foi projetado para operar em diferentes regiões do espectro eletromagnético, possibilitando a realização de experimentos tanto sob radiação ultravioleta quanto sob luz visível. Para isso, o compartimento interno do reator foi equipado com quatro lâmpadas UV e quatro lâmpadas de LED, distribuídas de forma a favorecer uma irradiação mais homogênea da solução reacional e ampliar a versatilidade do equipamento para diferentes aplicações em processos fotocatalíticos.

Figura 1. Caixa fotocatalítica montada



Fonte: Autores (2026)



Caracterizações

Com o objetivo de avaliar a eficiência do reator fotoquímico desenvolvido, foram realizados ensaios de fotodegradação utilizando a Rodamina B como composto modelo. Para minimizar a influência do material fotocatalítico nos resultados e direcionar a análise ao desempenho do sistema construído, empregou-se um fotocatalisador com atividade fotocatalítica previamente validada na literatura. As condições experimentais adotadas (síntese da peneira molecular SBA-15 e os nanocristais TiO_2) seguiram a metodologia proposta por Sales *et al.* (2023).

A caracterização estrutural do $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$ por difração de raios X a baixo ângulo ($0,5-5^\circ$) revelou três picos de difração referentes aos planos (100), (110) e (200), característicos da mesoestrutura hexagonal bidimensional (grupo de simetria $P6_{mm}$) típica da SBA-15, confirmando que o método de ancoragem *in situ* não destruiu a estrutura mesoporosa após a incorporação do TiO_2 . Observou-se ainda um leve deslocamento dos picos para maiores valores de 2θ na amostra SBA-15/ TiO_2 em relação à SBA-15 pura, indicando redução na distância entre os poros, associada à inserção dos nanocristais de TiO_2 nas paredes dos mesoporos. Já nos difratogramas a alto ângulo ($10-80^\circ$), ambas as amostras apresentaram um halo amplo entre 15 e 35° (2θ), característico da sílica amorfa (SiO_2), sem picos evidentes das fases cristalinas do TiO_2 (anatásio/rutilo), o que foi atribuído à baixa concentração de titânio incorporada (razão molar $\text{Si/Ti} = 75$) e à consequente sobreposição pelo sinal amorfo da matriz. A espectroscopia Raman, por sua vez, mostrou para a SBA-15 pura as bandas típicas da rede de sílica (em torno de 450 , 810 e 950 cm^{-1}), enquanto a amostra SBA-15/ TiO_2 apresentou quatro modos vibracionais adicionais associados à fase anatase do TiO_2 (Eg em $\sim 150\text{ cm}^{-1}$, B1g em $\sim 400\text{ cm}^{-1}$, A1g em $\sim 520\text{ cm}^{-1}$ e Eg em $\sim 640\text{ cm}^{-1}$), confirmando a presença dos nanocristais nessa fase cristalina. Os espectros de FTIR evidenciaram as bandas características da estrutura SBA-15 em 1080 , 806 e 460 cm^{-1} (estiramentos Si-O-Si) e uma banda larga em 3475 cm^{-1} (grupos silanóis), sendo que, na amostra $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$, houve deslocamento dessa banda para cerca de 980 cm^{-1} e o surgimento de um sinal em 492 cm^{-1} , ambos atribuídos à formação de ligações Ti-O-Si , mostrando a interação entre as espécies de titânio e a matriz de sílica. Por fim, a espectroscopia de reflectância difusa UV-Vis, associada ao método de Kubelka-Munk para transições indiretas, permitiu estimar os valores de energia de *band gap* (E_{gap}) de $3,13\text{ eV}$ para o $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$, sendo esse aumento atribuído à interação das nanopartículas de TiO_2 com a parede de sílica da estrutura mesoporosa, que favorece menor cristalinidade das nanopartículas na interface $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$.

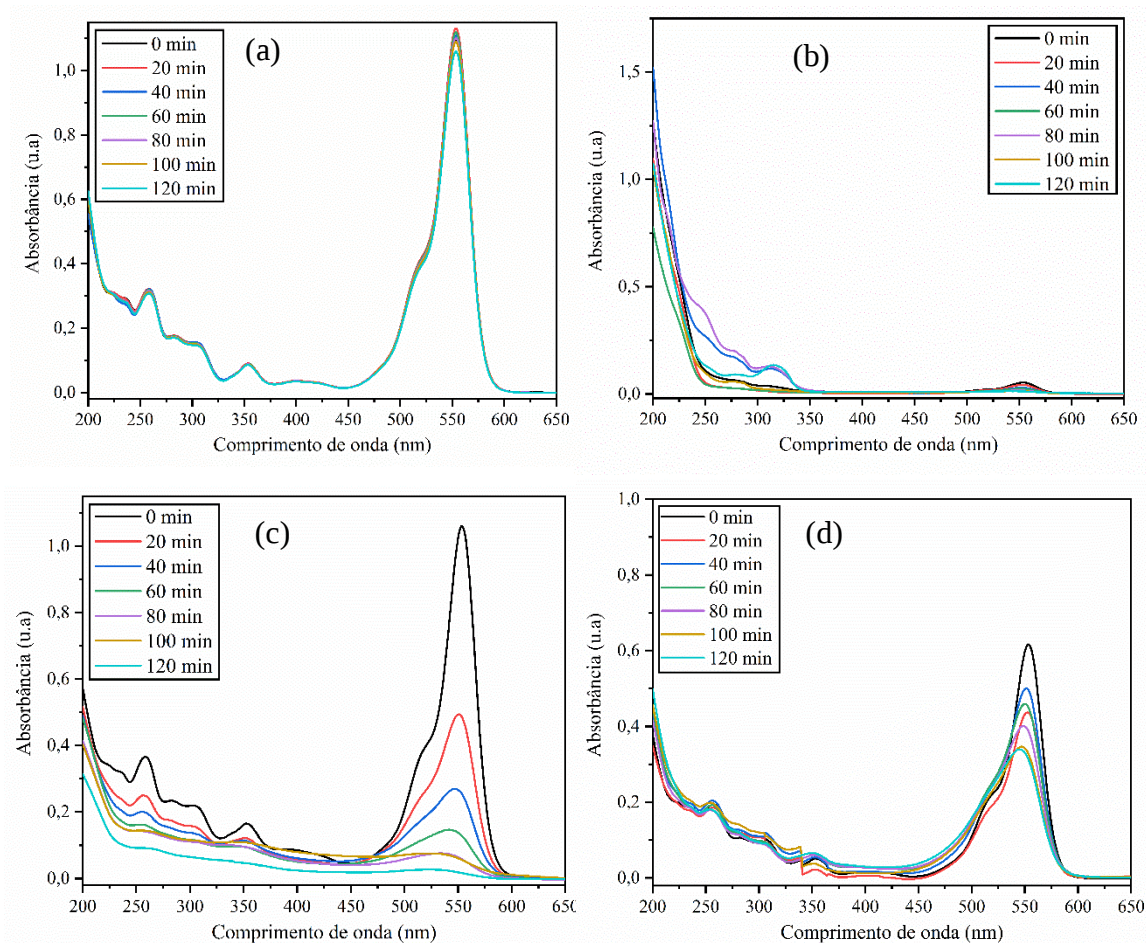
Fotodegradação do corante Rodamina B

Os espectros de UV-Vis da Rodamina B (RhB) obtidos durante a fotodegradação sob irradiação UV (Figura 2a-d) mostram que as bandas de absorção características do corante foram modificadas de forma significativa apenas nas amostras contendo TiO_2 , permanecendo

praticamente inalteradas durante a fotólise (ausência de catalisador). Esse resultado indica que a RhB é estável sob radiação UV isolada e que sua degradação depende diretamente da presença do fotocatalisador.

Em todas as amostras com TiO_2 , observou-se diminuição da intensidade da banda de absorção em torno de 553 nm ao longo do tempo de irradiação, consistente com a fotodegradação progressiva do corante. Também notou-se o crescimento de bandas na região abaixo de 200 nm, o que sugere a formação de produtos de degradação; entretanto, essa observação não pôde ser confirmada de forma completa devido à limitação da faixa de absorbância do equipamento (200-800 nm).

Figura 2. Espectro UV-Vis (a) durante fotólise da Rodamina B; (b) fotodegradação com Degussa P25 (RhB 10^{-6} mol/L); (c) fotodegradação com Degussa P25 (RhB 10^{-5} mol/L); (d) fotodegradação com $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$



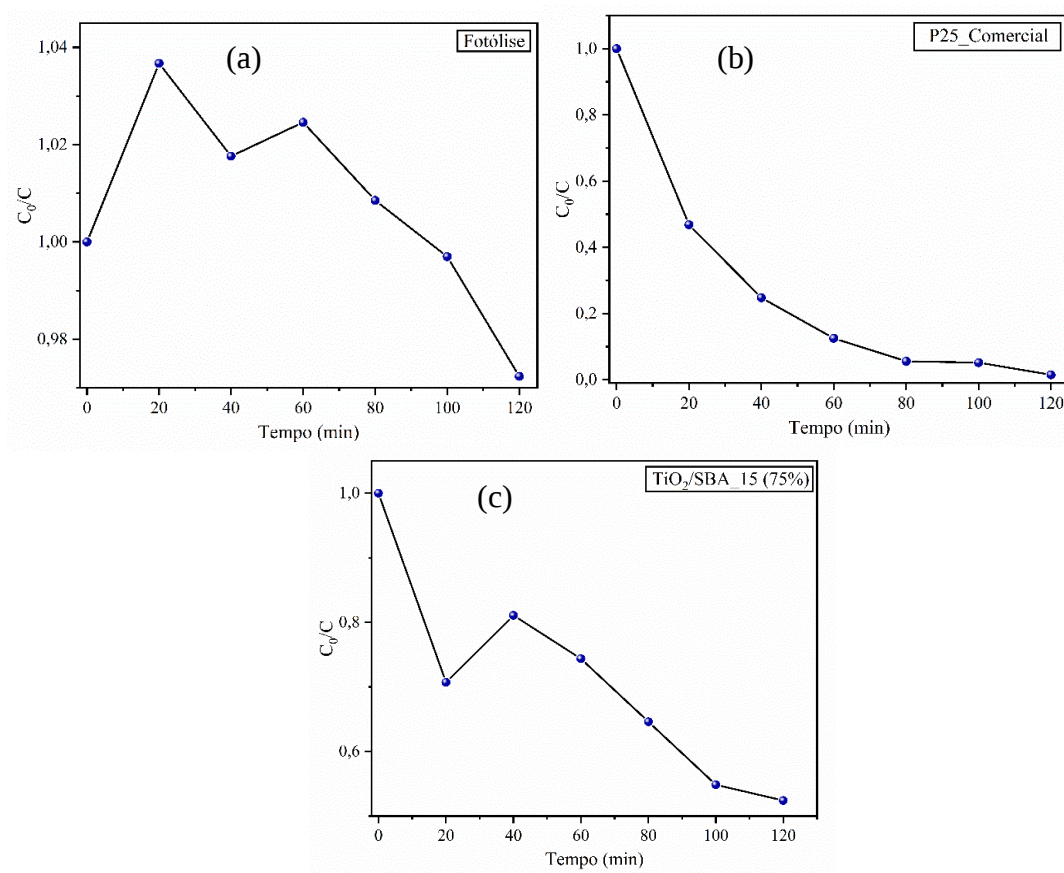
Fonte: Autores (2026)

As curvas de fotodegradação (Figura 3) reforçam essas observações de forma quantitativa. Durante o período de escuro (30 min), destinado a atingir o equilíbrio de adsorção/dessorção, não houve remoção de RhB em nenhum dos materiais testados, indicando que a adsorção do corante nas superfícies dos catalisadores não é significativa nas condições

avaliadas. Na ausência de fotocatalisador (Figura 3a), a razão C_0/C manteve-se próxima de 1 ao longo de todo o experimento, com pequenas oscilações, confirmando que o corante é estável e pouco degradado apenas pela radiação UV.

Já os sistemas contendo fotocatalisador apresentaram comportamentos distintos entre si. Com Degussa P25 (Figura 3b), houve queda acentuada da razão C_0/C já nos primeiros 20 min, atingindo valores próximos de zero em 120 min, o que caracteriza o processo de fotodegradação mais rápido e mais completo entre os materiais testados. Com $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$ (Figura 3c), a redução de C_0/C ocorreu de forma mais gradual e menos pronunciada, estabilizando-se em torno de 0,5 ao final dos 120 min, sugerindo fotodegradação parcial da RhB. Dessa forma, entre os materiais avaliados, o TiO_2 (Degussa P25) apresentou a maior eficiência de fotodegradação do corante Rodamina B, seguido pelo $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$, enquanto a fotólise isolada não promoveu remoção efetiva do poluente.

Figura 3. (a) Curva de fotodegradação sem fotocatalisadores; (b) curva de fotodegradação com Degussa-P25; (c) curva de fotodegradação com $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$



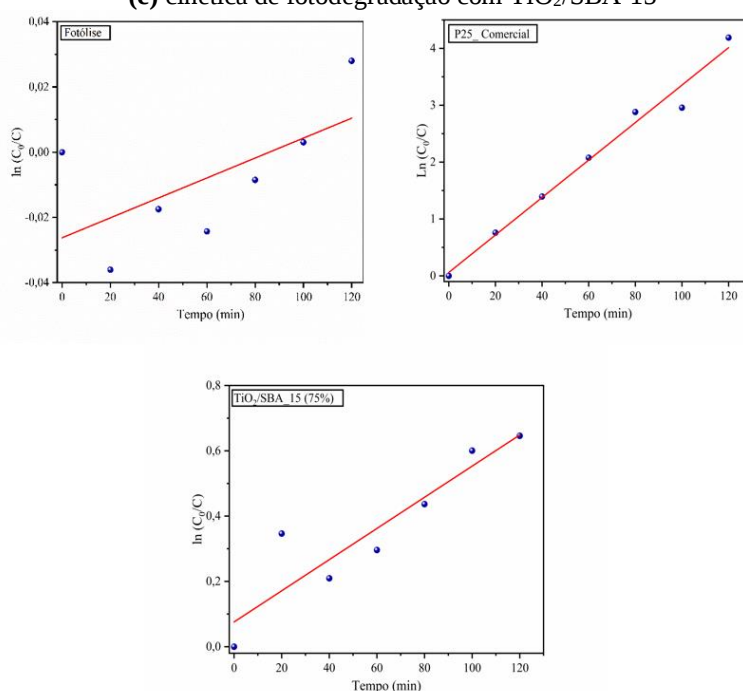
Fonte: Autores, (2026)

Vale destacar que o $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$ apresentou degradação apreciável da RhB mesmo contendo uma fração muito menor de fase ativa em relação ao TiO_2 puro (razão molar Si/Ti =

75), uma vez que a matriz de SBA-15 é amorfa e cataliticamente inerte. Esse resultado é consistente com uma boa incorporação dos nanocristais de TiO_2 na estrutura mesoporosa, o que é percebido pela manutenção da mesoestrutura hexagonal e pelo deslocamento dos picos de DRX a baixo ângulo, além da formação de ligações Ti-O-Si identificadas por FTIR. Assim, a menor taxa de degradação do composto está associada não apenas à menor cristalinidade das nanopartículas, mas também à menor quantidade absoluta de fase ativa disponível no sistema, o que representa uma limitação esperada e não necessariamente uma desvantagem intrínseca do material.

Os resultados da cinética de fotodegradação (Figura 4) mostram que a utilização de fotocatalisadores aumenta significativamente a velocidade de degradação do corante em relação à fotólise. O TiO_2 P25 comercial apresentou o melhor desempenho, com a maior constante cinética aparente, resultado atribuído à sua elevada atividade fotocatalítica, favorecida pela combinação das fases anatase e rutilo, alta cristalinidade e menor recombinação dos pares elétron-buraco. O composto $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$ também apresentou atividade fotocatalítica, superior à fotólise, porém inferior ao P25, indicando que a incorporação do TiO_2 à SBA-15 gera um material fotoativo, embora fatores como a dispersão da fase ativa e sua interação com o suporte ainda limitem sua eficiência. De modo geral, a atividade fotocatalítica seguiu a ordem $\text{P25} > \text{TiO}_2/\text{SBA-15} \gg \text{fotólise}$, confirmando a importância do uso de fotocatalisadores para acelerar a degradação do poluente.

Figura 4. (a) cinética de fotodegradação sem fotocatalisadores; **(b)** cinética de fotodegradação com Degussa-P25; **(c)** cinética de fotodegradação com $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$



Fonte: Autores (2026)



Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que a caixa fotocatalítica desenvolvida cumpriu satisfatoriamente seu objetivo, promovendo a fotodegradação da Rodamina B de forma eficiente na presença dos catalisadores testados. A ausência de degradação significativa durante a fotólise isolada confirma que a remoção do corante observada nos demais ensaios decorre efetivamente da ativação fotocatalítica proporcionada pelo sistema construído, validando seu funcionamento. Além disso, o fato de o $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$, mesmo contendo uma fração reduzida de fase ativa (razão molar $\text{Si/Ti} = 75$) e nanocristais de menor cristalinidade, ter apresentado degradação apreciável da RhB reforça a eficiência do reator em promover a ativação fotocatalítica mesmo em condições menos favoráveis de carga de catalisador. Esses resultados indicam que a caixa fotocatalítica é adequada para a condução de ensaios de fotodegradação, servindo como uma ferramenta confiável para a avaliação de diferentes materiais fotocatalisadores. A pesquisa ainda está em andamento, e novos ensaios serão conduzidos utilizando outros materiais fotocatalíticos e diferentes condições experimentais, a fim de caracterizar de forma mais completa o desempenho e a versatilidade do sistema desenvolvido.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Estadual do Maranhão e à Universidade Federal do Maranhão pelos espaços cedidos. À parceria com a Universidade Federal do Piauí e à FAPEMA pelo apoio financeiro.

Referências

COSTA, L. N.; COIMBRA, A. H. T.; MOTA, G. S. Avaliação da toxicidade de defensivos agrícolas usados nas lavouras de Grajaú – MA e seus efeitos ao meio ambiente. **Revista Sociedade Científica**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 5267–5278, 2024. DOI: <http://doi.org/10.61411/rsc202481417>.

MORAIS, J. L. de; SIRTORI, C.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 20-23, fev. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-40422006000100005>.

MOURA, M. N. et al. Aplicação da lama de beneficiamento de rochas ornamentais como catalisador no processo foto fenton para a descoloração de corante em solução aquoso. **Química Nova**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20240069>.

PATRÍCIO, A. R.; BOAS, R. M. R. P. V.; GALDINO, M. T. Management and treatment of liquid effluents from the production of high quality dairy products with sizing of an effluent treatment plant to be implemented in an industry located in Uberaba-MG, Brazil. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 37278-37292, 12 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-272>.

RAMOS, J. L. et al. Processos oxidativos avançados no tratamento de águas residuárias: possibilidades mecanísticas na degradação de poluentes. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 14, n. 4, p. 372-388, 31 dez. 2020.



SALES, G. S. et al. Photodegradation mechanism of metronidazole on nanostructured material type SBA-15/TiO₂. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 5, 110335, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110335>

SILVA, R. P. T. da. et al. Avaliação do processo Fenton utilizando um resíduo como fonte alternativa de ferro para remoção de azul de metileno em meio aquoso. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 26, n. 3, 2021.