

Transformação sustentável de resíduos de copos descartáveis de polipropileno em substratos ativos de TiO_2 para a degradação do corante têxtil

Raiane dos Santos¹, Evelle D. C. Oliveira¹, Ivana C. F. Araújo^{1*}, Clarice M. Beserra¹, Jhonanta do N. Silva¹, Luciano C. Almeida¹

¹Laboratório de Microrreatores Aplicados à Indústria Química, Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Avenida dos Economistas S/N – Cidade Universitária, CEP 50740-590, Recife – PE – Brasil

*raiane.santos2@ufpe.br

Resumo/Abstract

RESUMO – Neste estudo foi desenvolvido e caracterizado um sistema fotocatalítico utilizando dióxido de titânio (TiO_2) imobilizado em polipropileno (PP) reciclado, a partir de copos de cafezinho, com o objetivo de degradar o corante têxtil Preto Reativo 5 (RB5) sob irradiação de luz solar. Os filmes de TiO_2 -PP foram preparados por meio da técnica de dip-coating e caracterizados por ensaios de lixiviação (aderência), medições de ângulo de contato (hidrofilicidade), microscopia eletrônica de varredura (morfologia) e isothermas de adsorção/dessorção de N_2 (área superficial específica). As análises de MEV e BET indicaram boa dispersão do TiO_2 e área superficial igual a $181,4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente. Os testes de desempenho fotocatalítico mostraram 100% de redução da cor do RB5 após 210 minutos de exposição, mesmo em condições alcalinas (pH 10), evidenciando a eficácia do sistema. Os filmes também apresentaram forte aderência e desempenho reprodutível até o segundo ciclo de uso. A perda de eficiência nos ciclos seguintes foi atribuída à degradação do suporte e à saturação dos sítios ativos. Os resultados confirmaram o potencial do sistema TiO_2 -PP como uma alternativa sustentável e de baixo custo para o tratamento de efluentes com corantes e a reutilização de resíduos plásticos.

Palavras-chave: fotocatalise heterogênea, Dióxido de titânio, Polipropileno.

ABSTRACT - In this study, a photocatalytic system was developed and characterized using titanium dioxide (TiO_2) immobilized on recycled polypropylene (PP), from coffee cups, with the aim of degrading the textile dye Reactive Black 5 (RB5) under solar light irradiation. The TiO_2 -PP films were prepared using the dip-coating technique and characterized by leaching tests (adhesion), contact angle measurements (hydrophilicity), scanning electron microscopy (morphology), and N_2 adsorption/desorption isotherms (specific surface area). SEM and BET analyses indicated good TiO_2 dispersion and a specific surface area of $181.4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Photocatalytic performance tests showed 100% decolorization of RB5 after 210 minutes of exposure, even under alkaline conditions (pH 10), demonstrating the effectiveness of the system. The films also exhibited strong adhesion and reproducible performance up to the second cycle of use. The loss of efficiency in subsequent cycles was attributed to support degradation and saturation of active sites. The results confirmed the potential of the TiO_2 -PP system as a sustainable and low-cost alternative for the treatment of dye-containing effluents and the reuse of plastic waste.

Keywords: heterogenous photocatalysis, Titanium dioxide, Polypropylene.

Introdução

A crescente demanda por tecnologias sustentáveis de tratamento de efluentes tem impulsionado o desenvolvimento de processos avançados de oxidação, com destaque para a fotocatalise heterogênea. Dentre os diversos materiais semicondutores utilizados, o dióxido de titânio (TiO_2) destaca-se por sua estabilidade química, baixo custo, não toxicidade e alta atividade fotocatalítica quando exposto à radiação ultravioleta (1, 2). Sob irradiação, o TiO_2 gera pares elétron-lacuna capazes de produzir espécies reativas de oxigênio, como radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$), que são altamente eficazes na degradação de compostos orgânicos, incluindo corantes têxteis (3).

A imobilização do TiO_2 em suportes sólidos é uma estratégia que visa facilitar sua recuperação e reuso, além de evitar problemas associados à separação pós-tratamento. Considerando isso, diversos suportes fotocatalíticos foram testados ao longo dos anos, e materiais poliméricos apresentaram vantagens como flexibilidade, praticidade e baixo custo (4).

Contudo, essas mesmas características têm contribuído para o aumento expressivo da produção, consumo e descarte inadequado de plásticos no meio ambiente. A crescente acumulação de plásticos, especialmente em ecossistemas aquáticos, tornou-se uma das principais preocupações ambientais da atualidade. Estima-se que milhões de toneladas desses resíduos sejam lançadas nos oceanos a cada

ano, causando sérios danos à vida marinha e ingressando nas cadeias alimentares sob a forma de microplásticos. Esses materiais, devido à sua elevada resistência à degradação, permanecem no ambiente por décadas, gerando impactos ecológicos significativos e potenciais riscos à saúde humana (5).

Nesse contexto, a reutilização de resíduos plásticos, como o polipropileno (PP), insere-se em uma abordagem de economia circular, ao transformar passivos ambientais em recursos úteis. O uso de PP reciclado como suporte fotocatalítico contribui não apenas para a valorização de resíduos, mas também para a redução da demanda por matérias-primas virgens e mitigação dos efeitos nocivos da poluição ambiental.

Experimental

Preparação dos filmes fotocatalíticos TiO_2 -PP

Foi utilizado o dióxido de titânio TiO_2 -G5 (Millennium Chemicals-ES) como fotocatalisador. Os suportes foram confeccionados a partir de copos descartáveis de polipropileno (PP) reciclados do Departamento de Engenharia Química da UFPE. O corante utilizado nas reações foi o Preto Reativo 5 (RB5), fornecido pela Exatacor.

A suspensão de TiO_2 a 10% em massa foi preparada com ajuste de pH entre 3–4 (ácido nítrico $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), homogeneizada por agitação magnética e ultrassonificada por 15 minutos, sendo mantida sob agitação por 24 horas.

Os suportes de PP foram obtidos pela secção dos copos, seguidos de lixamento (lixa 220) e lavagem com detergente neutro. Posteriormente, foram submetidos a dois banhos ultrassônicos consecutivos com soluções de Extran e etanol a 10%, e secos a $25 \pm 3^\circ \text{C}$.

A imobilização do TiO_2 foi realizada por dip-coating, com imersão dos suportes na suspensão a $3 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ e secagem a 80°C por 15 minutos por ciclo. O processo foi repetido até atingir cargas de 0,5 a $4,0 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$. Após a última aplicação, os filmes foram secos a 80°C por 1 hora e 30 minutos.

Caracterização dos filmes fotocatalíticos TiO_2 -PP

Com o objetivo de compreender a influência da aderência do TiO_2 aos filmes de polipropileno foi avaliada por testes de lixiviação. Os suportes com diferentes cargas ($0,5$ a $4,0 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$) foram imersos em água sob agitação (1500 rpm, 24 horas), secos em estufa por 1 hora e 30 minutos a 80°C e novamente pesados. O percentual de aderência foi calculado com base na diferença de massa inicial e final (1).

$$\% \frac{\text{Aderência}}{24\text{h}} = 100 \times \left(1 - \frac{m_i - m_f}{m_{\text{TiO}_2}} \right) \quad (1)$$

Onde, m_i é a massa inicial do filme com TiO_2 antes do teste, m_f é a massa final do filme após o teste, e m_{TiO_2} é a massa de TiO_2 depositada sobre o suporte.

A hidrofobicidade dos filmes foi determinada por medições do ângulo de contato via método da gota sésil, com gotas de $8 \mu\text{L}$ depositadas a 5 mm da superfície. As imagens foram registradas após 5 segundos, e os valores foram calculados automaticamente utilizando o aplicativo Angle Meter. A análise textural (área superficial específica, volume e diâmetro médio dos poros) foi realizada por isotermas de adsorção/dessorção de nitrogênio a -196°C , utilizando o equipamento Quantachrome Autosorb-iQ – NOVA Instrument, com aplicação do modelo BET. A espectroscopia de reflectância difusa (DRS) foi empregada para analisar a absorção óptica dos sólidos por meio do espectrofotômetro Shimadzu UV-2700. As medições foram realizadas de 200 a 800 nm. A análise morfológica foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com uso do equipamento LEO EVO 40 XVP, operando a 10 kV.

Avaliação fotocatalítica

Para avaliar o desempenho dos materiais na degradação do corante RB5 em meio aquoso, foi realizado um estudo fotocatalítico em reator operando em batelada, utilizando fontes de radiação solar artificial. As reações foram conduzidas com 200 mL de solução de RB5 a pH 10, contendo filmes fotocatalíticos com massa de $1,0 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ de TiO_2 . O reator de vidro borossilicato utilizado possui total de 300 cm^3 , sendo acoplado a um sistema de agitação e a uma unidade de controle térmico, responsável por manter a temperatura constante em $26 \pm 3^\circ \text{C}$. A fonte de radiação artificial empregada foi uma lâmpada sunlight Ultra Vitalux 300 W (Osram), posicionada de forma a fornecer uma irradiância de $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ na faixa UV e $110 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ na faixa do visível. Antes da ativação da luz, foi realizada uma etapa de equilíbrio de adsorção-dessorção no escuro, com duração de 1 hora e 30 minutos. Após esse período, deu-se início à reação fotocatalítica. A degradação do RB5 foi monitorada por espectrofotometria UV/VIS, com leituras no comprimento de onda de 597 nm, utilizando o espectrofotômetro Merck Spectroquant® Prove 300.

Desempenho Cíclico dos Filmes Fotocatalíticos TiO_2 -PP

Para a recuperação dos filmes após o processo de fotocatalise, eles foram submetidos a uma secagem em estufa a 80°C por um período de 3 horas e, posteriormente, pesados. Em seguida, os filmes foram novamente utilizados em um novo experimento fotocatalítico para avaliar a eficiência do filme. Esse procedimento foi repetido três vezes com o mesmo filme.

Resultados e Discussão

Caracterização dos filmes fotocatalíticos TiO₂-PP

Para aprimorar a interação entre o TiO₂ e o PP e, consequentemente, melhorar o recobrimento e a aderência, foram realizados tratamentos físicos e químicos. Na Figura 1, são apresentados os ângulos de contato entre o TiO₂ e o PP após os tratamentos físicos e químicos aplicados.

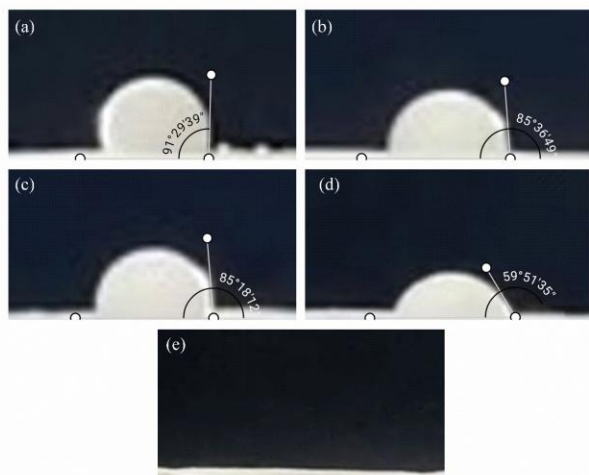


Figura 1. Ângulo de contato para os filmes de PP, sendo eles: (a) suporte de PP sem tratamento; (b) Após tratamento com lixa; (c) Após banho ultrassônico com Extran; (d) Após banho ultrassônico com álcool etílico; (e) Entre o filme de TiO₂-PP e a solução de RB5.

Os tratamentos físicos e químicos aplicados na superfície do PP resultaram em uma redução significativa do ângulo de contato, diminuindo-o em 31,63°, o que representa uma redução de 34,6% em comparação com a superfície não tratada. O tratamento da superfície com lixa modifica a energia livre da superfície, alterando o ângulo de contato, como mostrado nas Figuras 1(a) e 1(b) (6). Em contraste, o tratamento com banho ultrassônico usando 10% de detergente (Extran) não afetou o ângulo de contato (Figura 1(c)). A Figura 1(d) demonstra uma redução de 25,45° no ângulo de contato após o tratamento com álcool etílico. Este resultado é atribuído à interação entre as cargas negativas da superfície do substrato, pós-tratamento com solução etanoica, e as cargas positivas do TiO₂ em suspensão ácida.

Ainda através do teste de gota séssil, foi observada uma alta hidrofiliabilidade e compatibilidade do filme com a solução de RB5, evidenciada pelo ângulo de contato de 0° (Figura 1(e)). Essa elevada hidrofiliabilidade permite uma fácil penetração da água e do corante no interior do filme, resultando em uma atividade fotocatalítica aprimorada para a degradação de poluentes orgânicos solúveis em água (7).

A partir da análise da progressão do aumento de massa durante a imobilização, foi possível verificar que a incorporação do TiO₂ nos suportes de PP ocorreu de maneira

linear, com uma adesão média de aproximadamente 16,6 ± 2,7 mg por ciclo de recobrimento (Figura 2).

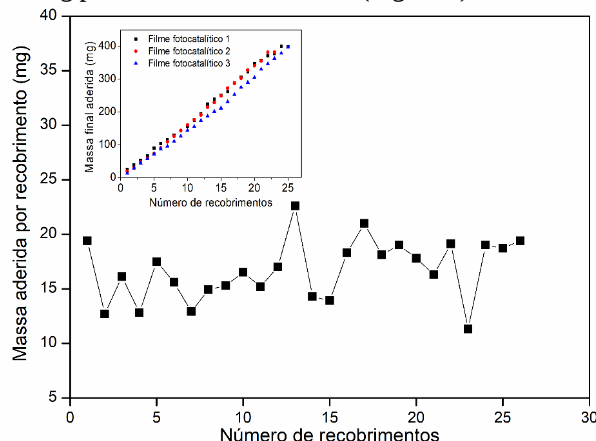


Figura 2. Progressão do aumento de massa de TiO₂ após os ciclos de recobrimento.

A massa média aderida foi observada já no primeiro ciclo, o que sugere uma boa compatibilidade química entre o substrato e a suspensão. As imagens na Figura 3 corroboram essa constatação, demonstrando a homogeneidade do recobrimento de TiO₂ na superfície do PP e evidenciando a uniformidade do processo de aplicação.

A análise dos suportes ilustrados na Figura 3 revela que a carga de 0,5 mg·cm⁻² não é suficiente para recobrir totalmente a superfície de PP, resultando em áreas sem o recobrimento desejado. Por outro lado, os filmes com cargas de 1 e 2 mg·cm⁻² apresentaram boa homogeneidade e cobertura adequada da superfície a olho nu. Embora o filme com carga de 4 mg·cm⁻² tenha exibido uma cobertura satisfatória da área, foram observadas regiões com considerável aglomeração do pó, como corroborado pelas imagens obtidas por microscopia eletrônica (Figura 4).

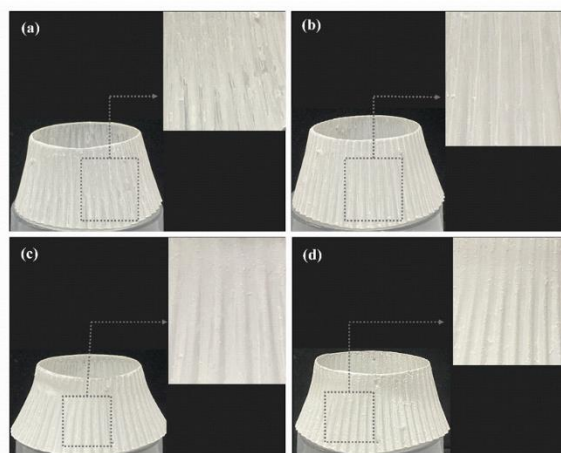


Figura 3. Imagens dos filmes de PP com diferentes cargas de fotocatalisador, sendo elas: (a) 0,5 mg·cm⁻², (b) 1,0 mg·cm⁻²; (c) 2,0 mg·cm⁻² e (d) 4,0 mg·cm⁻².

As imagens registradas pela microscopia eletrônica mostram que a formação de aglomerados é intensificada com o aumento da carga depositada.

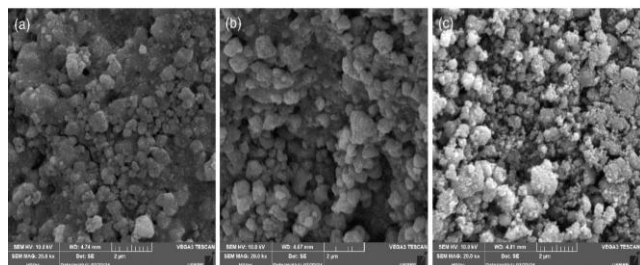


Figura 4. MEV dos filmes fotocatalíticos, sendo elas: (a) 1,0 mg.cm⁻²; (b) 2,0 mg.cm⁻² e (c) 4,0 mg.cm⁻².

A viabilidade do reuso de fotocatalisadores imobilizados é frequentemente comprometida pela diminuição gradual da atividade fotocatalítica, que pode ser atribuída à má aderência do material ao suporte, resultando na perda de massa do fotocatalisador. Os filmes de TiO₂ demonstraram excelente aderência ao suporte de PP, com valores superiores a 90% para todas as massas avaliadas (Tabela 1).

Tabela 1. Aderência dos filmes de TiO₂ no suporte de polipropileno.

TiO ₂ -PP	Massa imobilizada			
	0,5 mg.cm ⁻²	1,0 mg.cm ⁻²	2,0 mg.cm ⁻²	4,0 mg.cm ⁻²
1	99.8%	97.0%	97.6%	93.2%
2	99.5%	99.4%	95.2%	92.8%
Média	99.6%	98.2%	96.4%	93.0%

A forte adesão do TiO₂ é atribuída à afinidade física com os sulcos superficiais do PP, formados durante o tratamento físico com lixa. Adicionalmente, o tratamento com solução etanoica resulta em uma superfície de substrato carregada negativamente, enquanto o TiO₂, em suspensão em meio ácido, fica carregado positivamente. Durante o processo de imobilização, essas cargas opostas interagem, promovendo a formação de uma ligação química Et-OH-HO-Ti, que contribui significativamente para a eficácia da adesão do filme fotocatalítico TiO₂-PP, corroborada pelo teste de molhabilidade. Observou-se também que, com o aumento da massa imobilizada, a aderência do sistema diminui. Isso ocorre porque uma maior massa resulta em uma espessura maior do recobrimento do filme de TiO₂, o que aumenta a quantidade de defeitos presentes e a instabilidade entre as camadas, provocando um maior desprendimento do recobrimento.

Os filmes fotocatalíticos de TiO₂-PP e PP foram analisados por DRS objetivando determinar a absorção da radiação pelo material (Figura 5).

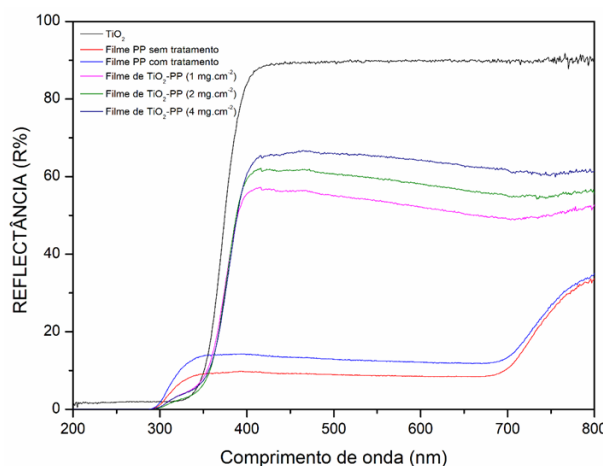


Figura 5. Resultados da análise de DRS para o filme fotocatalítico.

A Figura 5 exibe o polipropileno apresenta dois picos de absorção: um na faixa de 300 a 700 nm e outro entre 700 e 800 nm. Embora o polipropileno (PP) não deva absorver radiação na região UV, a presença de absorção nessa faixa nos suportes sugere a influência de contaminantes, como resíduos de catalisador ou imperfeições na cadeia molecular durante a síntese do polímero. Ao analisar os suportes sem TiO₂, observa-se um aumento na refletância após o tratamento, associado ao incremento da opacidade. Esse fenômeno promove a dispersão da luz e resulta em uma redução da absorção de radiação UV (8). Os filmes TiO₂-PP mostram uma refletância média que reflete a combinação das propriedades do TiO₂ e do PP. Notavelmente, a faixa de absorção entre 300 e 350 nm, observada nos filmes de PP, não apareceu nos filmes com TiO₂, o que sugere uma cobertura completa da superfície do suporte pelo TiO₂. Além disso, a refletância do filme aumentou com a massa de TiO₂, o que pode ser atribuído ao aumento da espessura das camadas geradas pelo maior volume de material.

A isoterma de adsorção/dessorção obtida para os filmes de TiO₂-PP corresponde ao tipo IV, com uma histerese do tipo H3 (Figura 6). A dessorção apresentou volumes menores em comparação com a adsorção e uma histerese pronunciada e aberta em baixas pressões, sugerindo possíveis bloqueios nos poros. Durante a adsorção, os poros do TiO₂ podem ser gradualmente preenchidos, enquanto na dessorção, o bloqueio parcial dos poros pode limitar a liberação eficiente das moléculas adsorvidas.

A análise pela equação de BET revelou uma área superficial de 181,4 m²/g para os filmes. Os cálculos baseados na teoria da função de distribuição de poros (DFT) mostraram um volume de poros de 0,193 cm³/g e um tamanho médio de 1,688 nm.

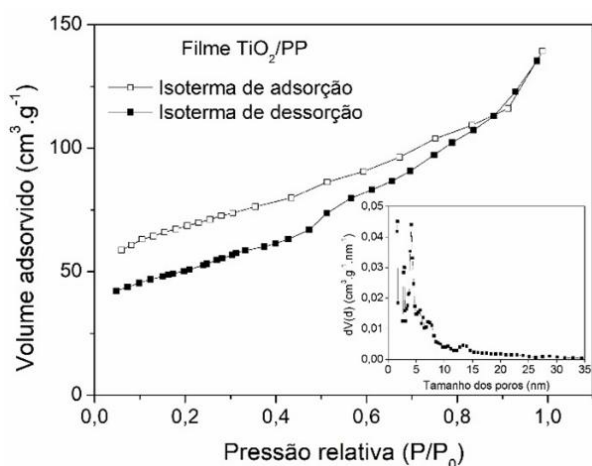


Figura 6 – Isotermas de adsorção/dessorção e distribuição dos tamanhos dos poros do filme TiO₂-PP.

Avaliação fotocatalítica

A figura apresenta a degradação do corante RB5 utilizando o sistema fotocatalítico TiO₂ imobilizado em polipropileno (TiO₂-PP), sob incidência de luz solar (sunlight), em pH 10 e com carga superficial de 1 mg·cm⁻² de TiO₂. A curva é dividida em duas etapas: adsorção (30–90 min) e fotocatalise (90–210 min).

Durante a etapa inicial (30–90 min), observa-se uma discreta redução na concentração do corante, atribuída ao processo de adsorção física do RB5 sobre a superfície do TiO₂-PP. Essa baixa eficiência adsorptiva está diretamente relacionada ao ponto de carga zero (PCZ) do TiO₂, que é cerca de 6,8. Em pH 10, a superfície do TiO₂ encontra-se negativamente carregada, o que causa repulsão eletrostática com o RB5, que também assume forma aniônica devido ao baixo pKa dos grupos sulfônicos presentes em sua estrutura. Essa repulsão reduz a afinidade entre o corante e a superfície do catalisador, limitando a adsorção.

Apesar disso, mesmo com valores modestos de remoção inicial, a quantidade de RB5 adsorvida foi suficiente para estabelecer uma sinergia positiva entre os processos de adsorção e fotocatalise, contribuindo para a alta eficiência do sistema na etapa seguinte.

Na fase de fotocatalise (90–210 min), observa-se uma acentuada redução na concentração do corante, resultado da ação combinada de espécies reativas geradas pela ativação do TiO₂ sob irradiação solar. A excitação do semicondutor promove a formação de elétrons (e⁻) na banda de condução e lacunas (h⁺) na banda de valência, os quais reagem com espécies presentes na superfície e no meio reacional, originando radicais hidroxila (•OH) e espécies superóxido (O₂•⁻). Esses agentes oxidantes são altamente reativos e responsáveis por atacar as ligações azo (–N=N–) e anéis aromáticos do RB5, levando à sua degradação progressiva. Adicionalmente, o meio alcalino (pH 10) favorece a geração

de •OH a partir da oxidação de íons hidroxila (OH⁻) pelas lacunas (h⁺), intensificando o processo oxidativo e, consequentemente, à eficiência da fotodegradação.

Ao final de 210 minutos, observou-se a remoção completa da coloração da solução, indicando uma eficiência de 100% da remoção de cor do corante RB5.

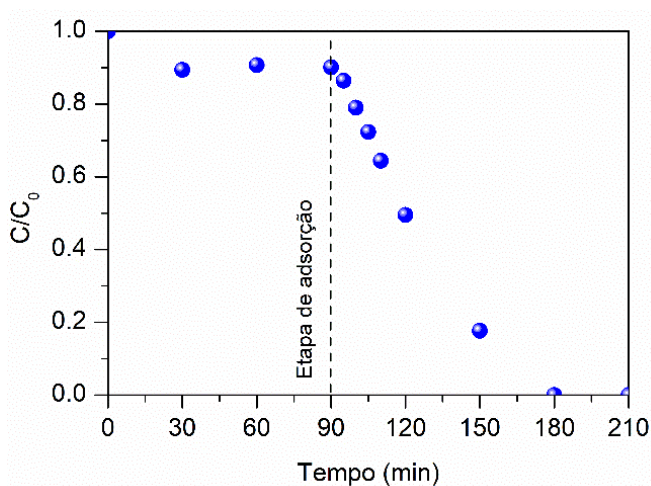


Figura 7. Avaliação da remoção de cor do corante RB5.

Desempenho Cíclico dos Filmes Fotocatalíticos TiO₂-PP

A reprodutibilidade da eficiência dos filmes TiO₂-PP foi avaliada em quatro ciclos de uso com um filme de PP coberto com 1 mg·cm² de TiO₂. Os resultados estão apresentados na Figura 8.

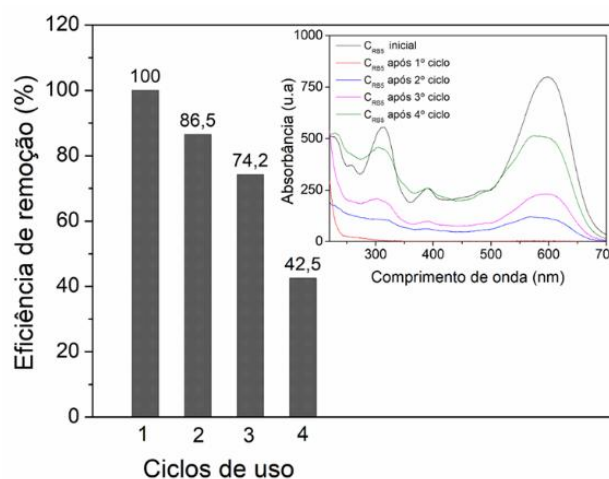


Figura 8. Estudo do reuso dos filmes de PP com carga de 1 mg·cm⁻² de TiO₂, utilizando solução de RB5 (25 mg·L⁻¹, pH 10) sob irradiação com lâmpada UV.

Pode se constatar que a eficiência do filme fotocatalítico foi reduzida ao longo dos ciclos de reuso, variando entre 100 e 42,5%. A redução na eficiência do sistema pode ser

justificada por alguns fatores, dentre eles a presença de resíduos de compostos intermediários, formados durante as reações fotocatalítica, na superfície do TiO_2 . Esse fenômeno pode ainda influenciar na disponibilidade dos sítios ativos.

Outro fator relacionado refere-se à deterioração do filme TiO_2 -PP (queda da massa de TiO_2 ou modificações na estrutura dos poros) após as reações e exposição à radiação UV. A deterioração do filme TiO_2 -PP, observada após as reações e exposição à radiação UV, manifestou-se em áreas com aglomerações de TiO_2 e rachaduras após o desprendimento do óxido (Figura 8). Esse desprendimento pode ser atribuído a alterações na superfície do PP devido à ativação do TiO_2 pela radiação UV e VIS, que gera pares eletrônicos e induz reações de oxirredução na superfície do polímero. Essas reações podem romper ligações químicas no polipropileno, iniciando uma degradação em cadeia e resultando na fragmentação do polímero e na formação de produtos de menor peso molecular (9) Esses produtos incompatíveis com TiO_2 reduzem a interação entre o catalisador e o suporte, contribuindo para o desprendimento do TiO_2 ao longo dos ciclos.

Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a imobilização de TiO_2 em substratos de polipropileno reciclado é uma estratégia viável para a produção de filmes fotocatalíticos com alta eficiência na degradação de corantes orgânicos sob luz solar. O processo de preparação por dip-coating mostrou-se eficaz, garantindo boa cobertura, aderência e atividade fotocatalítica. A remoção de cor completa do corante RB5 em 210 minutos comprova a eficácia do sistema TiO_2 -PP, mesmo em condições alcalinas que desfavorecem a adsorção. Além disso, os testes cíclicos demonstraram que, embora ocorra uma redução na eficiência após múltiplos usos, o sistema mantém desempenho satisfatório nos primeiros ciclos. A reutilização de resíduos plásticos como suporte fortalece os princípios da economia circular, propondo uma abordagem ambientalmente responsável para o tratamento de efluentes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Referências

1. Lee, S. Y.; Yoo, I.; Singh, R.; Lee, J. J.; Kalanur, S. S.; Seo, H. Enhanced photocatalytic properties of band structure engineered Pd/TiO_2 via sequential doping. *Appl. Surf. Sci.* 2021, 570, 1–12.
2. Chen, B.; Zhang, J.; Wang, R.; He, B.; Jin, J.; Wang, H.; Gong, Y. Rational design of all-solid-state

- TiO_2 - Cu/ZnO Z-scheme heterojunction via ALD-assistance for enhanced photocatalytic activity. *J. Colloid Interface Sci.* 2022, 607, 760–768.
3. Santos, R.; et al. Catalisadores de Au-TiO_2 para fotocatalise de luz visível aprimorada para tratamento sustentável de efluentes têxteis. *Water Air Soil Pollut.* 2025, 236, 297.
4. El-Mekkawi, D. M.; Abdelwahab, N. A.; Mohamed, W. A. A.; Taha, N. A.; Abdel-Mottaleb, M. S. A. Solar photocatalytic treatment of industrial wastewater utilizing recycled polymeric disposals as TiO_2 supports. *J. Clean. Prod.* 2020, 249, 119430.
5. Jianfu, L.; Zheng, L. Microplastic migration and transformation pathways and exposure health risks. *Environ. Pollut.* 2025, 368, 125700.
6. Sindarski, L. G. Z. Ângulo de contato e rugosidade de madeiras: uma breve revisão. *Braz. J. Wood Sci.* 2020, 11(1), 1–11.
7. Hanif, M. A.; Shin, H.; Chun, D.; Kim, H. G.; Kwac, L. K. Photocatalytic VOCs degradation efficiency of polypropylene membranes by incorporation of TiO_2 nanoparticles. *Membranes* 2023, 13, 50.
8. Velásquez, J.; Valencia, S.; Rios, L.; Restrepo, G.; Marín, J. Characterization and photocatalytic evaluation of polypropylene and polyethylene pellets coated with P25 TiO_2 using the controlled-temperature embedding method. *Chem. Eng. J.* 2012, 203, 398–405.
9. Xie, A.; Jin, M.; Zhu, J.; Zhou, O.; Fu, L.; Weihong, W. Photocatalytic technologies for transformation and degradation of microplastics in the environment: current achievements and future prospects. *Catalysts* 2023, 13, 846.