

Síntese *in situ* de heterojunção BiVO₄/V₂O₅ para degradação fotocatalítica de corante em efluente têxtil real

Pedro H. J. Costa¹, Renato P. Sousa^{2*}, Adriel R. Silva¹, Gabriel S. Sales², Glaucyane P. Sousa¹, Rayza B. Lima², Vitoria E. M. Vieira², João F. CruzFilho², Suziete B. S. Gusmão³, Aline E. B. Lima¹, Geraldo E. Luz Jr.^{1,2}

¹Centro de Ciências da Natureza, Universidade Estadual do Piauí (UESPI), R. João Cabral, 2231, 64002-150, Teresina, Piauí.

²Departamento de Química, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Av. Universitária, 64049-550, Teresina, Piauí.

E-mail: renatito.sousa.33046@gmail.com

³Departamento de Física, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Av. Universitária, 64049-550, Teresina, Piauí.

Resumo/Abstract (Helvética, tam. 12)

RESUMO – A fotocatalise heterogênea é uma alternativa promissora capaz de mitigar os efeitos adversos causados por efluentes têxteis industriais em corpos d'água. Por tanto, este trabalho investigou o desempenho fotocatalítico da heterojunção BiVO₄/V₂O₅ sintetizada via *in situ* pelo método dos precursores poliméricos. O desempenho fotocatalítico do BiVO₄/V₂O₅ foi avaliado a partir da remoção do corante Índigo azul presente em efluente têxtil real. Os padrões de difração de raios-X e os espectros Raman confirmaram a formação do BiVO₄/V₂O₅. Os dados ópticos mostraram que o BiVO₄/V₂O₅ exibe uma absorção abrangente na região do visível, com um valor de energia de banda proibida (E_g) de ~2,51 eV. Os testes fotocatalíticos com BiVO₄/V₂O₅ revelaram uma alta eficiência de adsorção do efluente em 30 min de reação no escuro, seguida por uma degradação de 92 % do corante após 150 min de irradiação policromática. A análise de TOC (Total Organic Carbon) evidenciou a remoção de 34 % do carbono orgânico presente no efluente têxtil. Essas descobertas destacam a eficácia do BiVO₄/V₂O₅ na remoção de poluentes orgânicos usando luz solar simulada, contribuindo positivamente para a remediação ambiental.

Palavras-chaves: Tratamento de água, Fotocatalise heterogênea, Efluente têxtil real, BiVO₄/V₂O₅.

ABSTRACT – Heterogeneous photocatalysis is a promising alternative capable of mitigating the adverse effects caused by industrial textile effluents in water bodies. Therefore, this work investigated the photocatalytic performance of the BiVO₄/V₂O₅ heterojunction synthesized *in situ* by the polymer precursor method. The photocatalytic performance of the BiVO₄/V₂O₅ was evaluated from the removal of the Indigo blue dye present in real textile effluent. The X-ray diffraction patterns and Raman spectra confirmed the formation of BiVO₄/V₂O₅. Optical data showed that BiVO₄/V₂O₅ exhibits a broad absorption in the visible region, with a band gap energy (E_g) value of ~2.51 eV. Photocatalytic tests with BiVO₄/V₂O₅ revealed a high adsorption efficiency of the effluent in 30 min of reaction in the dark, followed by a 92 % degradation of the dye after 150 min of polychromatic irradiation. TOC (Total Organic Carbon) analysis showed the removal of 34 % of the organic carbon present in the textile effluent. These findings highlight the effectiveness of BiVO₄/V₂O₅ in removing organic pollutants using simulated sunlight, contributing positively to environmental remediation.

Keywords: Water treatment, Heterogeneous photocatalysis, Real textile effluent, BiVO₄/V₂O₅.

Introdução

A crescente contaminação de corpos d'água por efluentes têxteis industriais representa uma das principais ameaças ao meio ambiente e à saúde pública. O descarte inadequado de efluentes têxteis em águas superficiais tem potencializado a busca por tecnologias mais avançadas de tratamento de águas. A fotocatalise heterogênea surge como uma tecnologia promissora para mitigar os efeitos adversos causados por corantes sintéticos em águas superficiais (1,2). Teoricamente, a fotocatalise heterogênea baseia-se no uso de semicondutores responsivos a luz UV ou visível (natural ou artificial). De acordo com teoria de bandas, sob irradiação ($h\nu > E_g$) ocorre a separação interna de cargas na

banda de valência (BV) para banda de condução (BC) do semicondutor (3). Os elétrons da BV são fotoexcitados para a BC, deixando lacunas na BV. As lacunas geradas são altamente reativas e atuam na formação de ROS (Reactive Oxygen Species) capazes de degradar de forma eficiente moléculas poluentes em meio aquoso (4).

Dentre os diversos semicondutores estudados, o vanadato de bismuto (BiVO₄) tem ganhado considerável interesse devido a boa absorção de luz na região do visível (E_g 2,3 – 2,5 eV), excelente estabilidade química e baixa toxicidade (5). No entanto, o desempenho fotocatalítico do BiVO₄ é limitado pela alta taxa de recombinação de pares elétron-lacuna e baixa área de superfície. Para abordar essas questões, algumas estratégias incluindo a dopagem, controle

morfológico e a construção de heterojunções são usadas para aprimorar o desempenho fotocatalítico do BiVO_4 (6,7). Entre estas, a construção de heterojunções baseadas em BiVO_4 foi proposta como uma estratégia eficaz. Por exemplo, Liaqat *et al.* (2023) sintetizaram A heterojunção $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$ e relataram uma vida útil mais prolongada dos pares elétron-lacuna em comparação aos materiais puros (8), revelando o potencial da engenharia de interface para melhorar o desempenho fotocatalítico da heterojunção.

Tradicionalmente, tais heterojunções são obtidas por metodologias pós-síntese, como impregnação e deposição, que muitas vezes resultam em contatos físicos limitados e baixa eficiência de transferência de carga entre as fases (9). Nesse sentido, a síntese *in situ* de heterojunções tem se consolidado como uma estratégia superior para promover a formação de interfaces íntimas e bem acopladas entre os componentes, o que favorece a migração eficiente dos portadores de carga, reduz significativamente a taxa de recombinação e aumenta a área de superfície (10,11). Nesse contexto, o óxido de vanádio (V_2O_5) surge como uma opção atraente para a formação *in situ* de uma heterojunção baseada em BiVO_4 devido a estrutura de bandas favorável, excelente absorção de luz visível ($E_g \sim 2,2$ eV), alta área de superfície e, principalmente, o uso comum de precursores de síntese (12).

Portanto, o presente trabalho investigou o desempenho fotocatalítico da heterojunção $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ sintetizado via *in situ* pelo método dos precursores poliméricos. A atividade fotocatalítica do $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ foi avaliada a partir da degradação do corante Índigo azul presente em efluente têxtil real. Além disso, este estudo traz contribuições relevantes acerca do potencial da síntese *in situ* na construção de heterojunções com interface aprimorada e discute o $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ como uma solução promissora para o enfrentamento da poluição de águas superficiais.

Experimental

Materiais e Reagentes

Os materiais e reagentes utilizados nesta pesquisa foram: O metavanadato de amônio (NH_4VO_3), ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$), nitrato de bismuto pentahidratado ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) foram adquiridos da Sigma-Aldrich (Merck Co.). O álcool isopropílico ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$), hidróxido de amônio (NH_4OH), acetona ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) e etilenoglicol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) foram adquiridos da Dinâmica Química Contemporânea. Água ultrapura foi utilizada nos estudos.

Síntese *in situ* da heterojunção $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$

A heterojunção $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ foi sintetizada via *in situ* usando o método dos precursores poliméricos (PP) (13). O processo se inicia com a preparação de uma solução de

citrato de vanádio (Cit-V), no qual 17,38 g de ácido cítrico foram dissolvidos em água ultrapura à temperatura ambiente. Em seguida, 7,57 g de NH_4VO_3 foram adicionados à solução sob aquecimento a 85 °C, permanecendo em agitação por 5 h, até a completa dissolução dos reagentes. Após esse período, foi adicionado lentamente o NH_4OH até que o pH da mistura atingisse valores próximos de 7,0. Na sequência, 1,1951 g $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ foi incorporado à solução contendo o Cit-V, sob agitação constante e mantendo-se a temperatura em torno de 90 °C, até que uma solução clara e homogênea fosse obtida. Em seguida, mais ácido cítrico foi introduzido à solução para dar início à reação de poli esterificação, respeitando uma razão molar de 3:1 entre o ácido cítrico e o $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Também foi adicionado etileno glicol, em proporção mássica de 60:40 em relação ao ácido cítrico, com o objetivo de favorecer a formação da matriz polimérica. A mistura foi mantida sob aquecimento suave até que toda a água evaporasse, levando à formação de uma resina polimérica viscosa. Essa resina foi então submetida a um tratamento térmico inicial em forno tipo mufla com fluxo de ar, a 350 °C por 10 h, com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1} . Por fim, o material obtido foi calcinado a 500 °C por 2 h, com uma taxa de aquecimento mais lenta (1 °C min^{-1}), resultando no pó amarelado de $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ com maior cristalinidade.

Caracterizações

As propriedades estruturais da amostra de $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ foi investigada usando a técnica de difração de raios-X (DRX), a partir de um difratômetro Bruker D8 Advance, detector linear LynxEye-XE e radiação $\text{CuK}\alpha$ (1,5405 Å), operando a 40 kV/40 mA. Os difratogramas foram registrados em um intervalo de $2\theta = 10$ a 110°, com um passo de 0,01° e um tempo de contagem de 0,5 segundos por passo. O refinamento pelo método Rietveld foi usado para obter dados mais precisos da estrutura cristalina das amostras, usando o software FullProf Suite (V. July 2023). A estrutura do material também foi investigada por espectroscopia Raman, usando um espectrômetro Bruker Senterra Raman equipado com um microscópio Olympus BX51, detector de dispositivo de carga acoplada, e um laser operando a 785 nm. Os espectros foram obtidos a partir de três acumulações de 20 s com potência de saída do laser de 25 mW e resolução de 4 cm^{-1} na região entre 1200 cm^{-1} e 85 cm^{-1} . As propriedades ópticas da amostra foram avaliadas por espectroscopia de Reflectancia Difusa na região do Ultravioleta e visível (UV-Vis/DRS), usando um espectrofotômetro Shimadzu UV-2600, com faixa de varredura de 800 a 200 nm.

Testes fotocatalíticos

A atividade fotocatalítica da heterojunção $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ foi avaliada a partir da degradação do corante Índigo azul (Azul jeans) em efluente têxtil real. Inicialmente, 50 mg de fotocatalisador foi adicionado em uma célula catalítica contendo 100 mL de efluente têxtil. Os testes foram conduzidos por um período de 180 min, sendo 30 min de reação no escuro, seguido de 150 min de irradiação policromática usando um simulador solar equipado com lâmpada de vapor metálico (4000 W), ajustado a 30 cm da célula catalítica. A eficiência de degradação do corante foi monitorada por espectroscopia de fotoabsorção no UV-Vis/DRS, avaliando-se o pico máximo de absorção do corante Azul Jeans ($\lambda_{\text{max}} \sim 671,5 \text{ nm}$). Além disso, a eficiência de degradação do corante foi avaliada por análise de TOC, usando um equipamento Shimadzu TOC-L programado no modo de carbono orgânico não purgável (NPOC).

Resultados e Discussão

Propriedades estruturais: DRX e Raman

A caracterização estrutural por difração de raios-X foi usada para avaliar a estrutura cristalina e pureza da amostra $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$. A Figura 1(a) apresenta os padrões de DRX da amostra de $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$. Os principais picos observados em $2\theta \approx 19,1^\circ$, 29° , $30,7^\circ$ e $34,6^\circ$ no difratograma do $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ confirma a formação predominante da fase monoclinica do BiVO_4 , com grupo espacial $III\ 2/b$, consistente com a carta ICSD nº 100603 (14). Em adição, picos de DRX em $2\theta \approx 20,3^\circ$, $26,3^\circ$, $31,1^\circ$, e $41,2^\circ$ são compatíveis com a carta ICSD nº 60767, indicando a presença da fase ortorrômbica de V_2O_5 na amostra, com grupo espacial $PmmnZ$ (15), confirmando a formação da heterojunção $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$. A Figura 1(b) apresenta os dados do refinamento Rietveld da heterojunção $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$, indicando 77,15 % de BiVO_4 e 22,85 % de V_2O_5 na amostra.

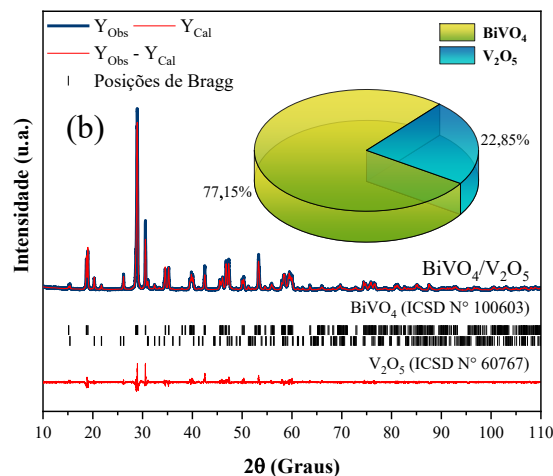
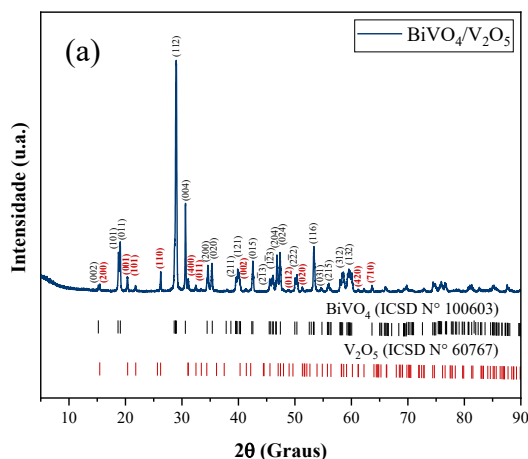


Figura 1. (a) Difratomogramas de raios-X e (b) refinamento pelo método Rietveld da amostra $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ (Fatores de confiabilidade: $R_p = 16,9$; $R_{exp} = 19,06$; $R_{wp} = 19,3$; $\chi^2 = 1,03$).

Espectroscopia Raman

A espectroscopia por espalhamento Raman foi usada para investigar a estrutura da heterojunção $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$. Como mostra a Figura 2, o espectro Raman da amostra $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ exibiu duas bandas em 342 cm^{-1} e 814 cm^{-1} referentes a modos vibracionais característicos da fase monoclinica BiVO_4 , especificamente, a vibrações presentes nos tetraedros de (VO_4^{3-}) (16). O modo vibracional em 814 cm^{-1} foi atribuído a estiramentos simétricos (Ag) de ligações V–O (17).

Adicionalmente, as bandas localizadas em 142 cm^{-1} , 194 cm^{-1} , 282 cm^{-1} , 406 cm^{-1} , 696 cm^{-1} e 994 cm^{-1} são modos vibracionais característicos da fase ortorrômbica de V_2O_5 (17). O modo intenso em 142 cm^{-1} foi atribuído a vibrações simétricas (B_{3g}) de ligações V–O–V (18). O modo vibracional em 994 cm^{-1} está associado a estiramentos simétricos (Ag) em vibrações de oxigênio terminal nas ligações V=O (19). Os modos em 406 e 282 cm^{-1} são referentes a vibrações de flexão nas ligações V=O, enquanto o modo em 478 cm^{-1} pode ser atribuído a vibrações de flexão nas ligações V–O–V (17). O modo vibracional em 696 cm^{-1} está relacionado a estiramentos em ligações V_2O (18,19). Esses dados trazem evidências reais da formação da heteroestrutura $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$, consistente com os resultados de DRX.

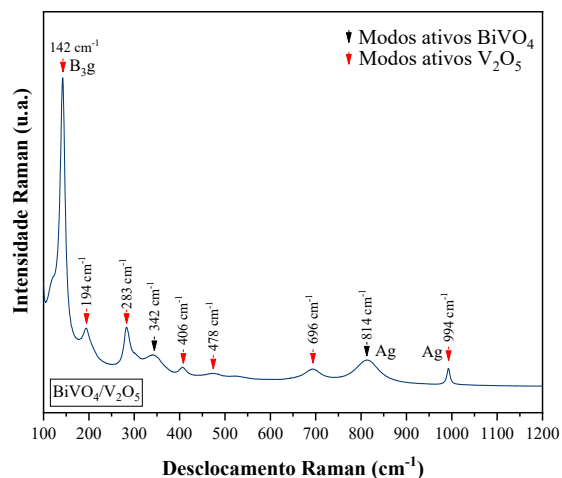


Figura 2. Espectro Raman da amostra de BiVO₄/V₂O₅.

Propriedades Ópticas: UV-Vis

A **Figura 3(a)** apresenta as curvas de absorvância da heterojunção sintetizada. O BiVO₄/V₂O₅ exibiu uma banda de absorção bastante pronunciada na região do visível (~560 nm), consistente com estudos previamente relatados (5,10). A **Figura 3(b)** exibe os dados da estimativa do E_g da heteroestrutura BiVO₄/V₂O₅. A estimativa do E_g foi feita usando a função de Kubelka-Munk (Eq. (1)), a partir dos dados de reflectância obtidos por UV-Vis/DRS.

$$F(R_{\infty}) = \frac{k}{s} = \frac{(1-R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} \quad (1)$$

Onde R_{∞} é o parâmetro de reflectância de uma camada “infinitamente” espessa e opaca, k e s são os coeficientes de absorção e dispersão respectivamente. O valor de E_g calculado para o BiVO₄/V₂O₅ foi de ~2,51 eV.

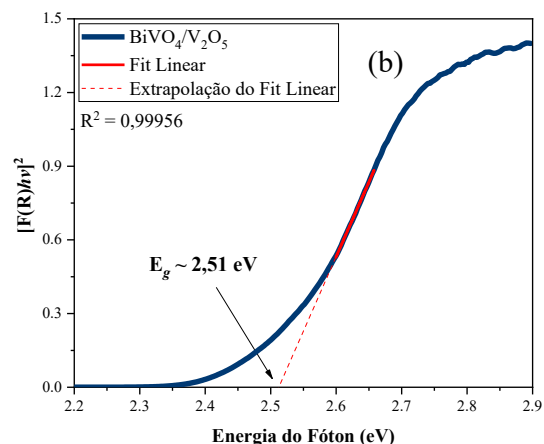
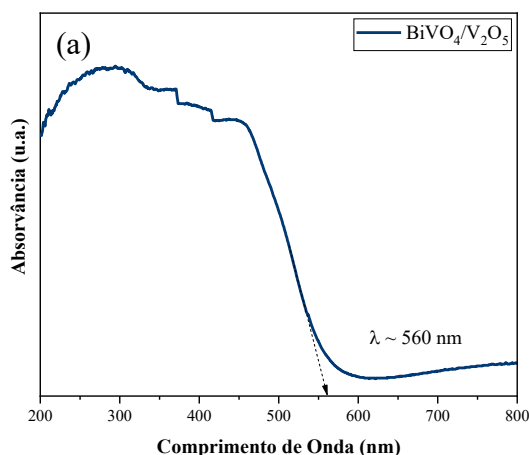
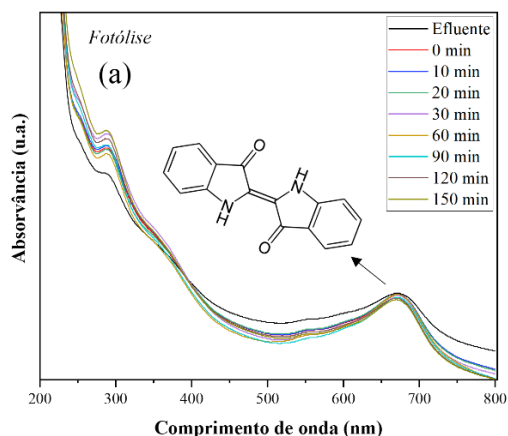


Figura 3. (a) Curvas de absorvância da amostra de BiVO₄ e (b) estimativa do E_g para o BiVO₄/V₂O₅.

Atividade Fotocatalítica

Com o avanço do tempo de irradiação (até 150 min, sem catalisador), nota-se uma pequena redução na intensidade da banda do efluente ($\lambda_{\max} \sim 671,5$ nm), aproximadamente 7 % (**Figura 4(a)**). Esse resultado sugere que, embora a fotólise contribua parcialmente para a quebra da estrutura do poluente, ela é ineficiente como processo isolado para promover a degradação significativa da carga orgânica total do efluente. Por outro lado, o teste fotocatalítico feito com o fotocatalisador BiVO₄/V₂O₅ revelou que, em um tempo de 150 min de irradiação policromática, cerca de 92 % do efluente têxtil foi mineralizado (**Figura 4(b-c)**). Tal resultado foi evidenciado pela mudança na cor da solução, conforme mostrado na imagem inserida na **Figura 4(c)**. Além disso, em 30 min de reação no escuro (especificamente 10 min), foi observado uma elevada eficiência de adsorção, o que pode ter favorecido o excelente desempenho fotocatalítico alcançado com o BiVO₄/V₂O₅. Notavelmente, a interface gerada pela presença de V₂O₅, possivelmente, aumentou o tempo de recombinação de cargas e a área superficial em BiVO₄/V₂O₅, benéfico para o desempenho fotocatalítico (10).



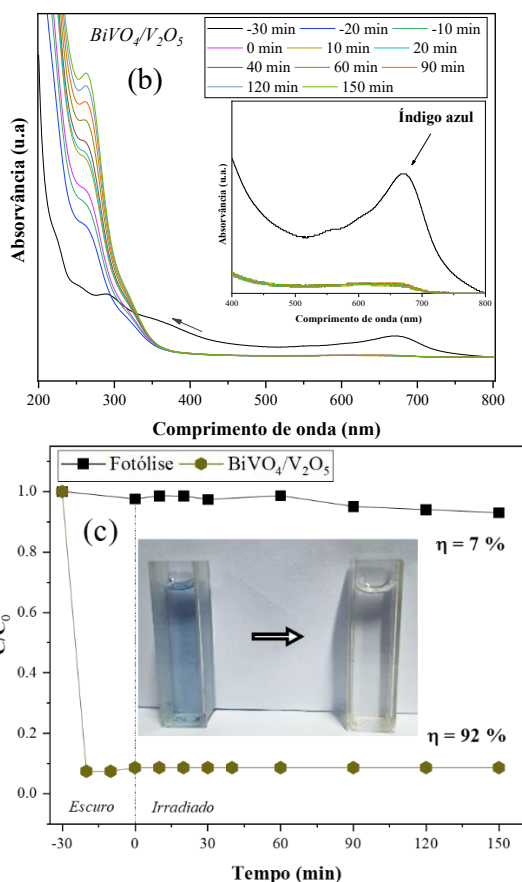


Figura 4. Testes fotocatalíticos: (a) Fotólise, (b) teste feito com BiVO₄/V₂O₅ e (c) curvas cinéticas (C/C₀) dos testes de degradação fotocatalítica do efluente têxtil, usando irradiação policromática.

A análise de TOC, apresentada na Figura 5, evidenciou que o BiVO₄/V₂O₅ promoveu uma redução de ~34% no teor de carbono orgânico presente na amostra de efluente têxtil, passando de 21 mg L⁻¹ para cerca de 13,9 mg L⁻¹ após 150 min de tratamento sob irradiação policromática. Esse resultado indica uma eficiência significativa na mineralização parcial dos compostos orgânicos presentes no efluente têxtil. No entanto, a eficiência observada por UV-Vis foi substancialmente superior, atingindo 92 %, o que sugere que a degradação fotocatalítica mediada por BiVO₄/V₂O₅ impactou diretamente nos grupos cromóforos do corante Azul Jeans ($\lambda_{\text{max}} \sim 671,5 \text{ nm}$) (20). Essa hipótese é corroborada pelo desaparecimento visual da coloração do efluente têxtil, conforme mostrado na imagem inserida na Figura 4(c). A discrepância entre os resultados de UV-Vis/DRS e TOC pode ser atribuída à formação de subprodutos orgânicos incolorés, que apresentam absorção em comprimentos de onda inferiores a 300 nm, indicando a geração de intermediários orgânicos voláteis durante o processo fotocatalítico (21).

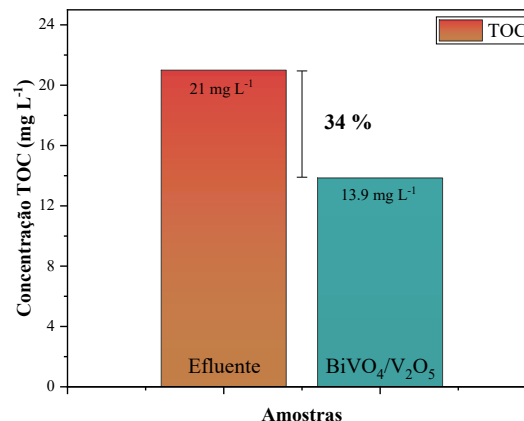


Figura 5. Análise de TOC do efluente têxtil e da amostra degradada com o BiVO₄/V₂O₅, usando irradiação policromática.

Adicionalmente, os dados de TOC indicaram que a degradação do corante promovida pelo BiVO₄/V₂O₅ sob irradiação policromática foi bem-sucedida, sendo precedida por um processo expressivo de adsorção na superfície do fotocatalisador (22). Esse comportamento ressalta o papel crucial da luz visível na ativação fotoinduzida do BiVO₄/V₂O₅, promovendo a geração de ROS, como o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), responsáveis pela oxidação e subsequente mineralização de poluentes (23). O desempenho fotocatalítico da heterojunção BiVO₄/V₂O₅, sintetizada pelo método PP, foi comparado com outros estudos da literatura e os dados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação do desempenho fotocatalítico do BiVO₄/V₂O₅ sintetizado pelo método PP com outros estudos da literatura.

Fotocatalisador	Método de síntese	Poluente	Eficiência (%)	Ref.
TiO ₂ /BiVO ₄	Hidrotermal	AM e TC	87 % e 72 % em 120 min	(8)
BiVO ₄ /g-C ₃ N ₄	Solvothermal	AM	88 % / 120 min	(24)
Bi ₄ V ₂ O ₁₁ /BiVO ₄	Hidrotermal	RB	91 % / 90 min	(25)
BiVO ₄ /V ₂ O ₅	PP	Índigo azul (Efluente têxtil real)	92 % / 150 min	Este trabalho

PP: Precursores poliméricos. AM: Azul de Metileno. TC: Tetraciclina. RB: Rodamina B.

Portanto, os resultados obtidos evidenciam a eficácia do BiVO₄/V₂O₅ como fotocatalisador na degradação de corantes sintéticos em efluentes têxteis reais usando luz solar simulada.

Conclusões

Com base nos resultados, a heterojunção $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ foi sintetizada com sucesso pelo método dos precursores poliméricos. As análises estruturais indicaram a presença de V_2O_5 na amostra, confirmando a formação *in situ* da heteroestrutura $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$. Os dados de UV-Vis/DRS revelaram uma ampla banda de absorção na região do visível, com uma banda proibida de $\sim 2,51\text{eV}$ para o $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$. Os testes fotocatalíticos evidenciaram uma alta eficiência de adsorção do corante Índigo azul em 30 min de reação no escuro, acompanhado de 92 % de degradação após 150 min de irradiação policromática com o $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$. Além disso, a análise de TOC revelou uma redução de 34 % do carbono orgânico presente no efluente têxtil. Esses resultados destacam o potencial da heterojunção $\text{BiVO}_4/\text{V}_2\text{O}_5$ com interface aprimorada para a remoção fotocatalítica de corantes em efluentes têxteis reais usando luz solar, contribuindo positivamente para a remediação ambiental.

Agradecimentos

Os autores são gratos ao CNPq pelo financiamento da pesquisa, as universidades UESPI e UFPI pelo apoio e suporte técnico na realização deste trabalho.

Referências

- (1) Islam, T.; Repon, M. R.; Islam, T.; Sarwar, Z.; Rahman, M. M. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **2023**, *30*, 9207–9242.
- (2) Kumar, R.; Sudhaik, A.; Kumar, D.; Devi, R.; Devi, E.; Chawla, A.; Raizada, P.; Hussain, C. M.; Ahamad, T.; Singh, P. J. *Ind. Eng. Chem.* **2025**, *144*, 575–584.
- (3) Nazir, M. A.; Kumar, O. P.; Ali, R.; Hussain, M. D.; Ullah, S.; Rauf, A.; El-Sherbeeney, A. M.; Rehman, A. ur; Shah, S. S. A. *Korean J. Chem. Eng.* **2025**, *42*, 547–561.
- (4) Wang, H.; Li, X.; Zhao, X.; Li, C.; Song, X.; Zhang, P.; Huo, P.; Li, X. *Cuihua Xuebao/Chin. J. Catalysis* **2022**, *43*, 178–214.
- (5) Bai, Y.; Fang, Z.; Fang, Y.; Lin, C.; Bai, H.; Fan, W. *Chem. Commun. (Camb.)* **2025**, *61*, 5264–5280.
- (6) Kamble, G. S.; Natarajan, T. S.; Patil, S. S.; Thomas, M.; Chougale, R. K.; Sanadi, P. D.; Siddharth, U. S.; Ling, Y.-C. *Nanomaterials (Basel)* **2023**, *13*.
- (7) Zhong, X.; Li, Y.; Wu, H.; Xie, R. *Mater. Sci. Eng. B Solid State Mater. Adv. Technol.* **2023**, *289*, 116278.
- (8) Liaqat, M.; Kausar, S.; Iqbal, T.; Afsheen, S.; Younas, A.; Zubair, M.; Syed, A.; Elgorban, A. M.; Wong, L. S. J. *Inorg. Organomet. Polym. Mater.* **2024**, *34*, 3246–3257.
- (9) A., M.; J., M.; Ashokkumar, M.; Arunachalam, P. *Appl. Catal. A Gen.* **2018**, *555*, 47–74.
- (10) Yang, D.; Che, Y.; Wang, M.; Miao, Q.; Fang, D.; Peng, S.; Yi, J.; Yin, Q.; Ruzimuradov, O. *Inorg. Chem. Commun.* **2023**, *155*, 111135.
- (11) Xue, W.; Peng, Z.; Huang, D.; Zeng, G.; Wen, X.; Deng, R.; Yang, Y.; Yan, X. *Ceram. Int.* **2019**, *45*, 6340–6349.
- (12) Li, Y.; Chen, S.; Duan, W.; Nan, Y.; Ding, D.; Xiao, G. *RSC Adv.* **2023**, *13*, 22945–22957.
- (13) Vieira, V. E. M.; Lopes, F. H. P.; Noleto, L. F. G.; Costa, M. J. S.; Silva, R. M. P.; Gusmão, G. O. M.; Cruz-Filho, J. F.; Santos, F. E. P.; Cavalcante, L. S.; Luz, G. E., Jr. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* **2023**, *444*, 114943.
- (14) Sleight, A. W.; Chen, H.-Y.; Ferretti, A.; Cox, D. E. *Mater. Res. Bull.* **1979**, *14*, 1571–1581.
- (15) Enjalbert, R.; Galy, J. *Acta Crystallogr. C* **1986**, *42*, 1467–1469.
- (16) Phuruangrat, A.; Wannapop, S.; Sakhon, T.; Kuntalue, B.; Thongtem, T.; Thongtem, S. *J. Mol. Struct.* **2023**, *1274*, 134420.
- (17) Merupo, V.-I.; Velumani, S.; Ordon, K.; Errien, N.; Szade, J.; Kassiba, A.-H. *CrystEngComm* **2015**, *17*, 3366–3375.
- (18) Lee, S. *Solid State Ion.* **2003**, *165*, 111–116.
- (19) Julien, C.; Haro-Poniatowski, E.; Camacho-López, M. A.; Escobar-Alarcón, L.; Jiménez-Jarquín, J. *Mater. Sci. Eng. B Solid State Mater. Adv. Technol.* **1999**, *65*, 170–176.
- (20) Irani, R.; Ahmet, I. Y.; Jang, J.-W.; Berglund, S. P.; Plate, P.; Höhn, C.; Böttger, R.; Schmitt, S. W.; Dubourdieu, C.; Lardhi, S.; Cavallo, L.; Harb, M.; Bogdanoff, P.; van de Krol, R.; Abdi, F. *Sol. RRL* **2020**, *4*, 1900290.
- (21) Kalikeri, S.; Kodialbail, V. S. *Surf. Interfaces* **2023**, *36*, 102492.
- (22) Liu, Q.; Dong, S.; Jin, H.; Ke, S.; Luo, L.; Huang, T. *J. Environ. Chem. Eng.* **2023**, *11*, 111568.
- (23) Sales, G. S.; França, A. A. C.; Cruz-Filho, J. F.; Moraes, C. A. F.; Silva Neto, A. R.; Sales, A. G. C.; Santos, R. S.; Luz, G. E., Jr. *J. Environ. Chem. Eng.* **2023**, *11*, 110335.
- (24) Reddy, C. V.; Nagar, A.; Shetti, N. P.; Reddy, I. N.; Basu, S.; Shim, J.; Kakarla, R. R. *Chemosphere* **2023**, *322*, 138146.
- (25) Lin, Y.; Cai, H.; Chen, H.; Luo, H. *Appl. Surf. Sci.* **2021**, *544*, 148921.