DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO PET/$BiVO_4$ PARA FABRICAÇÃO DE MEMBRANA FOTOCATALÍTICA APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Railson Silva Ribeiro[(1)]
Possui graduação em Engenharia Civili e Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Atua na Assessoria Técnica da Diretoria de Operação e Manutenção da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão (CAEMA). Desenvolve pesquisas voltadas ao uso de materiais fotocatalíticos aplicados ao tratamento de água e efluentes.
José Miguel Serra Neto[(2)]
Qualificação do Autor 2 Graduado em Engenharia Civil pelo Instituto Federal do Maranhão - IFMA e em Ciências com habilitação em Matemática pela Universidade Estadual do Maranhão - UEMA. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e em Gestão Pública, com ênfase em pessoas, processos e tecnologia aplicados ao setor público. Diretor de Operação e Manutenção na Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - CAEMA.
Leonardo Tadeu Boaes Mendonça [(3)]
Técnico em Análise Química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, graduado em Química Industrial pela Universidade Federal do Maranhão e mestre em Engenharia de materiais pelo IFMA. Doutor em Química Inorgânica pelo departamento de química fundamental trabalhando com síntese por ablação a laser em meio líquido de nanopartículas.
Gricirene Sousa Correia[(4)]
Possui graduação em Engenharia Mecânica Industrial pelo Instituto Federal do Maranhão, mestrado em Engenharia dos Materiais IFMA e doutorado em Ciência de Materiais pela Universidade Federal de Pernambuco. Professora do IFMA EBTT, Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais e Coordenadora do Grupo de Pesquisa de Materiais Poliméricos e Nanoestruturas.

Endereço[(1)]**:** 2ª Travessa Dagmar Desterro, Nº 95 - Bairro de Fátima – São Luís - Maranhão - CEP: 65020-381 - Brasil - Tel: +55 (98) 3227-6721 - e-mail:railson15ribeiro@hotmail.com.

RESUMO

A poluição plástica e os efluentes contaminados por corantes representam importantes desafios ambientais, exigindo estratégias sustentáveis de remediação. Neste trabalho, microfibras de poli(tereftalato de etileno) reciclado (PET) incorporadas com vanadato de bismuto ($BiVO_4$) foram desenvolvidas para degradação fotocatalítica do azul de metileno sob luz visível. O $BiVO_4$ foi sintetizado por método hidrotérmico em diferentes temperaturas (100, 140 e 180 °C), formando fase monoclínica do tipo scheelita, com cristalitos de aproximadamente 45 nm e forte absorção na região visível. O PET proveniente de garrafas pós-consumo foi hidrolisado em ácido nítrico para favorecer a adesão superficial do semicondutor. O compósito PET/$BiVO_4$ foi processado por melt spinning para obtenção de microfibras contínuas. As análises confirmaram a dispersão homogênea do $BiVO_4$ na matriz polimérica, aumento da cristalinidade do PET e band gap estimado em 2,4 eV. Os ensaios fotocatalíticos demonstraram elevada eficiência na degradação do azul de metileno, com melhor desempenho em pH 9. Além disso, as microfibras apresentaram estabilidade estrutural e manutenção da atividade fotocatalítica após cinco ciclos de reutilização, evidenciando potencial para aplicação em tratamento de águas contaminadas e remediação ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Efluentes, $BiVO_4$, fotocatálise.

INTRODUÇÃO

Os plásticos são materiais que se tornaram fundamentais para diversos segmentos da indústria e estão presentes no cotidiano das pessoas em virtude da ampla utilização na fabricação de embalagens, utensílios e equipamentos domésticos, entre outros. Em virtude da geração em larga escala desses produtos e da ausência de descarte adequado, esses materiais causam diversos impactos ao meio ambiente.

A poluição causada pelo descarte de plásticos é atualmente um dos grandes desafios ambientais, em decorrência da produção e do consumo de materiais poliméricos em larga escala e da gestão inadequada desses resíduos. De acordo com Akhbarizadeh (2020), o descarte irregular de resíduos plásticos tem aumentado exponencialmente os impactos em ecossistemas terrestres e aquáticos.

O politereftalato de etileno (PET) é um poliéster amplamente utilizado, tendo como principal aplicação a produção de embalagens, devido a propriedades como leveza, resistência e transparência (Romão, 2009). Por ser um termoplástico, o PET pode ser moldado e remodelado quando aquecido, permitindo sua utilização em diversos processos de fabricação, como extrusão, injeção e termoformagem. No entanto, o descarte inadequado desse material pode causar inúmeros problemas e vem sendo apontado como um risco à saúde pública e à preservação ambiental, pois, em muitos casos, é descartado em lixões, ruas, mares e oceanos, levando em média 200 anos para se decompor em ambiente natural (Istirokhatun, 2025).

A forte presença de micro e nanoplásticos no meio ambiente representa uma ameaça significativa à saúde humana. Em contato com diversos fatores ambientais, os itens plásticos sofrem fragmentação progressiva, gerando micro e nanopartículas que, em razão do aumento da relação área/volume superficial de seus polímeros, podem alterar a reatividade do material e expor seu potencial de toxicidade (Cruz, Almeida, 2023).

Os microplásticos são usualmente definidos como partículas com dimensão inferior a 5 mm e já foram identificados em rios, lagos, reservatórios, águas subterrâneas e sistemas destinados ao abastecimento humano (Barboza, 2018).

Nas últimas décadas, evidências científicas demonstraram que os microplásticos não representam apenas um problema físico de contaminação ambiental, mas também atuam como vetores secundários de poluentes devido à elevada capacidade de adsorção superficial de compostos orgânicos persistentes, metais pesados e hidrocarbonetos aromáticos presentes nos corpos hídricos (Mercês, 2021; Lin, 2020). Em função da elevada razão entre área superficial e volume, bem como de suas características hidrofóbicas, essas partículas podem favorecer processos de transporte, bioacumulação e amplificação da exposição ao longo da cadeia trófica.

Outro poluente presente no meio aquoso é o azul de metileno, um corante catiônico amplamente utilizado em microbiologia, medicina e diagnósticos como agente sensibilizador na foto-oxidação de compostos orgânicos, cuja presença em efluentes exige tratamentos adequados (Macedo, 2020). Esse corante é considerado tóxico, podendo causar diversos efeitos adversos em humanos, como náuseas, vômitos, icterícia e necrose tecidual. Dessa forma, o descarte inadequado de efluentes provoca a poluição dos recursos hídricos, representando riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

Nesse contexto, a preocupação com a poluição da água por esse corante tem impulsionado o desenvolvimento de diversas tecnologias avançadas para o tratamento de águas, como nanofiltração, uso de carvão ativado, oxidação por ozônio e osmose, entre outras alternativas (Pereira, 2018). Entre essas tecnologias, a fotodegradação tem ganhado destaque nas pesquisas, sendo o vanadato de bismuto ($BiVO_4$) apontado como um dos materiais mais promissores para essa aplicação (Andrade, 2023).

O vanadato de bismuto ($BiVO_4$) tem sido estudado como um fotocatalisador promissor ativado por luz visível para reações de foto-oxidação, devido à sua forte absorção luminosa, estreita banda proibida ($Eg \approx 2,4$ eV) e elevada estabilidade fotoeletroquímica em meio aquoso (Zhong, 2023; Ganeshbabu, 2020; Liu 2020) demonstram que a fase monoclínica do tipo scheelita do $BiVO_4$ apresenta desempenho fotocatalítico superior quando comparada às fases tetragonais, principalmente em razão da separação mais eficiente dos pares elétron-lacuna e da maior estabilidade termodinâmica.

Dessa forma, o presente trabalho desenvolveu uma rota para utilização de PET reciclado como suporte para $BiVO_4$, visando à obtenção de microfibras PET/$BiVO_4$ com atividade fotocatalítica induzida por luz visível para degradação do azul de metileno visando a fabricação de uma membrana para ser aplicada em ETE. O compósito obtido foi caracterizado quanto à sua morfologia, cristalinidade e eficiência fotocatalítica. Essa estratégia promove simultaneamente a valorização de resíduos poliméricos e a mitigação da poluição hídrica, oferecendo uma rota sustentável para o desenvolvimento de materiais multifuncionais aplicados ao tratamento de águas residuais e à remediação ambiental.

OBJETIVOS

Geral

Desenvolver e caracterizar um compósito sustentável estruturado em microfibras à base de poli(tereftalato de etileno) (PET) reciclado e vanadato de bismuto ($BiVO_4$), avaliando o seu desempenho e estabilidade operacional na degradação fotocatalítica do corante industrial azul de metileno sob ativação por luz visível.

Específicos

Sintetizar o semicondutor semicristalino $BiVO_4$ via método hidrotérmico, determinando o efeito da variação térmica (100 °C, 140 °C e 180 °C) sobre a consolidação de sua fase cristalina ativa;

Produzir microfibras contínuas do compósito PET/$BiVO_4$ utilizando a tecnologia de fiação por fusão (melt spinning) em escala piloto;

Avaliar a capacidade fotocatalítica do compósito na presença do corante azul de metileno.

METODOLOGIA

Materiais

Foram utilizados ácido nítrico (HNO_3, 65%), metavanadato de amônio (NH_4VO_3), óxido de bismuto (Bi_2O_3) e azul de metileno (MB), todos em grau analítico. O poli(tereftalato de etileno) (PET) foi obtido a partir de garrafas pós-consumo coletadas seletivamente. Água ultrapura foi empregada em todas as etapas experimentais.

Processamento do PET reciclado

As garrafas de PET foram lavadas com água destilada e detergente neutro para remoção de impurezas, sendo posteriormente secas em estufa a 65 °C por 24 h. Em seguida, o material foi cortado em pequenos discos e submetido à hidrólise ácida em solução de HNO_3 sob refluxo a 120 °C por 2 h. Esse tratamento teve como objetivo modificar superficialmente o polímero e favorecer a ancoragem do $BiVO_4$. Após a hidrólise, o material foi lavado com água destilada e seco em estufa a 100 °C.

Síntese hidrotérmica do $BiVO_4$

O $BiVO_4$ foi sintetizado pelo método hidrotérmico utilizando razão molar Bi/V de 1:1. Inicialmente, NH_4VO_3 e Bi_2O_3 foram dissolvidos em solução contendo HNO_3 e água destilada sob agitação constante até obtenção de solução homogênea. Posteriormente, a mistura foi transferida para autoclave e submetida a tratamento hidrotérmico em temperaturas de 100, 140 e 180 °C durante 1 h. Após o resfriamento, o precipitado amarelo obtido foi centrifugado, lavado com água destilada e etanol, e seco a 60 °C por 24 h.

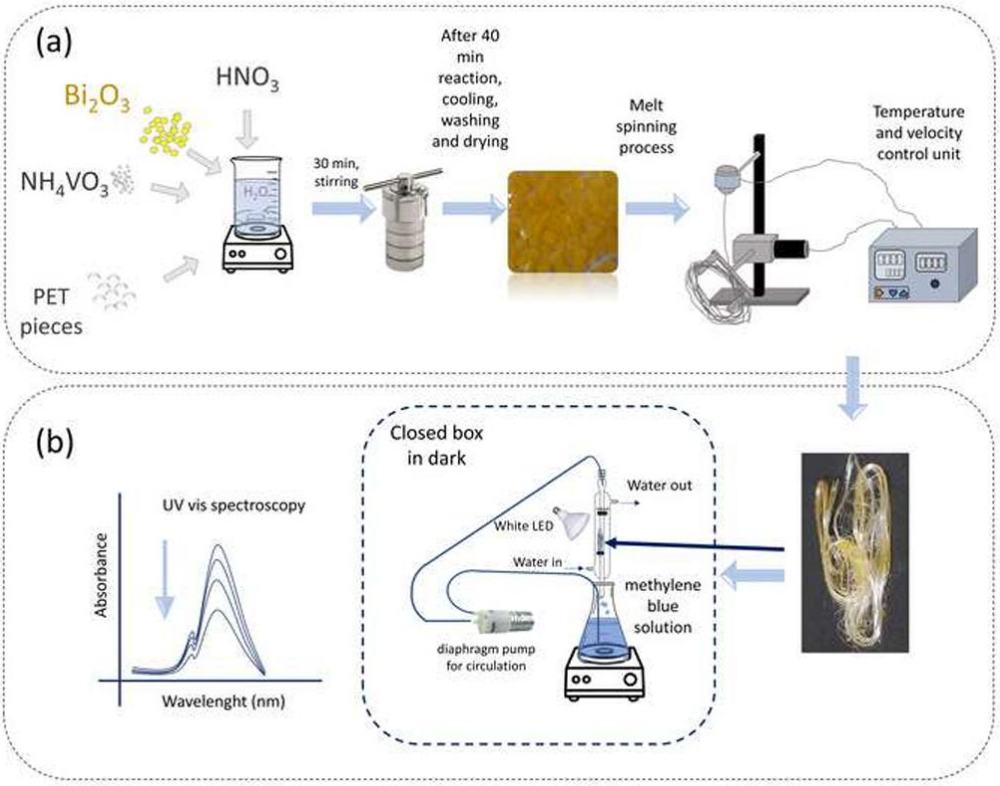
Obtenção do compósito PET/$BiVO_4$

O compósito PET/$BiVO_4$ foi preparado utilizando a condição de síntese mais favorável do $BiVO_4$. O PET previamente hidrolisado foi adicionado à solução precursora antes do tratamento hidrotérmico. Após o processo, o material obtido foi lavado para remoção de resíduos e seco em estufa, formando o compósito PET/$BiVO_4$.

Produção das microfibras por *melt spinning*

As microfibras do compósito foram produzidas por meio da técnica de *melt spinning*. O material foi aquecido a aproximadamente 260 °C até completa fusão e posteriormente extrudado através de um orifício metálico. As fibras contínuas formadas foram coletadas em sistema rotativo, resultando em microfibras com incorporação homogênea do semicondutor.

Figura 1 – Representação esquemática do processo de síntese e produção das fibras (a) e do sistema experimental utilizado nos ensaios fotocatalíticos (b).



Fonte: Autores (2026).

Caracterização dos materiais

Os materiais sintetizados foram caracterizados por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia Raman e difração de raios X (DRX), visando identificar grupos funcionais e fases cristalinas. A morfologia superficial foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada à espectroscopia por dispersão de energia (EDS). As propriedades térmicas foram avaliadas por calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise termogravimétrica (TG). A absorção óptica e o *band gap* foram determinados por espectroscopia UV-Vis.

Ensaios fotocatalíticos

A atividade fotocatalítica das microfibras PET/$BiVO_4$ foi avaliada por meio da degradação do azul de metileno sob irradiação de luz visível utilizando lâmpada LED branca de 11 W. Os ensaios foram realizados em sistema de recirculação contendo solução aquosa de MB, onde as microfibras permaneceram fixadas em coluna de vidro. O monitoramento da degradação foi realizado por espectroscopia UV-Vis em intervalos regulares, utilizando o comprimento de onda máximo do corante (~664 nm). Também foi investigada a influência do pH (4, 7 e 9) na eficiência fotocatalítica, bem como a reutilização do material em cinco ciclos consecutivos.

RESULTADOS

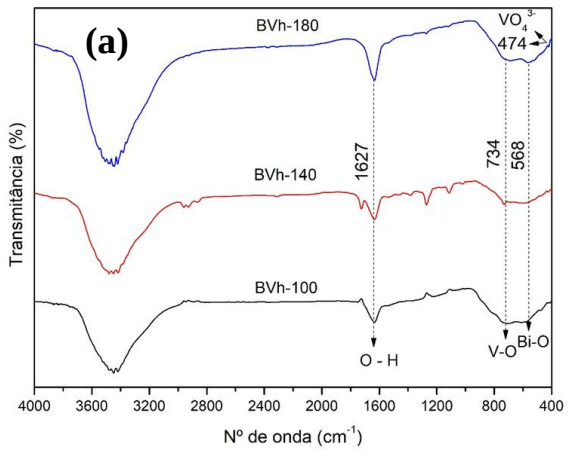
Estrutura química e morfologia $BiVO_4$

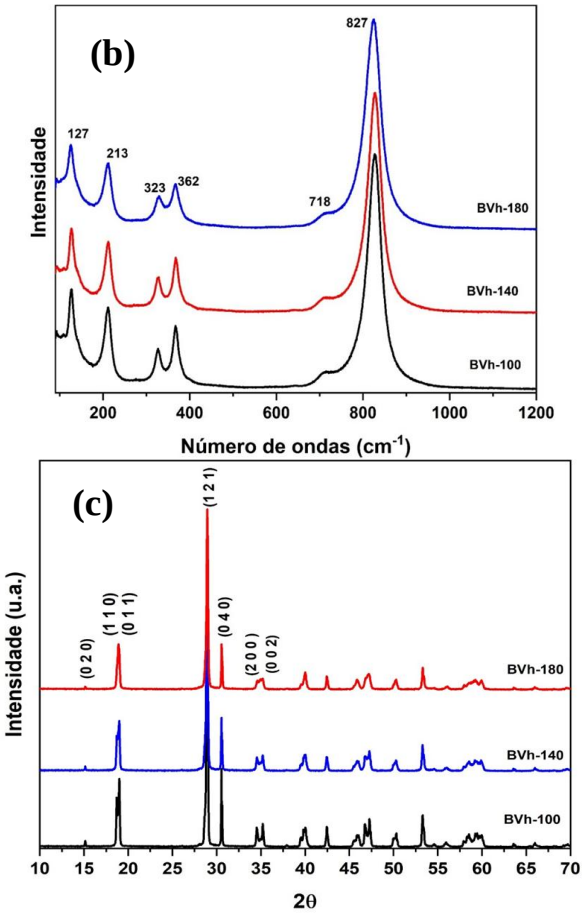
As amostras de $BiVO_4$ sintetizadas a 100, 140 e 180 ºC foram avaliadas por FTIR, Raman e DRX para investigar a influência da temperatura de síntese na formação do material. Os espectros de FTIR Figura 2 (a) apresentaram bandas em 3400–3600 cm^{-1} e 1627 cm^{-1} associadas às vibrações de estiramento e deformação de –OH, indicando hidratação superficial típica de materiais obtidos por síntese hidrotérmica (Luo, 2021). As bandas entre 470 e 734 cm^{-1} foram atribuídas às vibrações V–O e Bi–O dos tetraedros VO_4, características da fase monoclínica tipo scheelita do $BiVO_4$. A ausência de bandas relacionadas a Bi_2O_3 ou V_2O_5 confirma a formação da fase desejada (Ganeshbabu, 2020).

Os espectros Raman Figura 2 (b) exibiram picos característicos do $BiVO_4$ monoclínico em 184, 329 e 802 cm^{-1} (Srinivasan, 2022), além de bandas atribuídas aos modos de estiramento e deformação dos tetraedros VO_4^{3-}. Os modos externos observados em 127 cm^{-1} e 213 cm^{-1} indicam elevada cristalinidade do material (Ganeshbabu, 2020).

Os difratogramas de DRX Figura 2 (c) confirmaram a estrutura monoclínica tipo scheelita, com reflexões em 2θ = 15,1°, 19,0°, 28,9°, 30,7°, 35,3°, 42,5°, 47,3° e 53,3°, correspondentes aos planos cristalográficos da ficha JCPDS nº 14-0688. O tamanho de cristalito, calculado pela equação de Debye–Scherrer (Kim, 2014; Zhang, 2020), foi de 48,80 nm para BVh-100, 35,76 nm para BVh-140 e 45,33 nm para BVh-180. Os índices de cristalinidade variaram entre 56,9% e 57,6%, indicando que temperaturas mais elevadas favoreceram maior ordenamento estrutural.

Figura 02 – (a) Espectros de FTIR, (b) Raman e (c) difratogramas de DRX das amostras de $BiVO_4$ sintetizadas por via hidrotérmica a 100 °C (BVh-100), 140 °C (BVh-140) e 180 °C (BVh-180).



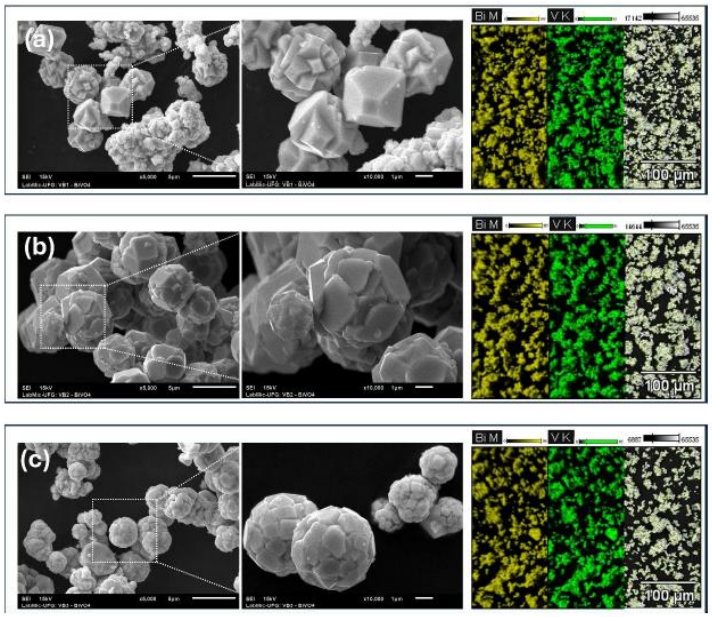


Fonte: Autores (2026).

As micrografias de MEV apresentadas na Figura 3a-c mostram a evolução morfológica das partículas em função da temperatura de síntese. Na amostra BVh-100, observaram-se aglomerados irregulares com partículas heterogêneas e alguns cristais poliédricos bem definidos. Para a amostra BVh-140, as partículas apresentaram maior uniformidade, formando placas poliédricas compactas organizadas em aglomerados quase esféricos. Já a amostra BVh-180 exibiu microesferas densas constituídas por subunidades facetadas menores, resultando em uma estrutura mais homogênea. Essa transformação progressiva está associada ao aumento da taxa de nucleação e à redução da anisotropia de crescimento em temperaturas mais elevadas, favorecendo um crescimento cristalino mais isotrópico. Estudos anteriores também demonstram que parâmetros como tempo reacional, pH e uso de surfactantes influenciam diretamente a morfologia e a eficiência fotocatalítica do $BiVO_4$ (Tan, 2016; Deebasree, 2018).

O mapeamento elementar Figura 3 revelou distribuição homogênea de bismuto (Bi) e vanádio (V) em todas as amostras, confirmando a formação do $BiVO_4$ sem segregação elemental significativa. Esses resultados indicam que as mudanças morfológicas observadas estão relacionadas principalmente à dinâmica de cristalização induzida pela temperatura de síntese.

Figura 3 – Micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e mapeamento elementar das amostras (a) BVh-100, (b) BVh-140 e (c) BVh-180.



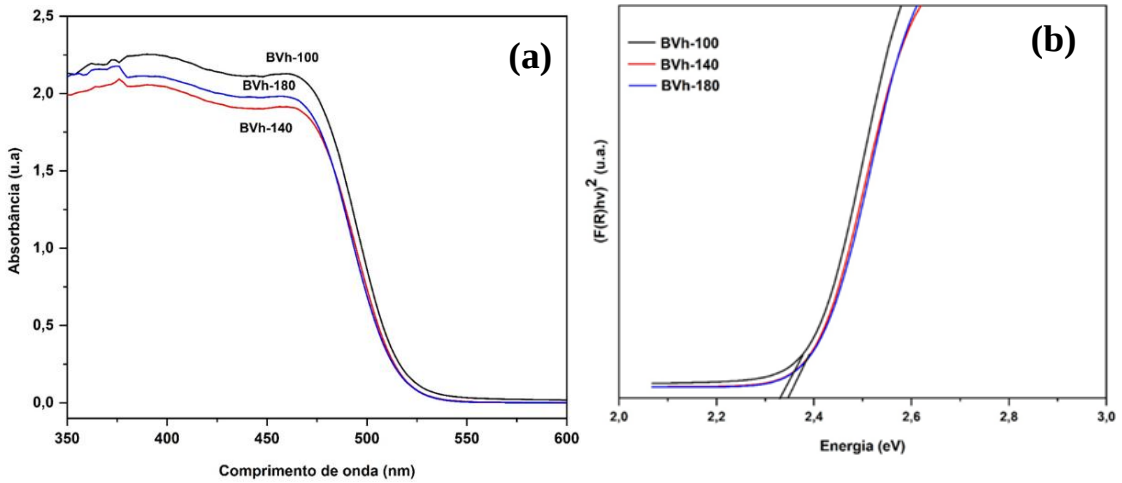
Fonte: Autores (2026).

Propriedades ópticas do $BiVO_4$

O comportamento óptico das amostras de $BiVO_4$ foi investigado por UV-Vis. Conforme mostrado na Figura 4, todas as amostras apresentaram intensa absorção nas regiões do ultravioleta e visível, com borda de absorção em torno de 500 nm, característica da fase monoclínica tipo scheelita. Essa absorção está associada às transições eletrônicas dos orbitais Bi 6s para V 3d, em concordância com os resultados obtidos por DRX e Raman.

Os valores de band gap óptico (Eg) foram estimados a partir dos gráficos de Tauc utilizando a função de Kubelka–Munk. Os valores obtidos foram de 2,38 eV, 2,39 eV e 2,40 eV para as amostras BVh-100, BVh-140 e BVh-180, respectivamente, em concordância com valores reportados para o $BiVO_4$ monoclínico. O leve aumento do Eg com a elevação da temperatura de síntese sugere redução de defeitos estruturais e maior ordenamento cristalino em condições térmicas mais elevadas.

Figura 4 – Espectros de absorção UV-Vis e gráficos de Tauc (inserção) das amostras BVh-100, BVh-140 e BVh-180.



Fonte: Autores (2026).

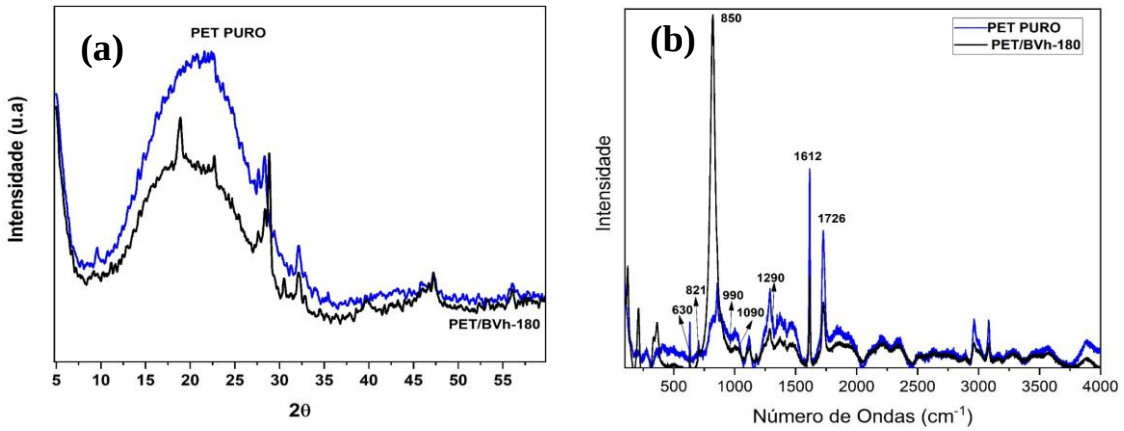
Estrutura química e morfologia do PET e dos compósitos PET/$BiVO_4$

Com base nos resultados da síntese do $BiVO_4$, a amostra BVh-180 foi selecionada para a preparação do compósito devido à sua maior cristalinidade e morfologia mais homogênea, características favoráveis ao desempenho fotocatalítico. A rota hidrotérmica em meio ácido também favoreceu a hidrólise do PET, facilitando a incorporação do semicondutor à matriz polimérica.

As análises de DRX e Raman do PET puro e dos compósitos PET/$BiVO_4$ são apresentadas na Figura 5 (a, b). Nos difratogramas de DRX Figura 5 (a), a incorporação do $BiVO_4$ resultou no aparecimento de picos adicionais em aproximadamente 18° e 30°, característicos da fase monoclínica tipo scheelita, confirmando a formação do material no compósito. Além disso, o deslocamento do principal pico do PET de 22° para 18° sugere redução do ordenamento cristalino e/ou diminuição do tamanho médio dos cristalitos próximos ao $BiVO_4$, mantendo-se, entretanto, o caráter semicristalino do polímero (Wang, 2019).

O espectro Raman do PET puro apresentou bandas características em 630, 850 e 990 cm^{-1} (vibrações C–H), 1090 cm^{-1} (C–O–C), 1290 cm^{-1} (deformação CH_2), 1612 e 3079 cm^{-1} (anel aromático) e 1726 cm^{-1} (estiramento C=O) (Zhao, 2026). Nos compósitos, essas bandas permaneceram preservadas, além do surgimento de uma banda intensa em ~850 cm^{-1} atribuída ao estiramento simétrico V–O do $BiVO_4$, confirmando a incorporação do fotocatalisador na matriz polimérica Figura 5 (b).

Figura 5 – (a) Difratogramas de DRX e (b) espectros Raman do PET puro e do compósito PET/$BiVO_4$.

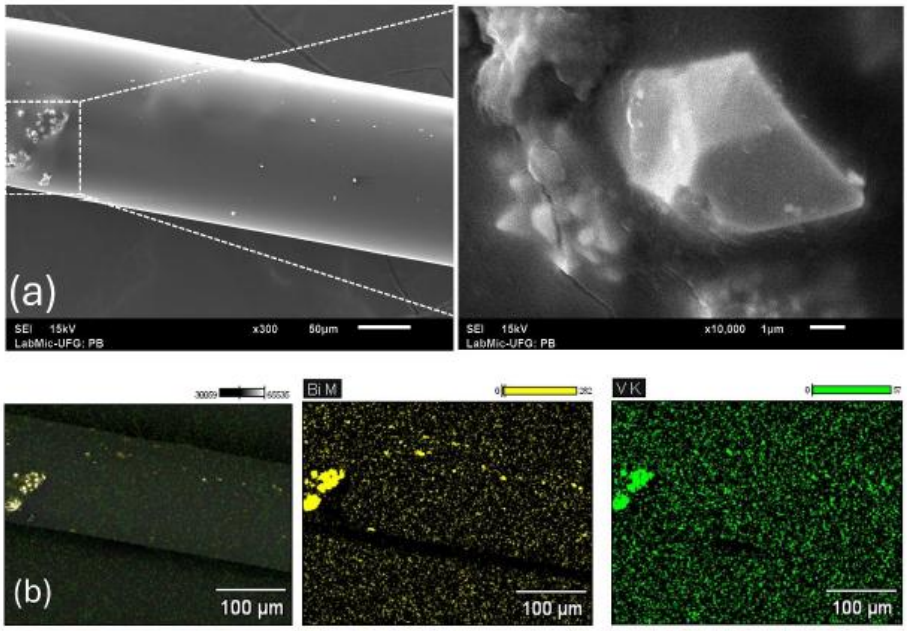


Fonte: Autores (2026).

As microfibras de PET/$BiVO_4$ analisadas por MEV na Figura 6 apresentaram partículas de $BiVO_4$ homogeneamente dispersas e parcialmente incorporadas à superfície das microfibras de PET, que exibiram diâmetro médio de aproximadamente 150 µm. As partículas mantiveram sua morfologia poliédrica característica, indicando preservação da estrutura cristalina do $BiVO_4$ e eficiente adesão interfacial à matriz polimérica.

Além disso, o mapeamento elementar apresentado na Figura 6 (b) revelou distribuição uniforme dos elementos Bi e V sobre a superfície das microfibras de PET, confirmando a boa incorporação e aderência do $BiVO_4$ à matriz polimérica.

Figura 6 – (a) Micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e (b) análises por espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) das microfibras de PET/$BiVO_4$.



Fonte: Autores (2026).

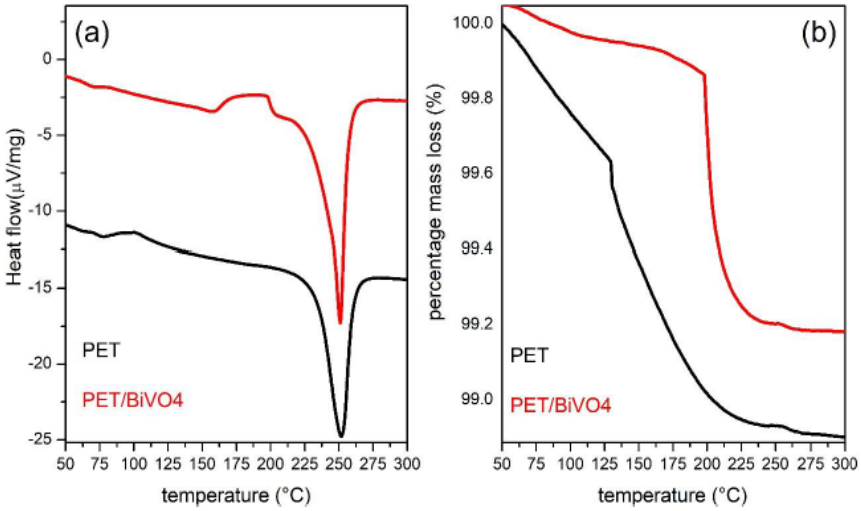
Análise térmica das microfibras de PET e PET/$BiVO_4$

A Figura 7 (a) apresenta os termogramas de DSC do PET puro e do compósito PET/$BiVO_4$. Ambas as amostras exibiram um pico endotérmico entre 240–260 °C, característico da temperatura de fusão (T_m) do PET semicristalino (Wang, 2018). A presença de um único pico dominante indica que a incorporação de $BiVO_4$ não promoveu a formação de novas fases cristalinas na matriz polimérica. Entretanto, observou-se redução na intensidade do pico de fusão para o compósito PET/$BiVO_4$, sugerindo diminuição da entalpia de fusão e do grau de cristalinidade do PET. O alargamento do pico também indica maior heterogeneidade estrutural, provavelmente devido à restrição da mobilidade das cadeias poliméricas causada pelo material inorgânico.

Comportamento semelhante já foi reportado em compósitos PET/ZnO e PET/TiO_2, nos quais as partículas inorgânicas dificultam o empacotamento regular das cadeias de PET e reduzem o crescimento cristalino (Wang, 2018; Shahat, 2025).

As curvas termogravimétricas Figura 7 (b) mostraram que ambas as amostras apresentaram elevada estabilidade térmica até 300 °C, com perdas de massa inferiores a 1%. O PET puro exibiu perda de massa gradual com o aumento da temperatura, associada à liberação de compostos de baixa massa molecular e processos termo-oxidativos iniciais. Já o compósito PET/$BiVO_4$ apresentou menor perda de massa e maior estabilidade térmica, atribuídas à presença do $BiVO_4$, que atua como barreira térmica e reduz a difusão de produtos voláteis de degradação. Além disso, o material inorgânico favorece a dissipação de calor e retarda a degradação das cadeias poliméricas. Resultados semelhantes foram observados em compósitos PET contendo ZnO e TiO_2 (Shahat, 2025; Wang, 2023).

Figura 7 – (a) Análises térmicas por DSC e (b) TG do PET puro e do compósito PET/BVh-180.



Fonte: Autores (2026).

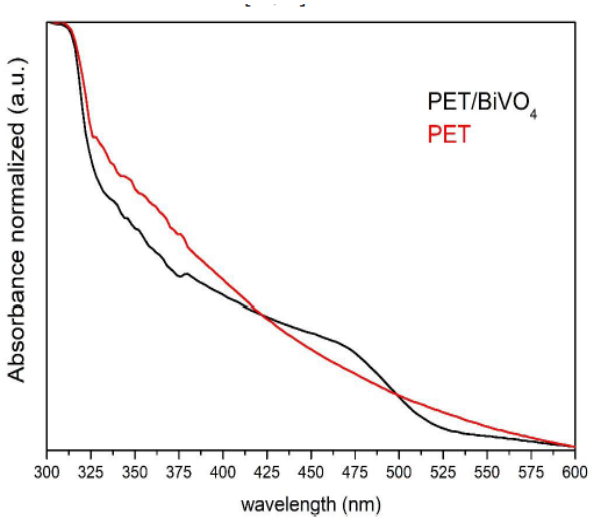
Propriedades ópticas das microfibras de PET/$BiVO_4$

Os espectros de absorção UV-Vis do PET puro e das microfibras de PET/$BiVO_4$ são apresentados na Figura 8. O PET puro exibiu uma banda de absorção em torno de 300 nm, atribuída às transições eletrônicas π→π dos anéis aromáticos da cadeia polimérica, permanecendo transparente na região do visível (Zhong, 2023).

Por outro lado, o compósito PET/$BiVO_4$ apresentou uma banda adicional entre 475 e 500 nm, característica do $BiVO_4$. Observou-se ainda que a absorção do compósito se estende acima de 550 nm, indicando que a formação do material na forma de microfibras favorece o aumento da absorção na região visível.

Os valores de band gap (Eg) não puderam ser determinados para o PET puro devido à sua absorção predominantemente na região do UV. Para o compósito PET/$BiVO_4$, o valor estimado de Eg foi de aproximadamente 2,36 eV, em concordância com valores teóricos e reportados na literatura para o $BiVO_4$ monoclínico (Lin, 2013; Kudo, 1999).

Figura 8 – Espectros de absorção UV-Vis das microfibras do compósito PET/$BiVO_4$ e da fibra de PET puro.



Fonte: Autores (2026).

Atividade fotocatalítica de microfibras PET/$BiVO_4$

A eficiência de degradação do azul de metileno (MB) na presença de microfibras PET/$BiVO_4$ foi investigada. A metodologia empregada neste trabalho consistiu em fazer circular a solução do corante através da fibra inserida em uma coluna de vidro. Dessa forma, os testes foram conduzidos de maneira mais conveniente, sem necessidade de centrifugação, uma vez que o semicondutor está imobilizado na fibra.

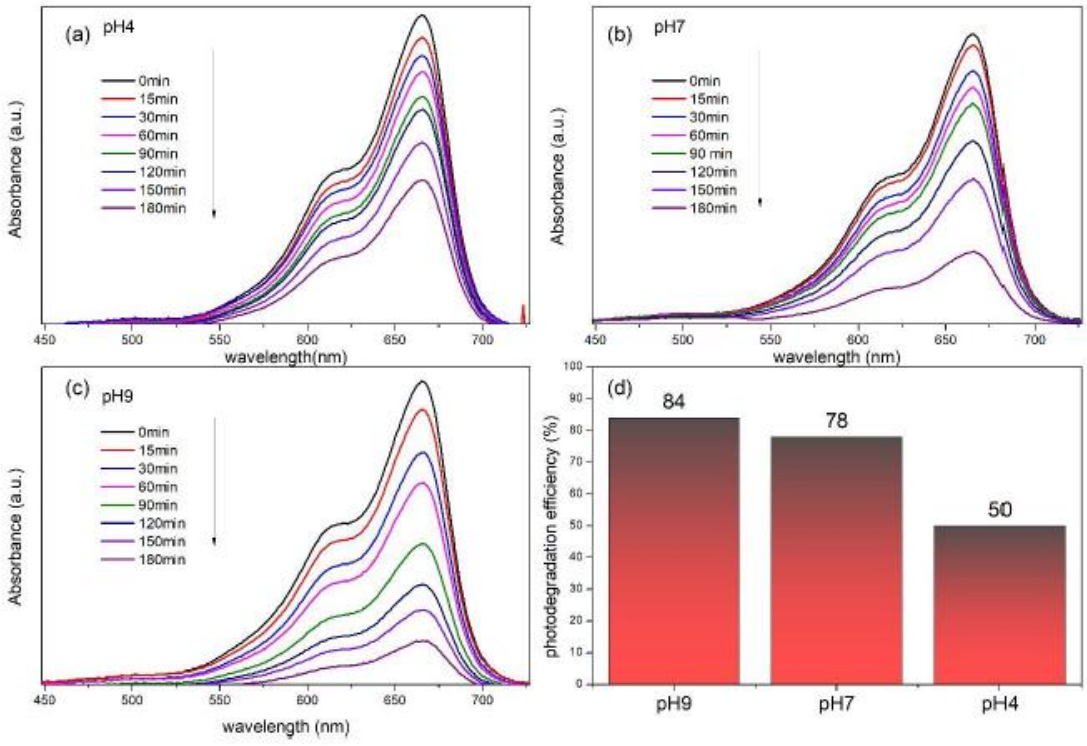
A variação da concentração de MB foi monitorada ao longo do tempo por meio da análise das mudanças em sua absorção máxima em 663 nm nos espectros de UV–Vis. Quando as microfibras PET/$BiVO_4$ foram introduzidas no sistema e expostas à luz visível, ocorreu a degradação do MB (Fig. 9a–c).

Os espectros UV–Vis mostram uma diminuição progressiva das bandas características de absorção do MB para todas as condições de pH testadas, com uma redução consideravelmente mais acentuada observada em pH 9. Esse comportamento pode ser compreendido pelo principal mecanismo de fotodegradação, que gera predominantemente espécies radicais •OH (hidroxila), sendo favorecido pelo aumento dos valores de pH.

Observa-se claramente uma intensa fotodegradação do corante na presença do compósito, demonstrando sua eficácia. É importante destacar que a fonte de radiação utilizada possui potência comparativamente menor do que uma lâmpada de xenônio, indicando que o comportamento fotocatalítico permanece extremamente eficiente mesmo sob fontes de radiação de baixa potência.

O tempo necessário para atingir aproximadamente 85% de degradação foi de 180 minutos utilizando luz visível.

Figura 9– Espectros de absorbância UV–Vis das soluções de azul de metileno sob luz visível em diferentes valores de pH: (a) 4, (b) 7 e (c) 9, e (d) eficiência de fotodegradação.



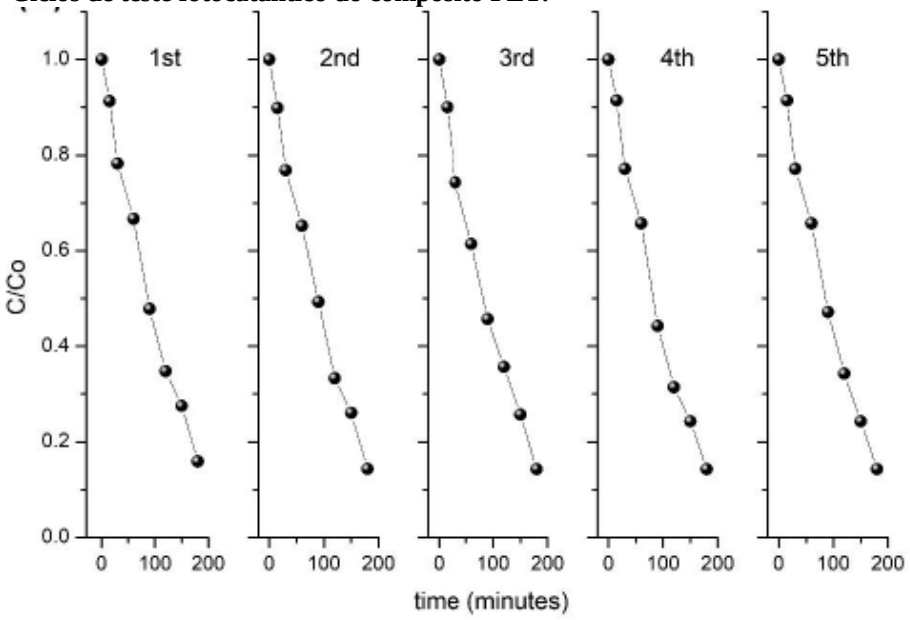
Fonte: Autores (2026).

A fotólise do corante (Fig. 9b) demonstra que a fotodecomposição ocorre pela ação do fotocatalisador em contato com a solução. Esse resultado confirma que o compósito apresenta comportamento eficiente na fotodegradação do azul de metileno.

Os espectros de absorção UV–Vis do MB na presença da fibra de PET, comparando condições no escuro (10–70 min, LED desligado) e sob irradiação (80–180 min, LED ligado), evidenciaram adsorção desprezível na ausência de luz e degradação fotoinduzida efetiva sob iluminação por LED. Portanto, a incorporação do vanadato de bismuto ($BiVO_4$), além de promover maior interação com o corante, também assegura sua fotodegradação.

A reutilização e estabilidade do fotocatalisador foram avaliadas por meio de cinco ciclos consecutivos sob condições experimentais idênticas, conforme apresentado na Figura 10(a). Em cada ciclo, foi monitorado o decaimento da absorbância do MB, confirmando a continuidade do processo fotocatalítico. Não foi observada redução significativa da atividade fotocatalítica das microfibras ao longo dos ciclos sucessivos, comprovando sua elevada estabilidade e potencial de reutilização.

Figura 10 - Ciclos de teste fotocatalítico do compósito PET.



Fonte: Autores (2026).

A importância do PET na forma de fibra como substrato para o semicondutor $BiVO_4$ reside no fato de favorecer o contato contínuo com a solução contendo o contaminante a ser degradado, devido à sua maior área superficial. Além disso, o PET pode atuar como aceptor de elétrons, inibindo a recombinação dos portadores de carga, aumentando seu tempo de vida útil e promovendo a formação de maior quantidade de espécies radicais.

A degradação fotocatalítica do azul de metileno (MB) pelo compósito PET/$BiVO_4$ é governada pela fotoexcitação do $BiVO_4$ sob irradiação de luz visível e pela subsequente geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), enquanto a matriz de PET desempenha papel importante na adsorção do poluente e na dispersão do catalisador. O $BiVO_4$ é um semicondutor responsivo à luz visível com band gap aproximado de 2,4 eV, permitindo absorção eficiente de fótons nessa região do espectro. Sob irradiação, elétrons (e^-) da banda de valência (VB) são excitados para a banda de condução (CB), formando pares elétron-lacuna (e^-/h^+) (Zhong, 2023; Liu, 2020).

Perspectivas de Aplicação em Sistemas de Tratamento de Efluentes

Embora os ensaios realizados neste estudo tenham sido conduzidos em escala laboratorial, os resultados obtidos demonstram evidências consistentes do potencial tecnológico do compósito PET/$BiVO_4$ para aplicações futuras em sistemas de tratamento de efluentes. A elevada eficiência de degradação do azul de metileno, atingindo aproximadamente 85% após 180 minutos de irradiação sob luz visível, associada à manutenção da atividade fotocatalítica após cinco ciclos consecutivos de reutilização, evidencia a robustez operacional do material desenvolvido.

Diferentemente dos sistemas fotocatalíticos convencionais baseados em semicondutores dispersos em suspensão, a imobilização do $BiVO_4$ em microfibras de PET reciclado elimina a necessidade de etapas posteriores de separação sólido-líquido, reduzindo custos operacionais e simplificando a operação do sistema. Essa característica representa uma vantagem significativa para aplicações em escala real, especialmente em estações de tratamento de efluentes industriais.

A configuração do compósito favorece a construção de membranas fotocatalíticas modulares, permitindo sua aplicação em reatores de leito fixo, colunas de recirculação ou sistemas híbridos de filtração e oxidação avançada. Além disso, a elevada área superficial das microfibras potencializa o contato entre os contaminantes e os sítios ativos do fotocatalisador, contribuindo para o aumento da eficiência de degradação.

Do ponto de vista econômico e ambiental, a utilização de PET pós-consumo como matéria-prima agrega valor a resíduos plásticos que seriam destinados a aterros ou descartados inadequadamente no meio ambiente, promovendo simultaneamente ações de economia circular e mitigação da poluição por plásticos. A abundância e o baixo custo do PET reciclado também favorecem a viabilidade econômica do material em comparação com suportes cerâmicos ou poliméricos de maior valor agregado.

Outro aspecto relevante é a possibilidade de operação utilizando radiação solar como fonte energética. Considerando que o $BiVO_4$ apresenta absorção eficiente na região visível do espectro eletromagnético, o material possui potencial para utilização em sistemas fotocatalíticos alimentados parcial ou totalmente por energia solar, reduzindo significativamente o consumo energético quando comparado a tecnologias que dependem de radiação ultravioleta artificial.

Em aplicações futuras, o compósito PET/$BiVO_4$ poderá ser avaliado no tratamento de efluentes têxteis, farmacêuticos, hospitalares e industriais contendo corantes, fármacos, pesticidas e outros contaminantes orgânicos emergentes. Estudos adicionais deverão contemplar testes com efluentes reais, avaliação da durabilidade em longo prazo, monitoramento da possível lixiviação do semicondutor e análises preliminares de custo-benefício, visando subsidiar sua implementação em escala piloto e posteriormente em escala operacional.

CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da incorporação de $BiVO_4$ em microfibras de PET reciclado por meio de síntese hidrotérmica associada ao processo de *melt spinning*, resultando em um compósito com potencial aplicação fotocatalítica sob luz visível. As análises estruturais confirmaram a formação da fase monoclínica do tipo scheelita do $BiVO_4$, apresentando elevada cristalinidade, absorção eficiente na região visível e band gap compatível com aplicações fotocatalíticas.

A incorporação do semicondutor à matriz polimérica ocorreu de forma homogênea, promovendo estabilidade estrutural, aumento da cristalinidade do PET e formação de microfibras contínuas com elevada área superficial. Além disso, a utilização de PET reciclado evidencia uma abordagem sustentável, agregando valor a resíduos plásticos pós-consumo e contribuindo para estratégias de economia circular e remediação ambiental. Os ensaios utilizando azul de metileno demonstraram a atividade fotocatalítica do compósito, alcançando elevada eficiência de degradação sob irradiação de luz visível, especialmente em meio alcalino. O corante foi utilizado como contaminante modelo para validação inicial do sistema, permitindo comprovar o potencial fotoativo do material desenvolvido. As microfibras também apresentaram elevada estabilidade e reutilização após ciclos consecutivos de operação.

Embora os resultados sejam promissores, estudos futuros serão realizados utilizando efluentes reais, visando avaliar o desempenho do compósito em condições operacionais mais complexas, incluindo presença de múltiplos contaminantes, matéria orgânica e variações físico-químicas típicas de sistemas reais de tratamento. Dessa forma, o compósito PET/$BiVO_4$ desenvolvido apresenta potencial para aplicação em tecnologias avançadas de tratamento de efluentes, associando reutilização de resíduos plásticos, facilidade operacional, reutilização do fotocatalisador e utilização de fontes luminosas de baixa potência energética, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis aplicados à remediação ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKHBARIZADEH, R., Dobaradaran, S., Nabipour, I., Tajbakhsh, S., Darabi, A. H., & Spitz, J. (2020). Abundance, composition, and potential intake of microplastics in canned fish. Marine Pollution Bulletin, 160, 111633.
2. ANDRADE, H. B.; SILVA, A. C.; SANTOS, M. A. et al. Criação e instalação de um ecoponto para coleta de tampas de garrafas PET num campus universitário: um relato de experiência. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 9, n. 3, p. 1616-1626, 2023.
3. BARBOZA, L. G. A.; VETHAAK, A. D.; LAZARUS, B. B.; GUILHERMINO, L. Marine microplastic debris: an emerging issue for water quality, food security and human health. Marine Pollution Bulletin, v. 133, p. 336-348, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047.
4. CRUZ, E. M. T.; ALMEIDA, F. R. Exposição a nano e microplásticos e seus impactos na saúde humana: uma revisão da literatura. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 9, n. 6, p. 2355-2375, 2023.
5. DEEBASREE, J. P.; MAHESKUMAR, V.; VIDHYA, B. Investigation of the visible light photocatalytic activity of BiVO4 prepared by sol gel method assisted by ultrasonication. Ultrasonics sonochemistry, v. 45, p. 123-132, 2018.
6. GANESHBABU, M.; KANNAN, N.; VENKATESH, P. S.; PAULRAJ, G.; JEGANATHAN, K.; MUBARAKALI, D. Synthesis and characterization of $BiVO_4$ nanoparticles for environmental applications. RSC Advances, v. 10, n. 31, p. 18315-18322, 2020. DOI: https://doi.org/10.1039/D0RA01065K
7. ISTIROKHATUN, T.; SIAHAAN, S. E.; SUSANTO, H.; GONZALES, R. R.; FILARDLI, A. M. I.; ANDARANI, P.; MATSUYAMA, H. Novel methods for recycling PET plastic bottle waste: progressing membrane engineering using environmentally friendly solutions. Journal of Cleaner Production, v. 532, p. 146967, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146967
8. KUDO, A.; OMORI, K.; KATO, H. A novel aqueous process for preparation of crystal form-controlled and highly crystalline $BiVO_4$ powder from layered vanadates at room temperature and its photocatalytic and photophysical properties. Journal of the American Chemical Society, v. 121, n. 49, p. 11459-11467, 1999. DOI: https://doi.org/10.1021/ja992541y
9. KIM, Tae Woo; CHOI, Kyoung-Shin. Nanoporous BiVO4 photoanodes with dual-layer oxygen evolution catalysts for solar water splitting. Science, v. 343, n. 6174, p. 990-994, 2014.
10. LIN, L.; ZUO, L.; PENG, J. P.; CAI, L. Q.; FOK, L.; YAN, M.; XU, X. R. Microplastics in water, sediment and fish from the Fengshan River system: relationship to aquatic factors and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fish. Environmental Pollution, v. 260, p. 114022, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114022
11. LIN, X.; LI, H.; YU, L.; ZHAO, H.; YAN, Y.; LIU, C.; ZHAI, H. Efficient removal of rhodamine B over hydrothermally synthesized fishbone-like $BiVO_4$. Materials Research Bulletin, v. 48, n. 11, p. 4424-4429, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.06.075
12. LIU, X.; GU, S.; ZHAO, Y.; ZHOU, G.; LI, W. $BiVO_4$, Bi_2WO_6 and Bi_2MoO_6 photocatalysis: a brief review. Journal of Materials Science & Technology, v. 56, p. 45-68, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.023
13. LUO, Mengyao; SUN, Xue; JIAO, Tingting. Photocatalytic performance of BiVO4/RGO composite for degradation of Orange II under visible light. Desalination and Water Treatment, v. 241, p. 64-73, 2021.
14. MACEDO, I. M. E.; SILVA, A. S.; SOUSA, M. C. et al. Reciclagem do polietileno tereftalato. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 8, p. 57704-57723, 2020.
15. MERCÊS, K. A. Avaliação quantitativa de resíduos plásticos microscópicos na sub-bacia do Rio Poxim, Sergipe. 2021. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2021.

16. PEREIRA, J. S.; SANTOS, M. A.; SILVA, R. A. et al. Degradação térmica do polietileno tereftalato (PET): obtenção de parâmetros cinéticos a partir da equação de Arrhenius. 2018.
17. ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. Poly(ethylene terephthalate), PET: a review on the synthesis processes, degradation mechanisms and its recycling. Polímeros, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000200009
18. SHAHAT, M. Abdelhamid et al. Sustainable fired clay bricks with variable TiO2–PET plastic waste content for thermal insulation applications. Electrochimica Acta, p. 147314, 2025.
19. SRINIVASAN, N. et al. Efficient catalytic activity of BiVO4 nanostructures by crystal facet regulation for environmental remediation. Chemosphere, v. 289, p. 133097, 2022.
20. TAN, Hui Ling et al. BiVO4 {010} and {110} relative exposure extent: governing factor of surface charge population and photocatalytic activity. The journal of physical chemistry letters, v. 7, n. 7, p. 1400-1405, 2016.
21. WANG, S.; WANG, X.; LIU, B.; GUO, Z.; OSTRIKOV, K.; WANG, L.; HUANG, W. Vacancy defect engineering of $BiVO_4$ photoanodes for photoelectrochemical water splitting. Nanoscale, v. 13, p. 17989-18009, 2021. DOI: https://doi.org/10.1039/D1NR05691C
22. WANG, Minglei et al. Fabrication of highly durable polysiloxane-zinc oxide (ZnO) coated polyethylene terephthalate (PET) fabric with improved ultraviolet resistance, hydrophobicity, and thermal resistance. Journal of colloid and interface science, v. 537, p. 91-100, 2019.
23. WANG, Yuquan et al. Adsorption and visible photocatalytic synergistic removal of a cationic dye with the composite material BiVO4/MgAl–LDHs. Materials, v. 16, n. 21, p. 6879, 2023.
24. ZHANG, M.; SHI, Q.; CHENG, X.; YANG, J.; LIU, Z.; CHEN, T.; QU, Y.; WANG, J.; XIE, M.; HAN, W. Accelerated generation of hydroxyl radical through surface polarization on $BiVO_4$ microtubes for efficient chlortetracycline degradation. Chemical Engineering Journal, v. 400, p. 125871, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125871
25. ZHAO, Wenmin et al. Quantification of PP, PE, and PET microplastics in Lake water by Raman spectroscopy combined with PLS regression. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, p. 127178, 2025.
26. ZHONG, X.; LI, Y.; WU, H.; XIE, R. Recent progress in $BiVO_4$-based heterojunction nanomaterials for photocatalytic applications. Materials Science and Engineering B, v. 289, p. 116278, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116278