



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

MAUREN WILXENSKI DELMILIO

**VANADATO DE BISMUTO MODIFICADO COM CARVÃO  
VULCAN<sup>®</sup> XCMAX<sup>™</sup> 22: SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO**

---

Londrina  
2025

MAUREN WILXENSKI DELMILIO

**VANADATO DE BISMUTO MODIFICADO COM CARVÃO  
VULCAN® XCMAX™ 22: SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Estadual de Londrina - UEL, como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
Bacharel em Química.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dall'Antonia

Londrina  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Delmilio, Mauren Wilxenski.

VANADATO DE BISMUTO MODIFICADO COM CARVÃO VULCAN® XCMAX™ 22: SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO / Mauren Wilxenski Delmilio. - Londrina, 2025.  
58 f.

Orientador: Luiz Henrique Dall'Antonia.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Graduação em Química, 2025.  
Inclui bibliografia.

1. Vanadato de bismuto - TCC. 2. carvão VULCAN® XCMAX™ 22 - TCC. 3. síntese hidrotérmica - TCC. 4. caracterização - TCC. I. Antonia, Luiz Henrique Dall'. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Graduação em Química. III. Título.

CDU 54

MAUREN WILXENSKI DELMILIO

**VANADATO DE BISMUTO MODIFICADO COM CARVÃO  
VULCAN® XCMAX™ 22: SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Estadual de  
Londrina - UEL, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Bacharel em Química.

---

Prof. Dr. Luiz Henrique Dall' Antonia  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Me. Luan Pereira Camargo  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Odair Pastor Ferreira  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, agradeço profundamente pela luz e orientação ao longo de todo este processo, sua presença foi constante e a principal força que me impulsionou a seguir em frente, renovando minha fé, esperança e perseverança em cada desafio.

Ao Professor Dr. Luiz Henrique D'all Antonia, meu orientador, que com paciência e dedicação acompanhou cada etapa deste processo. Seus conhecimentos, sua orientação e seu incentivo constante foram imprescindíveis para a realização desta pesquisa. Agradeço por depositar sua confiança em mim desde que fui sua aluna no primeiro ano, e por me inspirar a buscar sempre o meu melhor. Por isso, agradeço também ao Laboratório de Eletroquímica e Materiais (LEMA) pela experiência adquirida durante esse tempo.

Ao Mestre Luan Pereira Camargo pelo auxílio em todas as etapas do trabalho, assim como ao meu conhecimento quanto à físico-química que impulsionaram meu desenvolvimento e fortalecendo minha confiança ao longo de todo o processo.

Ao Professor Dr. Odair Pastor Ferreira, pelas valiosas sugestões e críticas que abrilhantaram este trabalho. Sua experiência e conhecimento na área, em especial as aulas sobre caracterização de sólidos, me auxiliaram no desenvolvimento e análise dos resultados e discussões.

Em especial, à Professora Dra. Suzana Lucy Nixdorf, pelo apoio e incentivo durante todo o curso, e em especial pela oportunidade concedida durante dois anos em seu laboratório de pesquisa, que foram essenciais para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Sua paixão pelo ensino e dedicação aos alunos foram fonte de inspiração para superar os desafios e seguir em frente. Assim, agradeço ao Laboratório de Desenvolvimento de Instrumentação e Automação Analítica (DIA) pela experiência adquirida durante esse tempo.

Aos professores que contribuíram para minha formação acadêmica, transmitindo seus conhecimentos e experiências, e despertando em mim, ainda mais, o interesse

pela Química, proporcionando a base fundamental para a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual de Londrina, por proporcionar o ambiente acadêmico propício ao desenvolvimento desta pesquisa, pela oportunidade de estudo e por oferecer a estrutura e os recursos necessários para a sua realização.

À minha família, meu alicerce inabalável. Em especial ao meu pai, Luiz Carlos Delmilio, por todo apoio incondicional e paciência durante a jornada em busca da realização dos meus sonhos. À minha mãe, Cintia, e aos meus avós, Nilza e Sérgio, por acreditarem em mim, por me incentivarem a perseguir meus objetivos e por me fortalecerem nos momentos desafiadores. Ao meu namorado, David Denis, pela parceria, companheirismo, força e por me encorajar a prosseguir desde o início, independente dos obstáculos.

A cada um de vocês, e aqueles que não foram citados, minha sincera e profunda gratidão, pois sem todo apoio que tive, a finalização deste trabalho não seria possível.

E, por fim, um agradecimento especial a mim mesma. Por nunca desistir, mesmo quando as dificuldades pareciam intransponíveis, pela resiliência em aprender com cada erro, pela busca constante por conhecimento e pelo amadurecimento conquistado ao longo dessa jornada. Acima de tudo, agradeço à Química, pela paixão que me impulsionou a trilhar este caminho e pela satisfação de ver este trabalho concluído, sempre buscando o melhor.

"Se escutar uma voz dentro de você dizendo 'você não é um pintor', então pinte sem parar, de todos os modos possíveis, e aquela voz será silenciada."

(Vicent van Gogh)

## RESUMO

DELMILIO, Mauren W. **Vanadato de bismuto modificado com carvão VULCAN® XCMAX™ 22: síntese e caracterização**. 2025. 58. Trabalho de Conclusão de Curso em Química – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2025.

Alguns materiais se destacam por sua eficiência em processos de transferência de elétrons em reações redox e na velocidade da reação após serem excitados pela luz, como o vanadato de bismuto ( $\text{BiVO}_4$ ). No presente trabalho objetivou-se o desenvolvimento e caracterização de um material composto por  $\text{BiVO}_4$  e carvão VULCAN® XCMAX™ 22 com concentrações de 0,001, 0,01, 0,1 e 1,0 g, utilizando a síntese hidrotérmica devido à garantia de precisão na morfologia, cristalinidade e pureza. Os materiais sintetizados foram caracterizados por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados comprovaram que a modificação com carvão Vulcan afetou a estrutura cristalina e morfologia do  $\text{BiVO}_4$ , acarretando a transição de fase da estrutura monoclinica para tetragonal, informação obtida nos difratogramas de DRX, tornando-a mais porosa e homogênea. Na análise de FTIR foi possível observar mudanças nas bandas vibracionais, enquanto as imagens de MEV mostraram a dispersão das partículas de carvão na matriz do  $\text{BiVO}_4$ . O estudo demonstrou que a modificação de  $\text{BiVO}_4$  com carvão Vulcan amplia suas funcionalidades, proporcionando uma maior eficiência para o material em diversas aplicações.

**Palavras-chave:** Vanadato de bismuto; carvão VULCAN® XCMAX™ 22; síntese hidrotérmica; caracterização; eletroquímica.

## ABSTRACT

DELMILIO, Mauren W. **Modified bismuth vanadate with VULCAN® XCMAX™ 22 carbon: synthesis and characterization.** 2025. 58. Trabalho de Conclusão de Curso em Química – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2025.

Some materials stand out for their efficiency in electron transfer processes in redox reactions and in the reaction speed after being excited with light, such as bismuth vanadate ( $\text{BiVO}_4$ ). This work aimed to develop and characterize a material composed of  $\text{BiVO}_4$  and VULCAN® XCMAX™ 22 coal with concentrations of 0.001, 0.01, 0.1 and 1.0 g, using hydrothermal synthesis due to its ability to ensure precision in morphology, crystallinity and purity. The characterization of the samples was performed comparatively with the results of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The results showed that the modification with Vulcan coal affected the crystal structure and morphology of  $\text{BiVO}_4$ , causing the phase transition from the monoclinic to the tetragonal structure, as shown in the XRD diffractograms, and making it more porous and homogeneous. The FTIR analysis showed changes in the vibrational bands, while the SEM images showed the dispersion of the coal particles in the  $\text{BiVO}_4$  matrix, improving the surface area and electrical conductivity. The study demonstrated that the modification of  $\text{BiVO}_4$  with Vulcan coal expands its functionalities, providing greater efficiency for the material in several applications.

**Key-words:** Bismuth vanadate; VULCAN® XCMAX™ 22 coal; hydrothermal synthesis; characterization; electrochemistry.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Representação das estruturas cristalinas do  $\text{BiVO}_4$  sendo (a) scheelita monoclínica (b) scheelita tetragonal (c) zircão tetragonal, e, estruturas de banda do  $\text{BiVO}_4$  (d) scheelita (e) zircão ..... 18
- Figura 2** – Micrografia de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do carvão Vulcan à 25000x..... 23
- Figura 3** – Diagrama esquemático da interação do carvão Vulcan com materiais e influência na eficiência ..... 25
- Figura 4** – Fluxograma da síntese do vanadato de bismuto pelo método hidrotérmico empregado no presente trabalho..... 29
- Figura 5** – Representação da modificação na síntese do vanadato de bismuto com carvão VULCAN® XCMAX™ 22..... 30
- Figura 6** – Produtos obtidos após a síntese e modificações ..... 31
- Figura 7** – Esquema ilustrativo do espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) ..... 33
- Figura 8** – Espectros obtidos nas análises de FTIR para as distintas amostras: (a)  $\text{BiVO}_4$  puro; (b)  $\text{BiVO}_4$  + 0,001 g de carvão; (c)  $\text{BiVO}_4$  + 0,01 g de carvão; (d)  $\text{BiVO}_4$  + 0,1 g de carvão; (e)  $\text{BiVO}_4$  + 1,0 g de carvão; (f) carvão VULCAN® XCMAX™ 22..... 34
- Figura 9** – Esquema ilustrativo da Difração de Raios-X (DRX), mostrando o princípio da interação dos raios X com o arranjo periódico dos átomos em um material cristalino ..... 37
- Figura 10** – Difractogramas de DRX para as distintas amostras: (a)  $\text{BiVO}_4$  puro; (b)  $\text{BiVO}_4$  + 0,001 g de carvão; (c)  $\text{BiVO}_4$  + 0,01 g de carvão; (d)  $\text{BiVO}_4$  + 0,1 g de carvão; (e)  $\text{BiVO}_4$  + 1,0 g de carvão; (f) carvão VULCAN® XCMAX™ 22 ..... 38
- Figura 11** – Esquema ilustrativo do funcionamento do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) ..... 44
- Figura 12** – Microscopia eletrônica de varredura para as distintas amostras em (1) 5000x à 5  $\mu\text{m}$  e (2) 30000x à 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente, sendo: (a)  $\text{BiVO}_4$  puro; (b)  $\text{BiVO}_4$  + 0,001 g de carvão; (c)  $\text{BiVO}_4$  + 0,01 g de carvão; (d)  $\text{BiVO}_4$  + 0,1 g de carvão; (e)  $\text{BiVO}_4$  + 1,0 g de carvão; (f) carvão VULCAN® XCMAX™ 22 ..... 45

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Tabela comparativa das principais rotas sintéticas na obtenção do $\text{BiVO}_4$ encontradas na literatura.....	21
<b>Tabela 2</b> – Identificação das amostras dos produtos obtidos após a síntese e modificações .....	31
<b>Tabela 3</b> – Dados estruturais das amostras de $\text{BiVO}_4$ puro e modificado com diferentes concentrações de carvão Vulcan após o refinamento .....	39
<b>Tabela 4</b> – Quantificação das fases cristalinas das amostras de $\text{BiVO}_4$ puro e modificado com diferentes concentrações de carvão VULCAN® XCMAX™ 22 obtidas no DRX .....	41
<b>Tabela 5</b> – Comparação das propriedades funcionais de materiais derivados de carbono .....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UEL	Universidade Estadual de Londrina
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
DRX	Difração de Raios X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
ICDD	International Centre For Diffraction Data
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	16
2.1	OBJETIVO GERAL .....	16
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
3.1	VANADATO DE BISMUTO.....	17
3.2	MATERIAS HÍBRIDOS EM ELETROQUÍMICA .....	22
3.3	CARVÃO VULCAN® XCMAX™ 22 .....	23
3.4	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS .....	26
3.4.1	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) ....	26
3.4.2	Difração de Raios X (DRX).....	26
3.4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	27
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	28
4.1	SÍNTESE DO VANADATO DE BISMUTO.....	28
4.2	MODIFICAÇÃO COM CARVÃO VULCAN .....	30
4.3	CARACTERIZAÇÃO.....	31
4.3.1	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) ....	31
4.3.2	Difração de Raios X (DRX).....	32
4.3.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	33
5.1	ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER .....	33
5.2	ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X .....	36
5.3	MORFOLOGIA OBTIDA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	51
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por materiais avançados com propriedades otimizadas tem sido impulsionada nos últimos anos, auxiliando no desenvolvimento de compósitos funcionais capazes de atender as demandas tecnológicas. Dentro desse contexto, o vanadato de bismuto ( $\text{BiVO}_4$ ) destaca-se, devido à sua estrutura cristalina e às propriedades ópticas, catalíticas e eletrônicas, que o tornam ideal para aplicações em fotocatalisadores com objetivo de degradação de poluentes orgânicos sob iluminação visível ou sensores e dispositivos eletroquímicos.

O vanadato de bismuto ( $\text{BiVO}_4$ ) é um semicondutor do tipo n, caracterizado por sua coloração amarelada e três diferentes formas cristalinas. Este material tem recebido destaque devido às suas propriedades notáveis, como o band gap relativamente estreito, que facilita a absorção de luz na faixa visível do espectro solar. Além disso, o  $\text{BiVO}_4$  apresenta alta resistência à corrosão, baixa toxicidade e custo de produção acessível (MANSHA et al., 2023).

A rota de síntese adotada para o  $\text{BiVO}_4$  pode influenciar em suas propriedades, e modificar aspectos como tamanho das partículas, morfologia, área superficial específica e fase cristalina predominante. Tais características impactam diretamente na eficiência do material (CAI et al., 2023). Diante disso, novos métodos de síntese têm sido explorados com o objetivo de otimizar essas propriedades, incluindo abordagens como síntese sonoquímica (LIU et al., 2015) coprecipitação (JOSEPHINE et al., 2020), sol-gel (NALLAMUTHU et al., 2019), síntese por combustão (PHURUANGRAT et al., 2023; TIMMAJI et al., 2011) e síntese hidrotérmica (HERRERA, 2023) que se destaca por permitir o controle preciso do tamanho e distribuição das partículas e morfologia, além apresentar viabilidade ambiental e econômica (MANSHA et al., 2023).

Cada um desses métodos oferece vantagens específicas que podem ser ajustadas para atender às necessidades das aplicações desejadas. Devido à limitação referente à baixa condutividade elétrica e a rápida recombinação de portadores de carga, é necessário investigar as modificações químicas e estruturais, como a combinação com materiais de alta condutividade para que não prejudique a eficiência

do vanadato de bismuto quando presente em processos (LI; LIU; DUAN, 2009).

Sob essa perspectiva, o carvão VULCAN® XCMA<sup>TM</sup> 22 surge como um excelente material quando atrelado a esse composto, devido às suas propriedades características, como alta condutividade elétrica, elevada área superficial específica e estabilidade química. Essas particularidades tornam o carvão VULCAN® XCMA<sup>TM</sup> 22 um modificador destaque para a ancoragem de materiais ativos (BASIVI et al., 2025), promovendo uma melhor separação de cargas e facilitando a transferência eletrônica em dispositivos eletroquímicos.

A modificação do BiVO<sub>4</sub> com carvão VULCAN® XCMA<sup>TM</sup> 22 permite, assim, explorar sinergias entre esses materiais, ampliando suas funcionalidades e viabilizando aplicações em tecnologias avançadas. Desse modo, tal modificador apresenta um grande potencial para a melhora da sensibilidade e da seletividade de sensores, devido à maior eficiência na transferência de elétrons e ao aumento de sítios ativos disponíveis. Estudos recentes mostram que a incorporação de materiais de carbono, como o Vulcan, pode transformar o desempenho de semicondutores, viabilizando sua aplicação (DA SILVA ARAÚJO et al., 2021).

Para avaliar o impacto de tal modificação, utiliza-se de técnicas de caracterização, de modo a analisar a estrutura cristalina e o grau de cristalinidade do material. Assim como identificar os grupos funcionais e interações químicas no composto, qualificar a estabilidade térmica do material, morfologia e interações interfaciais (CAI et al., 2023; DEEBASREE; MAHESKUMAR; VIDHYA, 2018; PAVIA et al., 2021).

## 2 OBJETIVO

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e caracterização de um material composto de vanadato de bismuto e carvão VULCAN® XCMAX™ 22 com potencial aplicação em eletroquímica.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sintetizar o vanadato de bismuto puro e com diferentes concentrações de carvão Vulcan através do método hidrotérmico;
- Caracterizar as amostras de vanadato de bismuto utilizando as seguintes técnicas:
  - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR);
  - Difração de Raios X (DRX);
  - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Avaliar a influência da concentração de VULCAN® XCMAX™ 22 nas propriedades estruturais, morfológicas e eletroquímicas do material modificado;

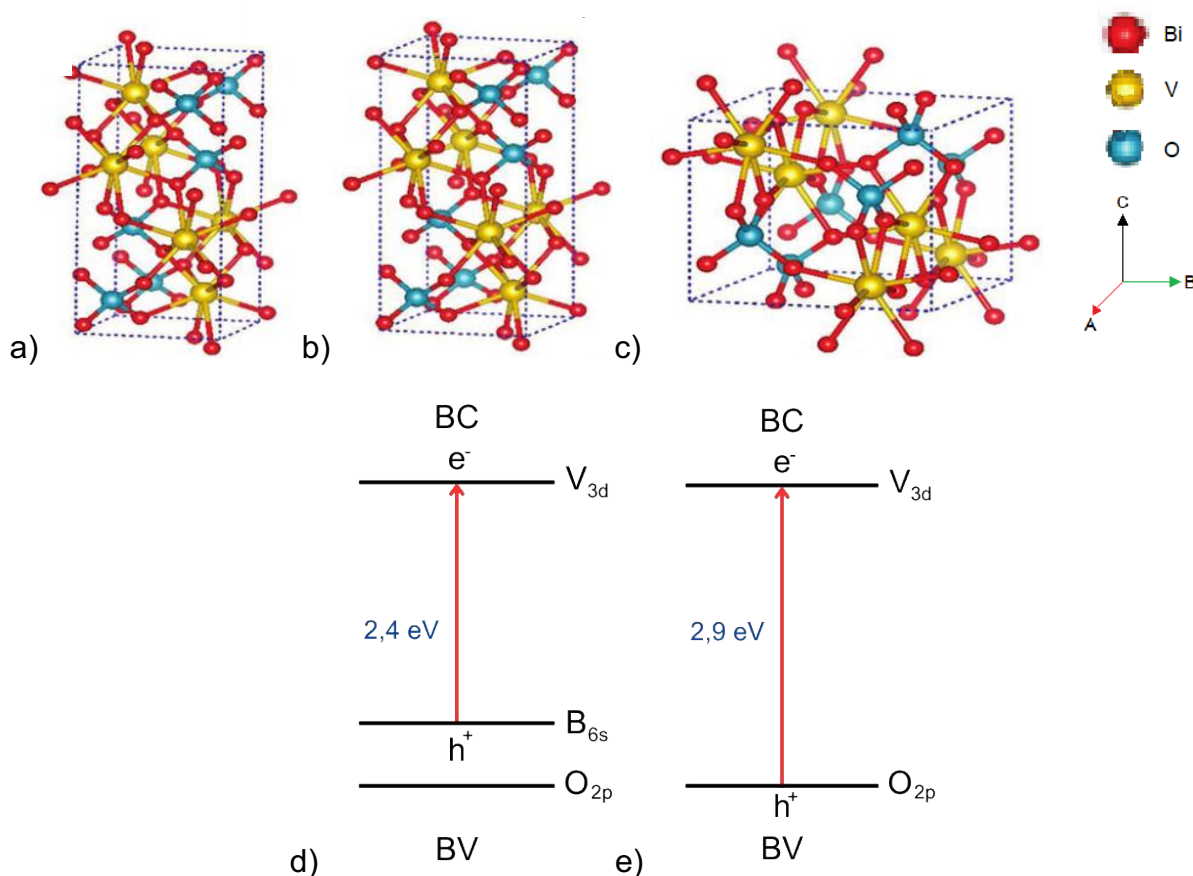
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 VANADATO DE BISMUTO

O vanadato de bismuto ( $\text{BiVO}_4$ ), conhecido por sua coloração amarelada e ampla estabilidade química, é um material semicondutor do tipo n o qual tem se destacado na comunidade científica em aplicações que envolvem a captação de luz visível, como fotocatalise, sensores e dispositivos para geração e armazenamento de energia. A relevância do  $\text{BiVO}_4$  em tais aplicações deve-se, em grande parte, às suas propriedades estruturais e eletrônicas, bem como à possibilidade de customização de suas características através de diferentes métodos de síntese e modificações químicas (DA SILVA PELISSARI et al., 2020).

Esse composto apresenta três diferentes formas cristalinas: scheelita monoclínica (sm), scheelita tetragonal (st) e zircão tetragonal (zt), sendo diferenciadas por características específicas que influenciam diretamente suas propriedades ópticas, eletrônicas e catalíticas (CHEN; JIANG; LIN, 2020; PERRY et al., 2019). A Figura 1 apresenta tais estruturas e suas bandas para melhor interpretação, sendo *BC*, banda de condução e, *BV*, banda de valência.

**Figura 1** – Representação das estruturas cristalinas do  $\text{BiVO}_4$  sendo (a) scheelita monoclínica (b) scheelita tetragonal (c) zircão tetragonal, e, estruturas de banda do  $\text{BiVO}_4$  (d) scheelita (e) zircão



Fonte: Adaptado de KUDO; OMORI; KATO, 1999; YI; WANG, 2019.

A estrutura scheelita monoclínica (sm), que se destaca pela utilidade, possui uma geometria ligeiramente distorcida em comparação à forma tetragonal. Sendo a estrutura monoclínica a mais estudada e empregada em aplicações práticas devido à sua elevada eficiência fotocatalítica. Uma das principais relevâncias é seu band gap de aproximadamente 2,4 eV que permite uma absorção eficiente de luz visível, tornando-a ideal para a geração de pares elétron-lacuna durante a excitação óptica (CAI et al., 2023; MENG et al., 2020; TOKUNAGA; KATO; KUDO, 2001; WANG et al., 2013). Além de que tal configuração facilita a separação de cargas foto geradas, reduzindo a recombinação de portadores de carga, e, conseqüentemente, melhorando o desempenho em processos fotocatalíticos e eletroquímicos.

A forma scheelita tetragonal (st), por outro lado, apresenta um band gap ligeiramente maior, resultando em uma menor eficiência na absorção de luz visível, por isso, é menos eficaz em aplicações fotocatalíticas devido à maior recombinação

de cargas e à menor separação de portadores, o que limita sua capacidade de participar em tais reações (TOKUNAGA; KATO; KUDO, 2001). Porém, pode ser útil em sensores de gás, onde sua estabilidade estrutural garante maior durabilidade e seletividade na detecção de compostos (YUAN et al., 2016). Sua resistência química também favorece o uso em revestimentos protetores para eletrodos, contribuindo para a maior vida útil de dispositivos eletroquímicos (LAI et al., 2019). Além disso, a estrutura estável do material permite sua aplicação em memórias resistivas (ReRAM), e nos dispositivos ópticos e dielétricos, como guias de onda e filtros de frequência, devido às suas propriedades eletrônicas favoráveis (CHEN; WU; WU, 2023; ZHANG; CHEN; JIAO, 2006).

A estrutura zircão tetragonal (zt) possui características diferentes das estruturas scheelita, principalmente em seu band gap, que é ainda maior, sendo útil em aplicações estruturais ou de materiais isolantes, visto que apresenta menor separação de cargas e maior susceptibilidade à recombinação, o que a torna inadequada para aplicações que dependem de alta atividade (TOKUNAGA; KATO; KUDO, 2001). Tal estrutura tem sido explorada em revestimentos térmicos, barreiras contra radiação e na produção de cerâmicas devido à sua alta resistência química e térmica, tornando-a útil na proteção de componentes aeroespaciais e industriais contra condições extremas (JIANG et al., 2012; WANG et al., 2013).

O *band gap* estreito do vanadato de bismuto o torna um excelente fotocatalisador sob luz visível, enquanto sua resistência à corrosão e baixa toxicidade aumentam sua viabilidade para uso em ambientes agressivos, como sistemas aquosos contendo poluentes orgânicos (MANSHA et al., 2023), seu baixo custo de produção e a facilidade de síntese contribuem para sua popularidade como um material sustentável.

Contudo, o  $\text{BiVO}_4$  não é isento de limitações, visto que possui baixa condutividade elétrica e rápida recombinação de pares elétron-lacuna, os quais prejudicam sua eficiência em aplicações específicas (LI; LIU; DUAN, 2009), sendo um dos motivos de aplicar-se estratégias para modificar e otimizar suas propriedades. Nesse caso, realiza-se a modificação com materiais condutivos, como exemplo o carvão VULCAN® XCMAX™ 22, que pode melhorar a eficiência de transferência de elétrons e expandir as possibilidades de uso do material (ZHANG et al., 2016).

O carvão VULCAN® XCMAX™ 22 atua como um canal eficiente para a transferência de elétrons, reduzindo significativamente a resistência interna do

material e minimizando perdas energéticas durante processos eletroquímicos. Além disso, a elevada área superficial específica do carvão proporciona uma maior dispersão dos centros ativos do  $\text{BiVO}_4$ , aumentando a interface de contato entre os materiais e, conseqüentemente, melhorando a separação de cargas geradas durante a excitação fotoinduzida. Acarretando a diminuição da taxa de recombinação de pares elétron-lacuna, ampliando o tempo de vida dos portadores de carga e otimizando sua eficiência em aplicações fotocatalíticas e eletroquímicas (SONG et al., 2021; WAN et al., 2023; WANG et al., 2025).

A rota de síntese do  $\text{BiVO}_4$  tem um impacto direto nas suas propriedades, uma vez que o controle sobre parâmetros como morfologia, área superficial, distribuição de tamanho de partículas e estrutura cristalina está intrinsecamente associado à escolha do método empregado (CAI et al., 2023). A influência dessas variáveis transcende aspectos morfológicos, refletindo-se diretamente na eficiência funcional do material (ADÁN et al., 2015). A depender da abordagem sintética adotada, há variações significativas na organização estrutural e no grau de cristalinidade, modulando propriedades ópticas, densidade de defeitos estruturais e o comportamento na interface sólido-líquido, a Tabela 1 apresenta as principais rotas sintéticas, atreladas à suas vantagens e esvantagens.

**Tabela 1** – Tabela comparativa das principais rotas sintéticas na obtenção do  $\text{BiVO}_4$  encontradas na literatura

Método de síntese	Condições experimentais	Vantagens	Desvantagens	Referência
Combustão	Reação exotérmica rápida com precursores e elevada temperatura (300–600°C)	Rápido, econômico, adequado para produção em larga escala	Dificuldade em controlar a morfologia, presença de impurezas	(TIMMAJI et al., 2011)
Hidrotérmico	Controle da alta temperatura e pressão por meio de autoclave	Controle preciso de morfologia e cristalinidade, obtendo-se alta pureza	Uso de equipamentos especializados e processos demorados	(ADÁN et al., 2015)
Sol-Gel	Hidrólise e policondensação de precursores metálicos, seguido por calcinação	Alta homogeneidade e controle sobre o tamanho de partículas	Processo complexo, uso de solventes orgânicos tóxicos	(DEEBASREE; MAHESKUMAR; VIDHYA, 2018)
Coprecipitação	Mistura de soluções precursoras, adição de agente precipitante e calcinação	Simple e de baixo custo, adequado para grandes quantidades	Menor controle sobre a morfologia e distribuição de partículas	(JOSEPHINE et al., 2020)
Sonoquímico	Aplicação de ultrassom de alta frequência em solução contendo precursores	Formação de nanopartículas uniformes de alta área superficial	Elevado custo, difícil escalabilidade	(LIU et al., 2015)
Fusão	Aquecimento direto dos precursores acima do ponto de fusão (>700°C)	Produção de materiais altamente cristalinos, sem necessidade de solventes	Temperatura elevada e risco de segregação de fases	(SHANNON, 1976)
Eletrodeposição	Deposição controlada de íons metálicos em substrato condutor via corrente elétrica	Controle fino da espessura e morfologia do filme depositado	Dependência de substratos específicos, limitação de escala	(MCDONALD; CHOI, 2012)

**Fonte:** Própria autora, 2025

As aplicações do vanadato de bismuto estão concentradas principalmente em áreas que demandam alta eficiência na interação com luz visível, como (1) fotocatalise ambiental, sendo utilizado na degradação de poluentes orgânicos presentes em efluentes industriais, devido à sua capacidade de gerar espécies reativas de oxigênio sob irradiação de luz visível, como o radical hidroxila ( $\cdot\text{OH}$ ) e o superóxido ( $\text{O}_2\cdot^-$ ) (CAI et al., 2023; TOKUNAGA; KATO; KUDO, 2001), (2) promissor na fotólise da água para geração de hidrogênio, contribuindo para a produção de energia limpa e renovável (MANSHA et al., 2023), (3) sensores eletroquímicos, aplicando-se na detecção de moléculas biológicas, como a dopamina, devido à alta estabilidade química do  $\text{BiVO}_4$  (WEI et al., 2021), (4) armazenamento de energia com potencial para aplicação em dispositivos devido à sua estabilidade estrutural.

### 3.2 MATERIAIS HÍBRIDOS EM ELETROQUÍMICA

Os materiais híbridos têm emergido como uma solução promissora em diversas áreas científicas, especialmente na eletroquímica, devido à sua capacidade de combinar propriedades únicas de diferentes componentes em um único sistema funcional. Na eletroquímica, os materiais híbridos são formados pela combinação de pelo menos dois tipos de materiais distintos, como semicondutores, polímeros, metais ou materiais de carbono, de modo a explorar sinergias que otimizam suas características para aplicações específicas. Esses materiais são projetados para superar limitações de materiais puros que, isoladamente, não atendem às crescentes demandas, tendo como principal vantagem a possibilidade de combinar as propriedades desejáveis de cada componente em um sistema integrado (FUJISHIMA; HONDA, 1972).

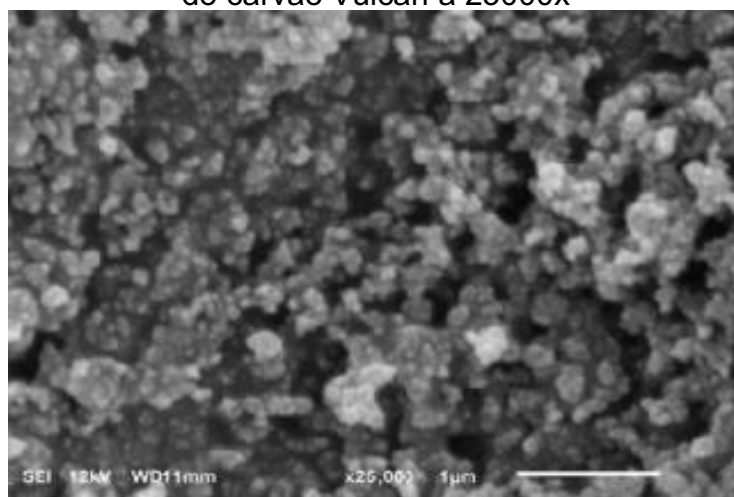
Além disso, os materiais híbridos podem ser customizados em termos de composição, estrutura e morfologia, o que os torna versáteis para personalização a qual pode ser alcançada por meio de diferentes métodos de síntese e funcionalização, como dopagem, revestimento superficial e formação de compósitos, que permitem ajustar propriedades como área superficial específica, condutividade elétrica e resistência química (FUJISHIMA; HONDA, 1972).

### 3.3 CARVÃO VULCAN® XCMAX™ 22

O carvão VULCAN® XCMAX™ 22 é um composto à base de carbono amplamente utilizado em diferentes áreas tecnológicas e visado por suas propriedades físicas e químicas, assim como sua versatilidade e acessibilidade. Desenvolvido originalmente como um suporte condutivo para eletrodos em células de combustível, o carvão Vulcan tem sido explorado como modificador em compósitos híbridos, contribuindo para a melhoria de propriedades funcionais de outros materiais (WANGKAWONG et al., 2024)

Esse material é constituído predominantemente de carbono amorfo, caracterizado por uma estrutura desordenada e altamente porosa, característica a qual proporciona ao material grande área superficial específica, que pode ultrapassar  $200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ . A depender da preparação e do tratamento térmico aplicado, assim como a excelente mobilidade de elétrons há como garantir eficiência no transporte eletrônico (BASIVI et al., 2025), além disso, a presença de poros interconectados favorece a adsorção de moléculas. Na Figura 2 visualiza-se a superfície do carvão Vulcan.

**Figura 2** – Micrografia de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do carvão Vulcan à 25000x



**Fonte:** Adaptado de MOTA, 2020.

A combinação das propriedades do carvão vulcan é um fator importante de se ressaltar devido à abrangência que o fornece. Pode-se citar a grande área superficial específica que favorece a dispersão uniforme de partículas de outros materiais, como semicondutores e catalisadores. Assim, é útil na produção de compósitos para melhorar o contato entre os componentes e, conseqüentemente, a eficiência dos

processos (PACKIARAJ et al., 2018).

É um material altamente estável em condições químicas adversas e temperaturas elevadas que permite integração com outros materiais sensíveis sem comprometer a integridade estrutural do sistema. Além disso, a incorporação de materiais semicondutores em sua matriz pode ampliar a separação de cargas e reduzir a recombinação eletrônica, devido à interação entre as superfícies permitidas pela estrutura porosa, aumentando o desempenho do material em uma ampla gama de aplicações (DA SILVA ARAÚJO et al., 2021).

O carvão VULCAN® XCMAX™ 22 tem sido amplamente utilizado como suporte condutivo em sensores eletroquímicos para melhorar a sensibilidade e a seletividade, permitindo a detecção de moléculas com alta eficiência. A Figura 3 ilustra a interação das espécies químicas na superfície do material, facilitada pela matriz de carbono (KUMAR et al., 2017). Quando combinado com fotocatalisadores, atua como um material condutivo que facilita a separação de cargas e melhora a eficiência de degradação, assim como favorece a adsorção devido ao aumento da interação com os sítios catalíticos ativos (BASIVI et al., 2025). Aplicações em estudos recentes o utilizaram como suporte em eletrodos de baterias de íon-lítio, supercapacitores e células de combustível (DA SILVA ARAÚJO et al., 2021), sendo possível verificar a modificação da superfície do carvão Vulcan (BASIVI et al., 2025).

A melhora na condutividade elétrica do sistema ocorre principalmente devido à natureza altamente ordenada dos domínios grafíticos, que reduzem a dispersão de elétrons e facilitam sua movimentação. Materiais como o carvão VULCAN® XCMAX™ 22 apresentam uma alta fração de carbono grafítico em sua estrutura, o que melhora ainda mais essa propriedade e contribui para o desempenho fotocatalítico aprimorado (ZHU et al., 2014)

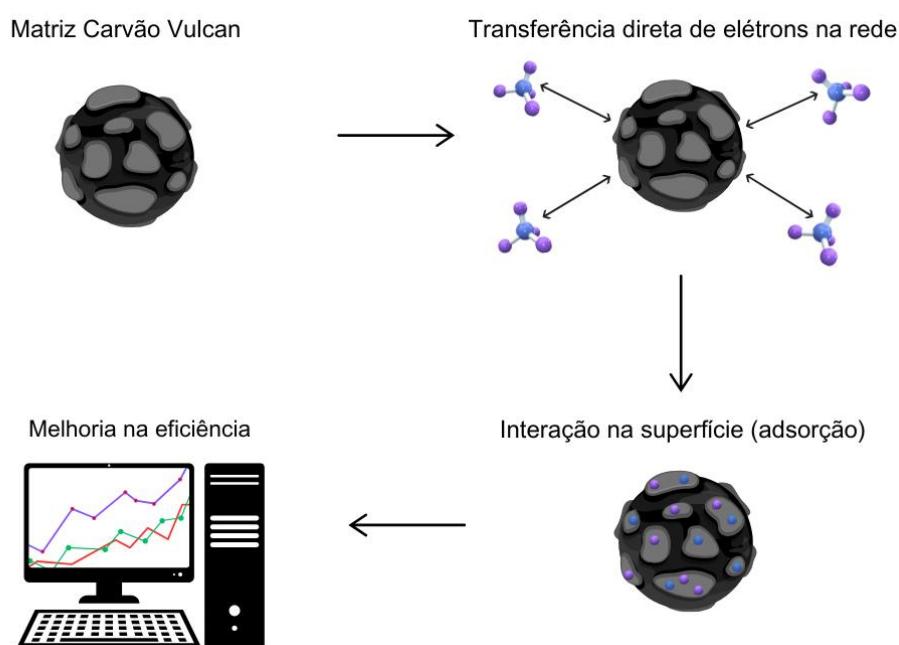
A estrutura do grafítica do carbono traz informações relevantes sobre esse mecanismo, de modo que os elétrons  $\pi$  deslocalizados presentes nos domínios grafíticos do carvão fornecem um caminho eficiente para a condução eletrônica. Essa deslocalização ocorre devido à hibridização  $sp^2$  dos átomos de carbono, criando um sistema conjugado que favorece a mobilidade dos elétrons na superfície do material (ZHU et al., 2014). Assim como a distância entre as folhas grafíticas, geralmente em torno de 3,4 Å, influencia diretamente a mobilidade dos elétrons. Quanto menor essa distância, maior a superposição dos orbitais  $\pi$  e, conseqüentemente, melhor a condutividade elétrica do material. De modo que permite que haja uma redução

significativa na resistência interna do sistema, otimizando o fluxo de carga na interface carvão-BiVO<sub>4</sub> e melhorando a eficiência global da fotocatalise (FANG et al., 2022; WANG et al., 2023).

O contato do carvão com o BiVO<sub>4</sub> cria uma interface eletrônica favorável, na qual o material condutivo atua como um aceitador de elétrons, reduzindo a taxa de recombinação de pares elétron-lacuna e aumentando a eficiência do processo. Na interface BiVO<sub>4</sub>-carvão, a transferência de elétrons ocorre devido à diferença no potencial de Fermi entre os materiais. O carbono, sendo altamente condutivo, facilita o transporte de elétrons fotoexcitados, prolongando seu tempo de vida útil e, conseqüentemente, aumentando a eficiência da degradação de poluentes (XU et al., 2022; ZHANG et al., 2025).

Os grupos funcionais presentes na superfície do carbono também influenciam a eficiência da separação de cargas. Grupos como hidroxila (-OH), carbonila (-C=O) e carboxila (-COOH) podem atuar como centros de ancoragem para o BiVO<sub>4</sub>, promovendo uma forte interação interfacial e melhorando a transferência de carga. Esses grupos podem gerar espécies reativas de oxigênio (ROS), aumentando a eficiência da degradação de contaminantes ambientais (PAVIA et al., 2021; ZHU et al., 2014).

**Figura 3** – Diagrama esquemático da interação do carvão Vulcan com substâncias



Fonte: Própria autora, 2025.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

A caracterização de materiais é uma etapa importante para compreender as propriedades físico-químicas, estruturais e morfológicas de compostos, sendo que técnicas como Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) são utilizadas para investigar diferentes aspectos dos materiais, como composição química, estrutura cristalina, interações moleculares e morfologia.

#### 3.4.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier é uma técnica baseada na absorção de radiação infravermelha por ligações químicas, sendo utilizada para identificar grupos funcionais e avaliar interações químicas em materiais. Fornece informações sobre vibrações moleculares específicas, permitindo a caracterização de compostos orgânicos e inorgânicos e monitorar mudanças químicas que ocorrem durante processos de síntese, indicando a funcionalização ou o acoplamento de materiais.

A FTIR é frequentemente empregada para confirmar a presença de grupos específicos, bem como para identificar a formação de novas ligações químicas ou interações intermoleculares entre os componentes. Cita-se como exemplo, em compósitos semicondutores, bandas características relacionadas a óxidos metálicos podem ser avaliadas, enquanto modificadores de carbono, podem ser detectados pela presença de grupos oxigenados ou C=C (PAVIA et al., 2021).

#### 3.4.2 Difração de Raios X (DRX)

A difração de Raios-X é uma técnica para determinação da estrutura cristalina de materiais, que se baseia no espalhamento dos raios X por planos cristalinos, fornecendo informações sobre composição, tamanho de cristalitos, grau de cristalinidade e possíveis distorções estruturais. É utilizada para identificar a estrutura

cristalina de compostos que possuem padrões característicos dependendo de sua fase cristalina (TOKUNAGA; KATO; KUDO, 2001). Além disso, permite avaliar a interação dentro do material, identificando mudanças na estrutura cristalina causadas pela modificação em função de diferentes tratamentos ou aditivos.

### 3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

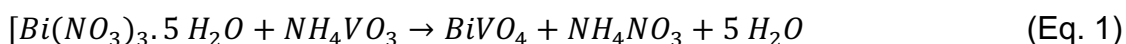
A microscopia eletrônica de varredura é uma das técnicas mais poderosas para análise morfológica, permitindo a visualização de superfícies com alta resolução. A técnica é amplamente utilizada para observar a distribuição, o tamanho e a forma das partículas, bem como para investigar interfaces entre os componentes de materiais híbridos. A técnica pode revelar, por exemplo, a interação entre as partículas de semicondutor e a matriz do outro componente utilizado para modificação, evidenciando a dispersão do semicondutor sobre a superfície porosa, caso haja, e a homogeneidade e a formação de interfaces (GOLDSTEIN et al., 2018).

## 4 METODOLOGIA

Inicialmente, diante dos objetivos supracitados, o estudo baseou-se em métodos bem estabelecidos de síntese hidrotérmica, associados a técnicas avançadas de caracterização de materiais. Buscando-se compreender a interação entre o vanadato de bismuto e o carvão Vulcan, investigando as alterações estruturais e morfológicas resultantes dessa modificação.

### 4.1 SÍNTESE DO VANADATO DE BISMUTO

O vanadato de bismuto ( $\text{BiVO}_4$ ) foi sintetizado utilizando o método hidrotérmico, adaptado do protocolo de Zhang et al. (2006), o qual baseia-se na reação entre nitrato de bismuto [ $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ ] e metavanadato de amônio ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ) em meio aquoso, conduzida em condições controladas para promover a formação do material cristalino desejado. Nessa etapa ocorre a troca iônica entre o  $\text{Bi}^{3+}$  e  $\text{VO}_3^-$  resultando na formação do produto desejado, a Equação 1 apresenta a reação química.



Para isso, preparou-se em um béquer de 100 mL uma solução com 2,45 g de nitrato de bismuto penta-hidratado ( $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) e 0,25g de dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS) em 10 mL de solução de ácido nítrico ( $\text{NH}_3$ ) 4,0 mol  $\text{L}^{-1}$ . Paralelamente, em um béquer de 100 mL acrescentou-se 10 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH) 2,0 mol  $\text{L}^{-1}$  junto à 0,58 g de metavanadato de amônio ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ) e 0,25g de dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS). Ambas as soluções foram posicionadas sob um agitador magnético e mantidas em agitação lenta por 30 minutos, e, após findado o tempo, juntou-se as soluções em um béquer de 500 mL.

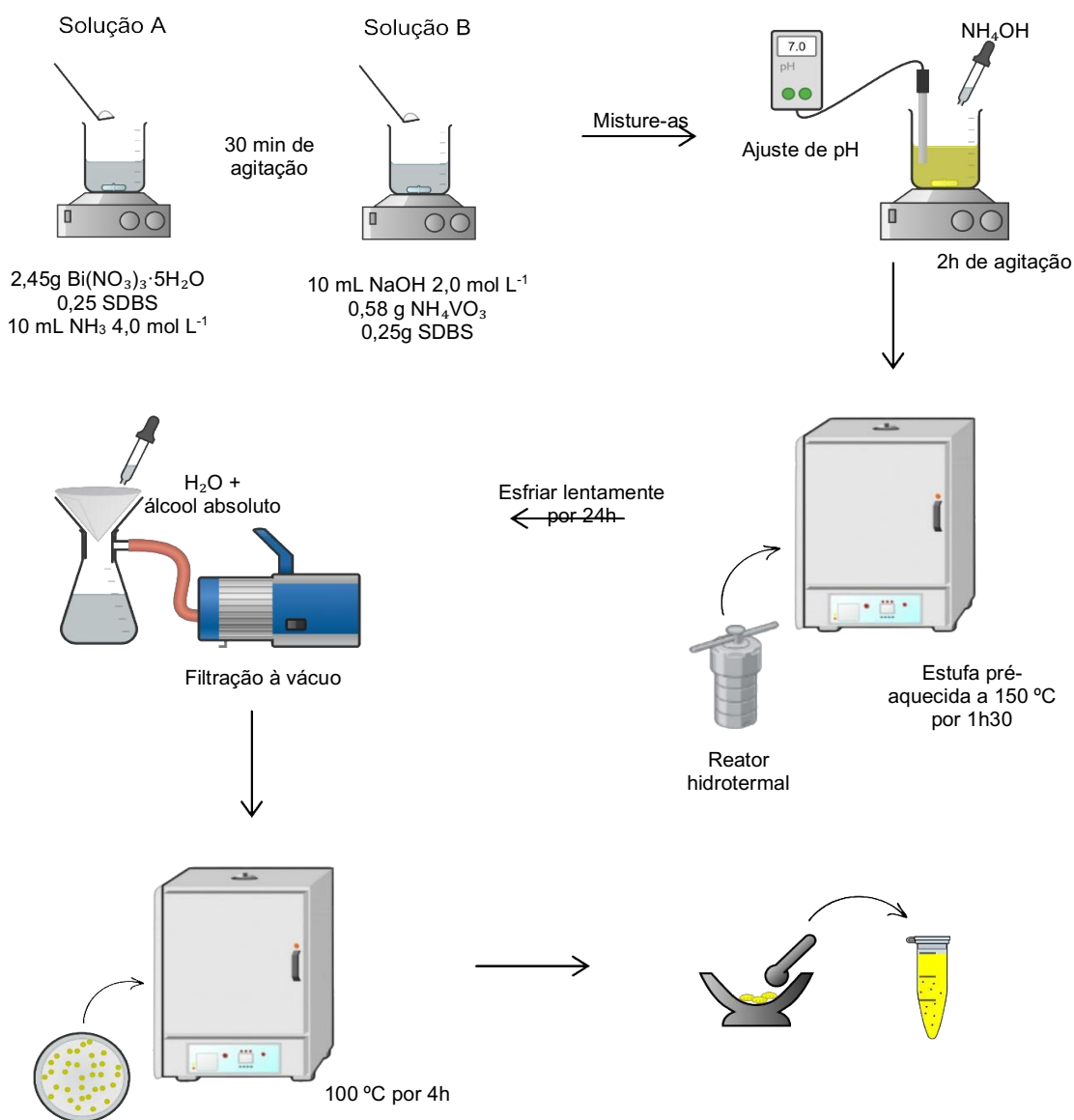
Para garantir que a formação controlada do material desejado o pH da solução foi aferido e ajustado com solução de hidróxido de amônio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), para que o valor se estabilizasse em torno de 7, assegurando-se, assim, que as condições químicas fossem otimizadas nesse procedimento. Após isso, foi recolocado em agitação constante por mais 2 horas.

A mistura resultante foi transferida para um reator hidrotermal de 200 mL com cápsula interna de teflon, o qual foi submetido em estufa durante 1 hora e 30 minutos

a 150 °C. Em seguida, após esse processo, o reator contendo a solução, foi deixado dentro da estufa desligada por 24 horas para esfriar lentamente sem intervenção.

Após o resfriamento, o precipitado formado foi filtrado à vácuo sob pressão reduzida e lavado várias com água destilada e álcool absoluto. Em seguida, transferiu-se para uma placa de petri e colocado em estufa à 100 °C por 4 horas. Concluído o processo de secagem, o material foi macerado utilizando pistilo em almofariz até a obtenção de pó homogêneo e, em seguida, armazenado em recipiente bem vedado para preservação e posterior utilização. O procedimento descrito pode ser melhor observado na Figura 4.

**Figura 4** – Fluxograma da síntese do vanadato de bismuto pelo método hidrotérmico empregado no presente trabalho

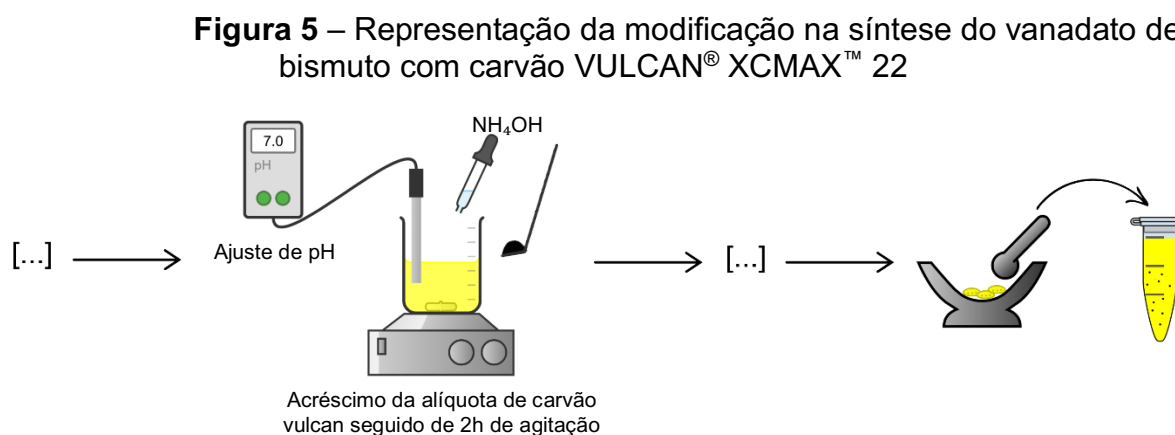


Fonte: Própria autora, 2025.

## 4.2 MODIFICAÇÃO COM CARVÃO VULCAN

O material foi modificado com carvão VULCAN® XCMAX™ 22 em diferentes proporções (0,001 g, 0,01 g, 0,1 g e 1,0 g), com o objetivo de investigar como diferentes alíquotas de carvão afetam as propriedades estruturais e funcionais do vanadato de bismuto. Para isso, repetiu-se o procedimento citado na seção anterior, considerando que cada alíquota de carvão foi acrescentada após a mistura das soluções precursoras de nitrato de bismuto penta-hidratado e metavanadato de bismuto, preparada na etapa inicial da síntese, e mantido sob agitação lenta por 2 horas para promover a interação e homogeneidade entre os componentes desde o início do processo.

O sistema resultante foi submetido ao mesmo procedimento hidrotérmico, e, após a síntese, as amostras modificadas foram filtradas à vácuo, lavadas com água destilada e álcool absoluto, secas em estufa a 100 °C por 4 horas e armazenadas para posterior caracterização, permitindo avaliar o impacto das diferentes alíquotas na estrutura e nas propriedades do material. Tal modificação foi expressa na Figura 5 para melhor entendimento.



Fonte: Própria autora, 2025.

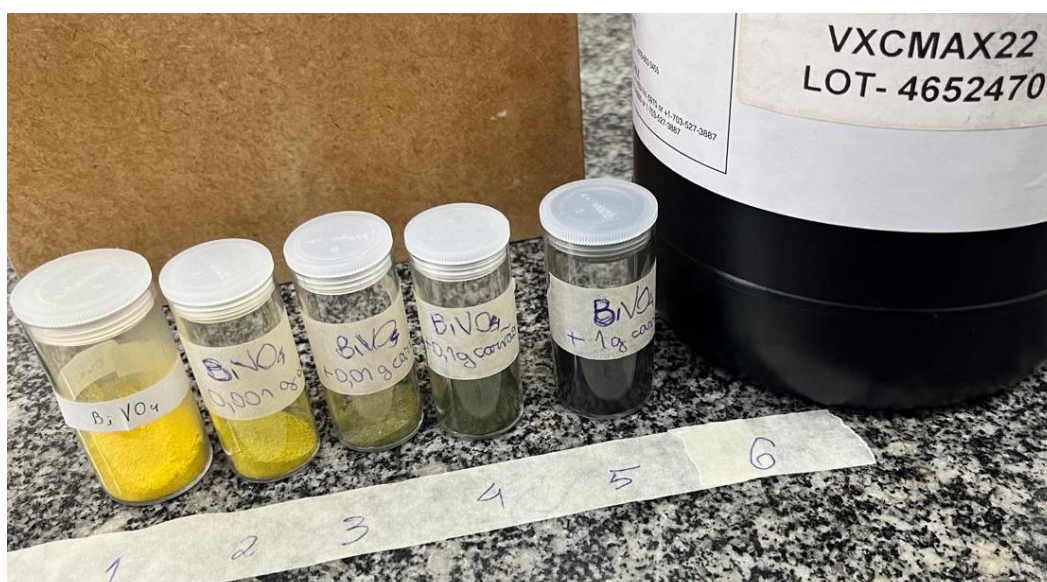
Todas as amostras sintetizadas, após finalização dos procedimentos foram numeradas para posteriores análises e caracterização, como indicado na Tabela 2 e ilustrado na Figura 6.

**Tabela 2** – Identificação das amostras dos produtos obtidos após a síntese e modificações

Amostra	Identificação
1	BiVO <sub>4</sub> puro, sem modificações
2	BiVO <sub>4</sub> + 0,001 g de carvão vulcan
3	BiVO <sub>4</sub> + 0,01 g de carvão vulcan
4	BiVO <sub>4</sub> + 0,1 g de carvão vulcan
5	BiVO <sub>4</sub> + 1,0 g de carvão vulcan
6	Carvão VULCAN® XCMAX™ 22

Fonte: Própria autora, 2025.

**Figura 6** – Produtos obtidos após a síntese e modificações



Fonte: Própria autora, 2025.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO

Visando investigar as alterações induzidas pela modificação no material, fez-se necessário compreender as propriedades estruturais, morfológicas e químicas do vanadato de bismuto puro e modificado com carvão VULCAN® XCMAX™ 22 por meio de métodos de caracterização.

#### 4.3.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas no Laboratório Multiusuário da Pró-Reitoria de Pesquisa e

Pós-Graduação da Universidade Estadual de Londrina (UEL), utilizando um espectrofotômetro da marca Bruker, modelo Vertex 70, equipado com acessório de reflexão total atenuada (ATR) com cristal de diamante. As medições foram realizadas no modo de absorvância, cobrindo a faixa espectral de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

#### 4.3.2 Difração de Raios X (DRX)

As medidas de Difração de Raios X (DRX) foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios X do LARX (Laboratório Multiusuário da Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-graduação) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), em um difratômetro da marca PANalytical modelo X'Pert PRO MPD, com radiação  $\text{CuK}\alpha$ , na técnica conhecida como  $\theta$ - $2\theta$ . A tensão e a corrente usadas foram, respectivamente, 40 KV e 30 mA. O intervalo de varredura  $2\theta$  utilizado foi de 5 a 80 ° com passo angular de 0,04 °. O tempo de contagem por ponto foi de 6,0 s. Para poder desprezar possíveis orientações preferenciais no processo de preparação das amostras e homogeneizar a medida na superfície das amostras, estas foram giradas ciclicamente durante o processo de medida com um período de 1 segundo.

#### 4.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), utilizando um microscópio eletrônico de varredura equipado com canhão de emissão por campo (FEG). As imagens foram adquiridas com uma tensão de aceleração de 20,0 kV, spot size de 3,0 e detector de elétrons secundários (SE). As ampliações utilizadas variaram entre 1000x, 5000x, 10000x e 30000x, permitindo uma análise detalhada da morfologia das amostras. A distância de trabalho (WD) foi ajustada para 11,7 mm, e as imagens foram obtidas em escalas de 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$ , de modo a investigar tanto a distribuição das partículas quanto os aspectos mais refinados da superfície.

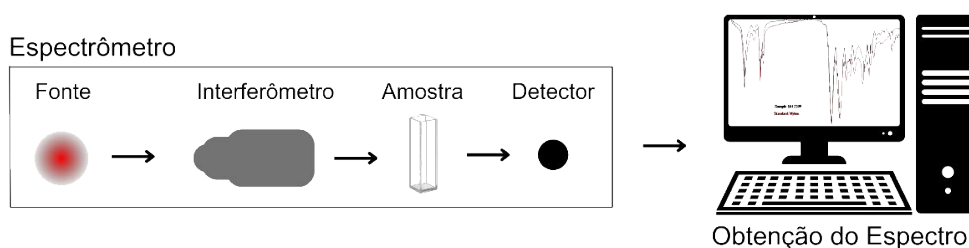
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER

Para o estudo deste trabalho, foi empregada a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) como técnica de caracterização para identificar grupos funcionais e analisar interações químicas no compósito híbrido formado pela modificação do vanadato de bismuto ( $\text{BiVO}_4$ ) com carvão Vulcan. A escolha da FTIR foi baseada nas vantagens descritas por Pavia et al. (2021), que destacam a sensibilidade da técnica para detectar vibrações moleculares específicas, a simplicidade operacional e a capacidade de identificar ligações químicas em materiais com alta precisão.

O princípio do método está relacionado à absorção de radiação infravermelha pelas moléculas do material, que ocorre em frequências características para cada ligação química. No caso do  $\text{BiVO}_4$ , espera-se bandas características como as associadas às vibrações do V–O e Bi–O, enquanto o carvão Vulcan apresenta bandas relacionadas a grupos C=O, C–O ou até C=C, dependendo de sua funcionalização superficial (PAVIA et al., 2021). Essa funcionalização pode ser realizada por meio de tratamentos químicos, como oxidação com ácidos, ou pela adsorção de compostos orgânicos, havendo a introdução de grupos funcionais para melhorar a interação com certos compostos, como metais ou moléculas orgânicas, influenciando suas características espectrais (XU et al., 2022; ZHANG et al., 2016)

**Figura 7** – Esquema ilustrativo do espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)



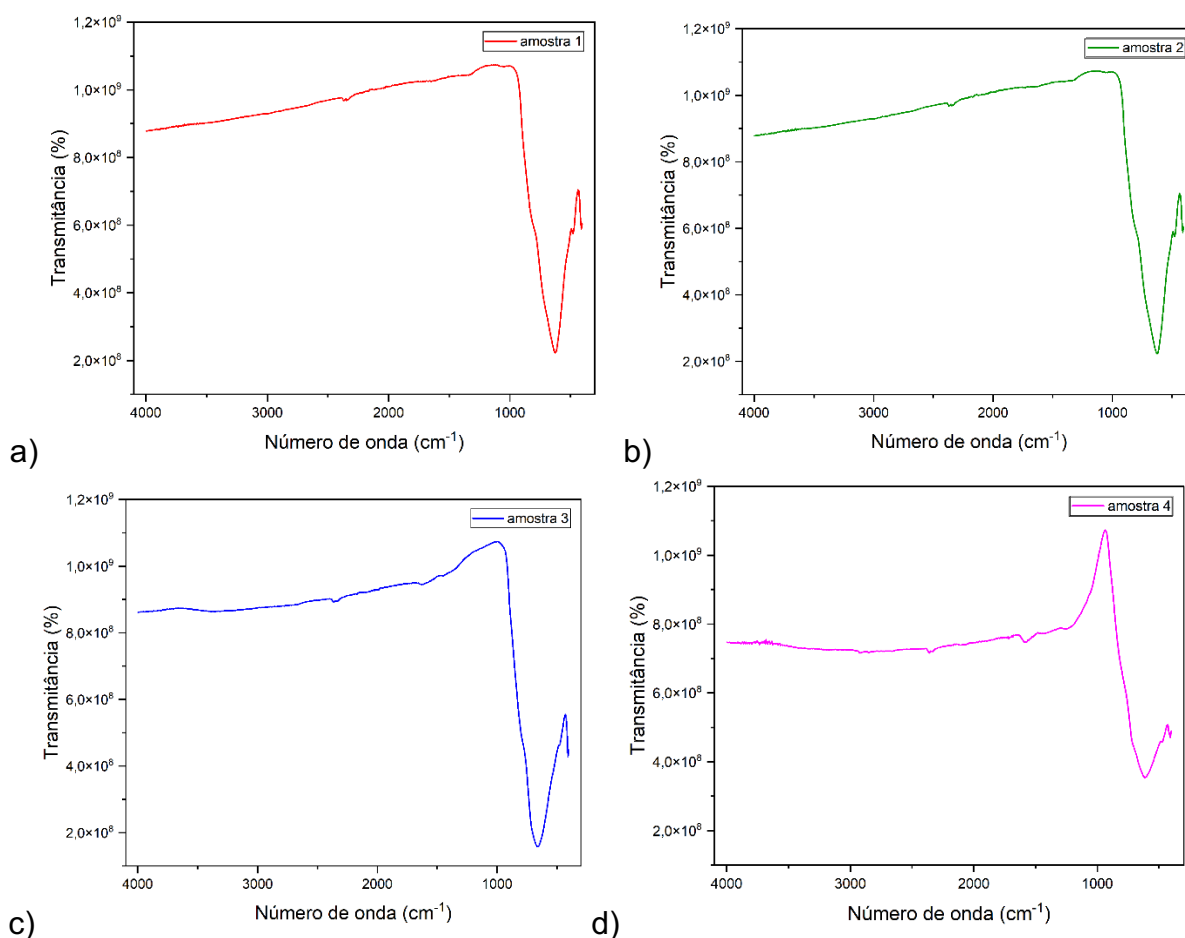
Fonte: Própria autora, 2025.

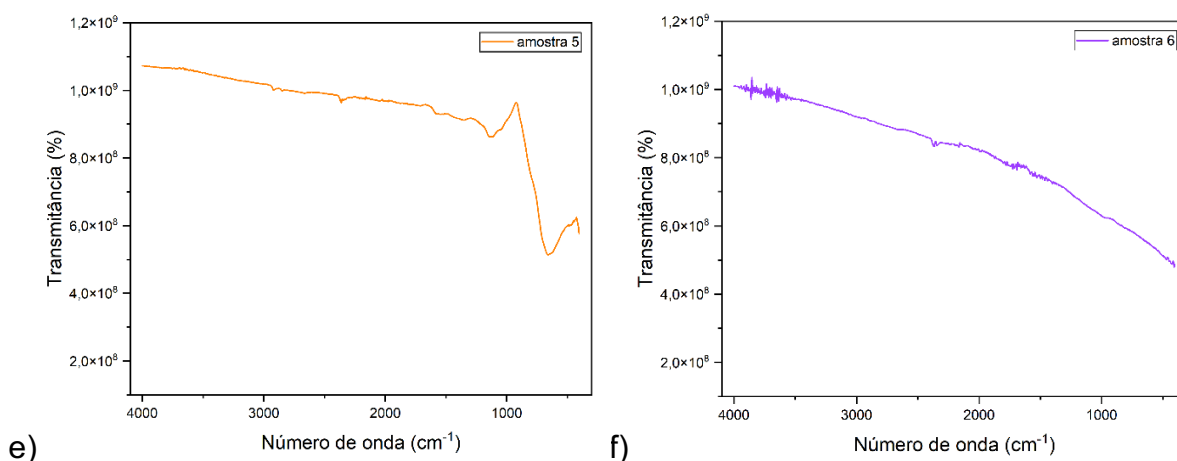
O aparato utilizado para a análise, representado esquematicamente na Figura

7, inclui uma fonte de radiação infravermelha, um interferômetro de Michelson e um detector de alta sensibilidade. Durante a análise, o feixe infravermelho atravessa a amostra, onde diferentes comprimentos de onda são absorvidos dependendo das vibrações moleculares presentes, assim, o resultado é registrado como um espectro que exhibe as bandas correspondentes às ligações químicas presentes na amostra.

Sob tal ótica, utilizando a técnica FTIR foi possível avaliar a interação entre o  $\text{BiVO}_4$  e o carvão Vulcan no composto em todas as concentrações estudadas. A análise envolveu a obtenção de espectros na região de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , identificando bandas específicas que confirmam a presença dos componentes individuais, bem como possíveis novas ligações químicas formadas durante a modificação do material, assim, os espectros obtidos estão apresentados na Figura 8.

**Figura 8** – Espectros obtidos nas análises de FTIR para as distintas amostras: (a)  $\text{BiVO}_4$  puro; (b)  $\text{BiVO}_4$  + 0,001 g de carvão; (c)  $\text{BiVO}_4$  + 0,01 g de carvão; (d)  $\text{BiVO}_4$  + 0,1 g de carvão; (e)  $\text{BiVO}_4$  + 1,0 g de carvão; (f) carvão VULCAN<sup>®</sup> XCMAX<sup>™</sup> 22.





Fonte: Própria autora, 2025.

Quando o carvão VULCAN® XCMAX™ 22 é funcionalizado e entra em contato com o vanadato de bismuto, ocorre a formação de ligações entre grupos funcionais na superfície do carvão (como C=O, C-O ou C-OH) com os íons metálicos presentes no  $\text{BiVO}_4$ , como o  $\text{Bi}^{3+}$  ou  $\text{V}^{5+}$ . Essas interações resultam em ligações de coordenação ou de troca iônica, formando complexos superficiais que alteram as propriedades físico-químicas do material (JARIA et al., 2020; MINES et al., 2017; PAVIA et al., 2021).

Observou-se na análise dos espectros de FTIR que a diminuição da transmitância na estrutura vibracional do  $\text{BiVO}_4$  foi proporcional ao aumento da concentração de carvão Vulcan como modificador. O espectro do carvão Vulcan puro (amostra 6) destaca-se por apresentar um perfil característico de uma curva decrescente contínua, indicando uma ausência de bandas definidas de estiramento vibracional, o que é consistente com sua estrutura amorfa rica em carbono e baixa presença de grupos funcionais específicos (DA SILVA ARAÚJO et al., 2021; PAVIA et al., 2021).

Nos espectros do  $\text{BiVO}_4$  puro (amostra 1) e das amostras com diferentes concentrações de carvão Vulcan (amostras 2 a 5) nota-se variações nas bandas associadas às vibrações de estiramento V–O e Bi–O. A banda intensa em torno de  $600\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao estiramento assimétrico do grupo  $\text{VO}_4^{3-}$  correspondente a modos vibracionais ativos no infravermelho, que são característicos dessa simetria, que possui uma geometria tetraédrica, com simetria aproximada  $T_a$  ( $T_d$ ) (PAVIA et al., 2021).

Verificou-se uma diminuição progressiva em sua intensidade à medida que a

concentração de carvão Vulcan aumenta. Essa análise foi justificada devido as maiores quantidades de carbono presente na estrutura cristalina do  $\text{BiVO}_4$ , e, conseqüentemente, afetando a simetria local (NALLAMUTHU et al., 2019; PAVIA et al., 2021).

Desse modo, a diminuição da linha base nos espectros com maiores teores de carvão atrela-se à maior absorção da radiação infravermelha, associada à natureza condutora do carvão Vulcan, o que sugere uma modificação nas propriedades ópticas do vanadato de bismuto. Assim, a depender da aplicação, o acréscimo excessivo de carvão na rota sintética pode causar implicações diretas no desempenho do material, atuando como centros de recombinação de elétrons, reduzindo a eficiência fotocatalítica, como estudado por Liu et al. (2015) e Adán et al. (2015), que demonstram que a adição moderada de materiais à base de carbono pode melhorar a separação de portadores de carga e a eficiência quântica. Na situação do presente trabalho, o aumento da quantidade de carbono pode obscurecer a superfície ativa do  $\text{BiVO}_4$ , diminuindo a absorção de luz e, conseqüentemente, prejudicando a geração de espécies reativas necessárias (HU et al., 2023; LIU et al., 2017).

Paralelamente, observa-se um acentuamento de banda em torno de  $1000\text{ cm}^{-1}$ , que se torna mais agudo e intenso nas amostras com maiores concentrações de carvão Vulcan. Essa alteração está relacionada à interação superficial do  $\text{BiVO}_4$  e o carvão, promovendo a formação de novas ligações e a intensificação de modos vibracionais já existentes, refletindo como um aumento na densidade eletrônica local e na polarização das ligações (HU et al., 2023; ZHANG et al., 2018).

## 5.2 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Posteriormente, empregou-se a Difração de Raios X (DRX) como técnica de caracterização para investigar a estrutura cristalina e analisar as possíveis alterações induzidas pela modificação do vanadato de bismuto ( $\text{BiVO}_4$ ) com carvão Vulcan. A escolha da DRX baseou-se em suas vantagens amplamente descritas na literatura (BOUROUSHIAN; KOSANOVIC, 2012; JENKINS; SNYDER, 1996), destacando-se a capacidade de identificar fases cristalinas, determinar o grau de cristalinidade e detectar alterações na estrutura.

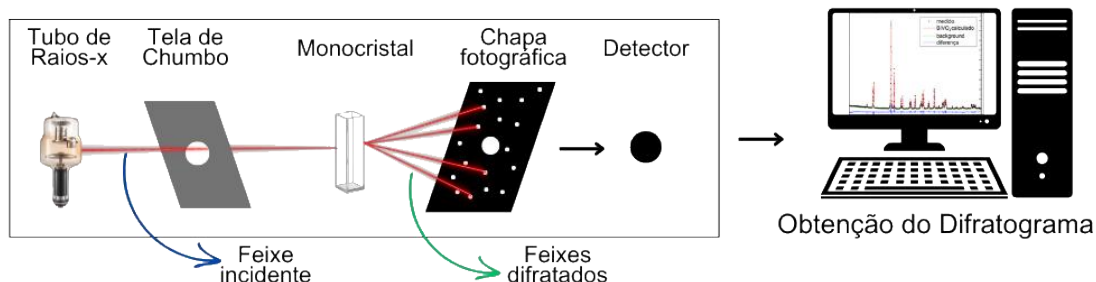
O princípio da técnica está fundamentado na interação de raios X com o arranjo

periódico dos átomos em materiais cristalinos, onde ocorre a difração da radiação em ângulos específicos seguindo a Lei de Bragg, expresso pela Equação 1. Os picos difratados resultantes são característicos de cada fase cristalina, permitindo a identificação da estrutura do  $\text{BiVO}_4$  e das possíveis alterações decorrentes da incorporação do carvão Vulcan (JENKINS; SNYDER, 1996).

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (\text{Eq. 2})$$

O equipamento utilizado para a análise, ilustrado na Figura 9, consistiu em um difratômetro de raios X com radiação  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ). A preparação das amostras seguiu protocolos de homogeneização e ciclagem durante as medições, conforme recomendado por Jenkins e Snyder (1996).

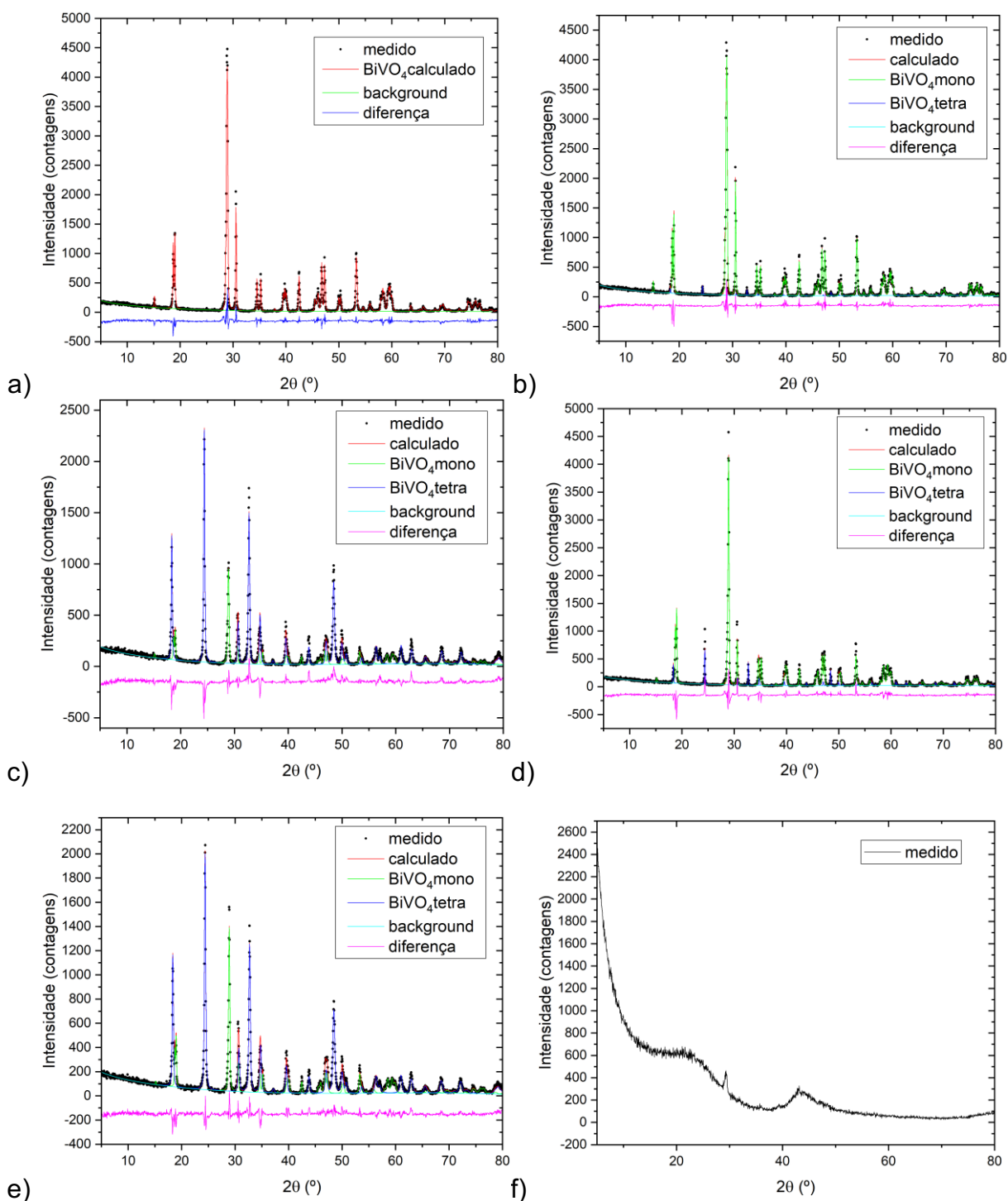
**Figura 9** – Esquema ilustrativo da Difração de Raios-X (DRX), mostrando o princípio da interação dos raios X com o arranjo periódico dos átomos em um material cristalino



Fonte: Própria autora, 2025.

Para o  $\text{BiVO}_4$ , espera-se identificar picos correspondentes à fase monoclinica do tipo scheelita (JCPDS nº 14-0688), caracterizada por difrações em ângulos específicos, como em torno de 18,5, 28,8, 30,5 e 35,2 ( $2\theta$ ), associados, respectivamente, aos planos cristalográficos (121), (040), (200) e (002). Essa fase monoclinica é um indício da organização cristalina estável do  $\text{BiVO}_4$ , mas, por outro lado, é possível a presença da fase tetragonal (JCPDS nº 01-083-1812), que se caracteriza por picos adicionais em ângulos como 24,4, 29,2 e 35,7 ( $2\theta$ ), associados aos planos (101), (112) e (200), respectivamente (“INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA (ICDD)”, 2001). Os difratogramas obtidos foram apresentados na Figura 10.

**Figura 10** – Difratogramas de DRX para as distintas amostras: (a)  $\text{BiVO}_4$  puro; (b)  $\text{BiVO}_4$  + 0,001 g de carvão; (c)  $\text{BiVO}_4$  + 0,01 g de carvão; (d)  $\text{BiVO}_4$  + 0,1 g de carvão; (e)  $\text{BiVO}_4$  + 1,0 g de carvão; (f) carvão VULCAN® XCMAX™ 22



Fonte: Própria autora, 2025.

Após a identificação das fases, extraiu-se informações sobre as propriedades estruturais como parâmetros de rede, volume da célula unitária e tamanho médio dos cristallitos, calculado por meio da Equação 2, onde os resultados foram expressos na

Tabela 3 (a amostra 6 não foi incluída nesse devido sua estrutura amorfa). Sendo  $D$ , o diâmetro do cristalito,  $k$ , a constante dos fatores cristalográficos que depende do plano e da simetria cristalina com valor de 0,89,  $\lambda$ , o comprimento de onda da radiação utilizada na análise,  $\beta$  a largura à meia altura do pico de difração,  $\theta$ , o ângulo de Bragg,  $M$ , o vanadato de bismuto em sua forma monoclinica e  $T$  em sua forma tetragonal (THOMPSON; COX; HASTINGS, 1987).

$$D = \frac{k \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (\text{Eq. 3})$$

**Tabela 3** – Dados estruturais das amostras de de  $\text{BiVO}_4$  puro e modificado com diferentes concentrações de carvão VULCAN® XCMAX™ 22

Amostra	Parâmetro de rede (Å)			Volume da Célula Unitária (Å <sup>3</sup> )	Tamanho do cristalito (nm)	
	a	b	c			
1	M	7,25	11,70	5,094	309,67	0 (1)
	T	-	-	-		
2	M	7,25	11,70	5,10	309,72	4000 (1)
	T	7,30	7,30	6,46		
3	M	7,25	11,70	5,10	309,68	34000 (2)
	T	7,30	7,30	6,46		
4	M	7,25	11,70	5,10	309,08	1000 (2)
	T	7,30	7,30	6,46		
5	M	7,25	11,70	5,10	309,25	18000 (2)
	T	7,30	7,30	6,46		

Fonte: Própria autora, 2025.

A análise dos dados supracitados revelou picos intensos e bem definidos para o  $\text{BiVO}_4$  puro, característicos da fase monoclinica, confirmando a cristalinidade do material. Assim, obteve-se parâmetros de rede sem mudanças significativas, tanto como para o volume da célula unitária, havendo apenas uma leve diferença entre o tamanho dos cristalitos, que estão em conformidade com a literatura (JCPDS nº 14-0688). Mas, foi possível observar a presença do  $\text{BiVO}_4$  tetragonal, que é uma fase cristalina menos estável em comparação com a fase monoclinica, possuindo características estruturais e eletrônicas que influenciam significativamente nas suas propriedades físico-químicas. Assim, o aumento da concentração de carvão Vulcan indica uma possível diminuição do grau de cristalinidade, caracterizado pelo mascaramento parcial das fases cristalinas devido à presença da matriz de carbono (“INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA (ICDD)”, 2001; KUDO;

MISEKI, 2009).

Segundo estudo realizado por Scherrer (1912), o alargamento de alguns picos na rede de difração sugere a redução do tamanho das partículas cristalinas, uma vez que a largura à meia altura está inversamente relacionada ao tamanho dos cristalitos. Foi possível observar esse comportamento nos picos obtidos, indicando que as partículas apresentam dimensões nanométricas, o que influencia diretamente nas propriedades físico-químicas do material, como a área de superfície específica e a reatividade. No difratograma, picos mais largos foram identificados em regiões correspondentes aos planos cristalográficos do  $\text{BiVO}_4$ , especialmente após a adição de carbono, o que sugere uma possível redução no tamanho dos domínios cristalinos, concordando com a contribuição para um ambiente de síntese mais heterogêneo (CULLITY; WEYMOUTH, 1957; SCHERRER, 1912; WELLER et al., 2018).

A fase tetragonal é caracterizada pelo grupo espacial  $I4_1/amd$  (141), apresentando uma simetria mais alta e parâmetros de rede equivalentes nos eixos a e b, com valores próximos de 7,29 Å, enquanto o eixo c apresenta um comprimento em torno de 6,45 Å. No difratograma, o  $\text{BiVO}_4$  tetragonal é identificado por picos característicos em ângulos  $2\theta$ , como 24,4, 29,2 e 35,7, que diferem daqueles observados para a fase monoclinica. A presença dessa fase está frequentemente associada a condições de síntese específicas, como variações na temperatura de calcinação e na composição química, especialmente quando materiais condutores de carbono são incorporados (PACKIARAJ et al., 2020).

O surgimento da fase tetragonal nas amostras modificadas pode indicar uma transição de fase induzida pelo carbono, sugerindo uma alteração no empacotamento atômico e na energia de superfície do material (JO et al., 2015; PARK; MCDONALD; CHOI, 2013; TSAY et al., 2023). A transição de fase entre as formas monoclinica e tetragonal do  $\text{BiVO}_4$ , por exemplo, está associada a uma maior simetria e parâmetros de rede específicos, o que pode resultar em propriedades melhoradas para determinadas aplicações, como na catálise. Assim como a indução da transição de fase promove uma alteração no empacotamento atômico e na energia de superfície do material (FAWZI et al., 2022).

A variação de temperatura durante a calcinação afeta a estabilidade das fases cristalinas, favorecendo a formação de estruturas mais ordenadas em temperaturas mais altas, o que pode resultar em uma maior cristalinidade e propriedades superiores, como maior reatividade e estabilidade térmica (KADYRZHANOV et al., 2024; QI et al.,

2018). A composição química do material, como a incorporação de carbono, pode alterar o equilíbrio iônico e a estrutura do  $\text{BiVO}_4$ , promovendo a formação da fase tetragonal e influenciando a distribuição dos íons metálicos, o que afeta diretamente suas propriedades físico-químicas.

O empacotamento atômico, por sua vez, determina a densidade e a porosidade do material, impactando sua reatividade e eficiência em processos de adsorção e catálise. A energia de superfície, que está relacionada com a reatividade das superfícies do material, também é alterada pelas condições de síntese e pode influenciar a interação com outras substâncias, tornando o material mais eficiente em aplicações que requerem alta atividade superficial (DELGADO; QUINTERO, 2022; QI et al., 2018). Na Tabela 4 é possível verificar a quantificação de cada uma das fases cristalinas para cada amostra analisada que foi extraído do refinamento de Rietveld.

**Tabela 4** – Quantificação das fases cristalinas das amostras de  $\text{BiVO}_4$  puro e modificado com diferentes concentrações de carvão VULCAN® XCMAX™ 22 obtidas no DRX

Amostra	Quantificação de Fases de $\text{BiVO}_4$ (%)	
	Monoclínico	Tetragonal
1	100,0	-
2	97,5 (5)	2,5 (1)
3	24,1 (3)	76,0 (1)
4	88,7 (1)	11,3 (2)
5	31,1 (3)	68,9 (4)
6	-	-

Fonte: Própria autora, 2025.

A análise dos dados revela uma clara influência da adição de carvão Vulcan na estabilidade das fases cristalinas do  $\text{BiVO}_4$ , visto que na amostra pura, foi observada exclusivamente a fase monoclínica, que é termodinamicamente mais estável em condições padrões. No entanto, com a introdução de 0,001 g de carvão, uma pequena fração da fase tetragonal (2,5%) emergiu, comprovando que quantidades mínimas de carbono atuam como um agente de tensão estrutural, facilitando o início da transição de fase (LIU et al., 2017; TSAY et al., 2023).

Vale elencar que ao aumentar para 0,01 g de carvão, ocorreu uma inversão significativa, com a fase tetragonal se tornando predominante (76%) em detrimento da fase monoclínica (24,1%), resultado o qual sugere que a presença do carvão modifica o ambiente cristalino, influenciando em parâmetros como a energia de

superfície e o empacotamento atômico, prejudicando a estabilidade das fases. Contudo, ao atingir 0,1 g de carvão houve um retorno da predominância da fase monoclinica, o que pode indicar uma reorganização estrutural associada à saturação dos efeitos do carbono ou à formação de uma rede mais estável (AFONSO et al., 2014; KUDO; MISEKI, 2009; TIMMAJI et al., 2011; USAI et al., 2013).

Por fim, com a adição de 1,0 g de carvão, observou-se novamente um aumento da fase tetragonal, evidenciando que o impacto do carbono não é linear, mas sim dependente de um equilíbrio complexo entre concentração, distribuição do carbono e a resposta da rede cristalina. Esses resultados mostram que o carvão Vulcan esteve presente somente como um modificador superficial, pois induziu a transição estrutural de fases, modulando as propriedades do  $\text{BiVO}_4$  de acordo com a concentração presente na amostra (HU et al., 2023; SUN et al., 2009; YI; WANG; LEE, 2024).

Outro aspecto relevante foi o aparecimento de um halo difuso nas amostras com maior teor de carvão Vulcan, típico de materiais amorfos, confirmando a presença do carbono na matriz do vanadato de bismuto após a modificação. Esse comportamento é consistente com estudos prévios (HU et al., 2023; KUMAR et al., 2017; RODRIGUES et al., 2024; WANG et al., 2013), que explicam que a adição de carbono pode induzir desordem estrutural. Isso se deve ao carbono não atuar somente como um suporte condutor, mas também influenciar o empacotamento cristalino e a formação de defeitos, acarretando assim, na estabilidade do composto.

A presença do carvão Vulcan altera a relação entre as fases do  $\text{BiVO}_4$  devido à sua capacidade de interagir com a superfície do material e modificar a dinâmica da nucleação durante a formação do composto. O carvão, ao ser introduzido no processo de síntese, pode funcionar como um moderador das condições redox, alterando o ambiente químico e favorecendo a transição entre as fases cristalinas. A modificação da superfície do material, promovida pela adsorção de grupos funcionais do carvão, pode também impactar a energia de superfície, que é relevante para a estabilidade das fases cristalinas do  $\text{BiVO}_4$  (TSAY et al., 2023; ZHU et al., 2014).

No que diz respeito ao pH, um valor neutro, como o utilizado no presente trabalho, facilita a síntese do  $\text{BiVO}_4$ , mantendo um equilíbrio ideal entre as espécies metálicas e impedindo a precipitação excessiva ou dissolução de compostos durante a reação. O pH 7 favorece a estabilidade das fases cristalinas, permitindo um controle mais preciso sobre a formação da estrutura e, ao mesmo tempo, promovendo a interação entre o carvão VULCAN® XCMAX™ 22 e o vanadato de bismuto de forma

que a fase desejada seja obtida com maior eficiência. Assim como influencia as interações iônicas entre os precursores, e essas variações podem alterar a distribuição das fases e a morfologia do material final (TSAY et al., 2023).

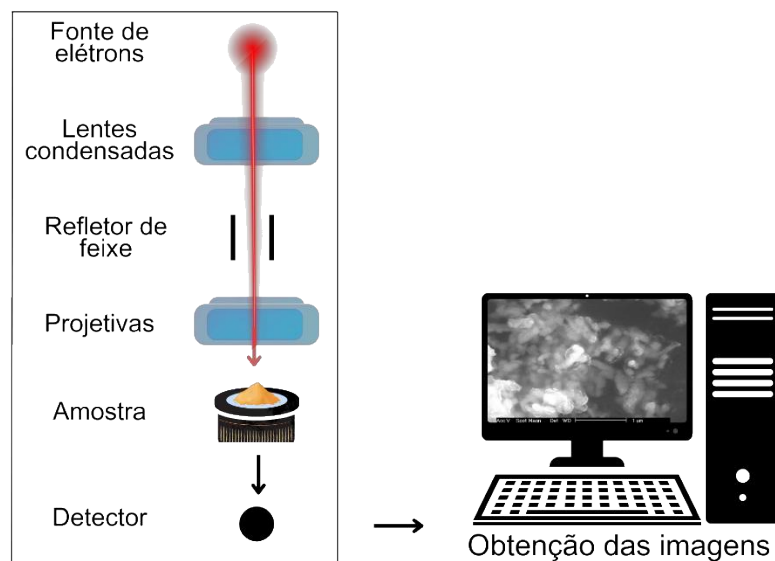
### 5.3 MORFOLOGIA OBTIDA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Para a caracterização morfológica do vanadato de bismuto ( $\text{BiVO}_4$ ) sintetizado nesse trabalho, empregou-se a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), complementada por análises de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS). A escolha do MEV baseou-se em suas vantagens amplamente reconhecidas na literatura (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007; EGERTON, 2005), destacando-se a capacidade de fornecer imagens de alta resolução que revelam detalhes da morfologia da superfície, distribuição de partículas e a presença de aglomerados.

O microscópio óptico, mais conhecido e de menor custo, utiliza luz visível e lentes de vidro para ampliar amostras, permitindo observar estruturas celulares com resolução limitada, geralmente até 200 nm. Em contraste, o microscópio eletrônico de varredura emprega um feixe de elétrons para gerar imagens de alta resolução, alcançando detalhes na ordem de nanômetros, além de fornecer informações topográficas tridimensionais das superfícies. Sendo assim, o MEV é mais vantajoso devido à sua capacidade de ampliar em até 500.000 vezes e oferecer imagens com maior profundidade de campo e contraste, essenciais para análises detalhadas dos materiais em questão (COSTA, 2016; RAVEN, 1996).

O princípio do MEV está fundamentado na interação de um feixe de elétrons de alta energia emitidos com a superfície da amostra, sendo que esses elétrons geram diferentes sinais, como elétrons secundários e retroespalhados. Assim, as emissões são detectadas pelo equipamento para formar imagens detalhadas da topografia e composição morfológica do material (GOLDSTEIN et al., 2003; REIMER, 1998). A análise pela EDS, que utiliza detector dos raios-X, permite identificar a distribuição elementar dos constituintes do vanadato de bismuto. O esquema de funcionamento do MEV está representado na Figura 11.

**Figura 11** – Esquema ilustrativo do funcionamento do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



Fonte: Própria autora, 2025.

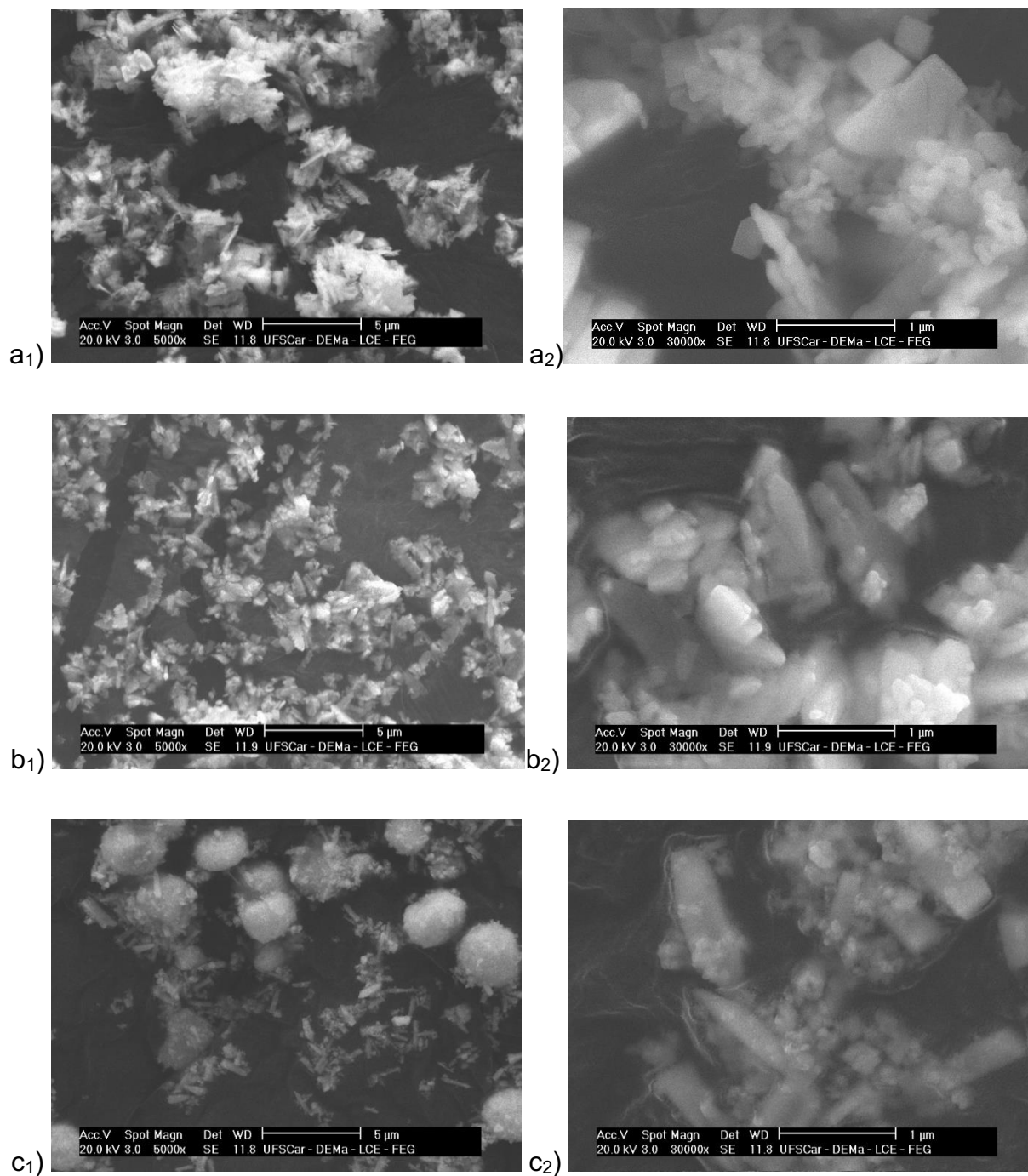
O método hidrotérmico utilizado no presente trabalho, realizado em um autoclave sob alta pressão e temperatura, permite a formação de materiais com cristalinidade aprimorada, já que essas condições favorecem a nucleação e o crescimento ordenado dos cristais. Essa abordagem resulta em uma maior uniformidade na distribuição dos componentes e pode facilitar a transição para fases específicas.

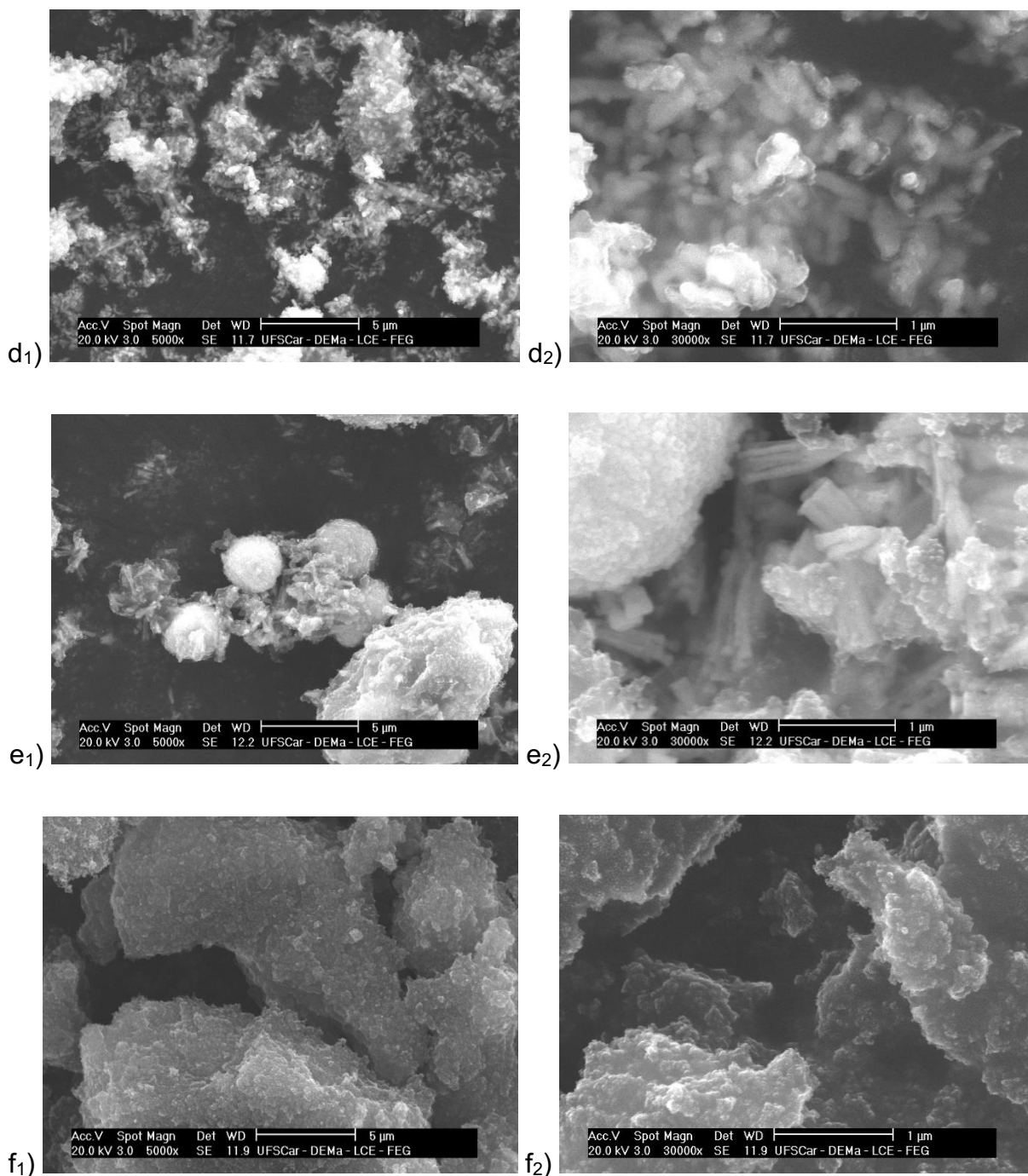
Tal metodologia permite que haja interação entre os precursores e o solvente aquoso no processo, e pode influenciar diretamente o arranjo atômico e a formação da rede cristalina do  $\text{BiVO}_4$ . Visto que o método hidrotérmico é eficaz na modulação do tamanho dos cristais, o que pode afetar suas propriedades físicas e reativas, como a superfície específica. A síntese hidrotérmica cria um ambiente ideal para o controle preciso da estrutura cristalina do  $\text{BiVO}_4$ , promovendo a formação de cristais mais ordenados e favorecendo a estabilidade de fase, auxiliando na melhoria da eficiência do material sintetizado (NIU et al., 2015; ZHAO et al., 2016).

Na análise do vanadato de bismuto puro, espera-se observar partículas com morfologia irregular, bordas bem definidas e tamanho relativamente uniforme, características associadas à sua estrutura cristalina monoclinica. E, com a adição de carvão Vulcan seja possível de identificar mudanças na morfologia das amostras, como a formação de aglomerados menores e uma distribuição mais homogênea das partículas sobre a matriz do  $\text{BiVO}_4$  (GORLA et al., 2024; ZHANG; CHEN; JIAO, 2006).

As micrografias obtidas por MEV estão apresentadas na Figura 12.

**Figura 12** – Microscopia eletrônica de varredura para as distintas amostras em (1) 5000x à 5  $\mu\text{m}$  e (2) 30000x à 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente, sendo: (a)  $\text{BiVO}_4$  puro; (b)  $\text{BiVO}_4$  + 0,001 g de carvão; (c)  $\text{BiVO}_4$  + 0,01 g de carvão; (d)  $\text{BiVO}_4$  + 0,1 g de carvão; (e)  $\text{BiVO}_4$  + 1,0 g de carvão; (f) carvão VULCAN® XCMAX™ 22





Fonte: Própria autora, 2025.

Na ampliação de 5000x para o  $\text{BiVO}_4$  puro (Figura 12 (a<sub>1</sub>)), observam-se partículas com morfologia irregular, predominantemente em forma de placas e aglomerados, com bordas definidas e tamanho relativamente uniforme. Em 30000x, torna-se os contornos bem definidos, característica da fase monoclinica do  $\text{BiVO}_4$  (ALMEIDA, 2022; LI; LIU; DUAN, 2009; YALÇIN; DÜKKANCI, 2022).

O aumento progressivo da concentração de carvão Vulcan resultou em alterações notáveis na morfologia, considerando-se que, nas imagens de 5000x foi

possível observar uma dispersão mais homogênea das partículas, com redução do tamanho médio dos aglomerados e uma textura superficial. Em concentrações intermediárias (0,01 g e 0,1 g), destacam-se áreas com aglomeração de partículas menores sugerindo uma melhor dispersão do carvão na matriz de  $\text{BiVO}_4$ , favorecendo o aumento da área superficial (WANGKAWONG et al., 2024).

Em 30000x, verifica-se que o carvão Vulcan forma uma rede interconectada ao redor das partículas de  $\text{BiVO}_4$ , criando uma estrutura heterogênea, visto que a presença de microcavidades é mais acentuada nas amostras com 1,0 g de carvão, indicando que o excesso de carbono leva à formação de aglomerados, dificultando a uniformidade da superfície (WANGKAWONG et al., 2024; ZHONG et al., 2023).

Além disso, é provável que as superfícies apresentem um aspecto diferente, especialmente em amostras com maiores concentrações de carvão, devido à boa dispersão do material carbonáceo. As modificações podem estar associadas à interação entre o  $\text{BiVO}_4$  e o carvão Vulcan.

A estrutura e a morfologia do carvão Vulcan, observada nas imagens, revela uma superfície típica, com aglomerados de diferentes tamanhos, os quais são características fundamentais que conferem a alta área superficial específica e capacidade de adsorção à esse material (ALAGHMANDFARD et al., 2021; FERRARI; ROBERTSON, 2000). Comparando com outros derivados do carbono, assim como expresso na Tabela 5, o carbono black e grafite possuem uma superfície mais uniforme e menos porosa, o que resulta em uma menor capacidade de interação com espécies químicas e menor dispersão de partículas ativas e tornam as propriedades do carvão Vulcan superiores em aplicações que demandam transferência eletrônica e interação com semicondutores (CAROLINA MANEA BUENO et al., 2019; MOTA, 2020).

**Tabela 5** – Comparação das propriedades funcionais de materiais derivados de carbono

Propriedades	VULCAN® XCMAX™ 22	Carbono Black	Grafite	Grafeno	Nanotubos de carbono (CNTs)
Área superficial (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	250 – 300	50 - 150	5 - 20	~ 2630	100 - 1000
Condutividade elétrica (S cm <sup>-1</sup> )	10 <sup>2</sup> – 10 <sup>3</sup>	10 <sup>1</sup> – 10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>4</sup>	~10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup> – 10 <sup>6</sup>
Estrutura	Amorfa	Amorfa	Cristalina	Cristalina	Cristalina
Porosidade	Elevada	Moderada	Baixa	Não Aplicável	Não Aplicável
Morfologia	Esférica e aglomerada	Esférica e primária	Laminar	Planar	Tubular
Pureza (%)	≥ 99	97 - 99	≥ 99,5	Variável	Variável
Tamanho das partículas (nm)	30 - 50	20 - 40	1000 - 10000	~ 0,34 (espessura)	1 – 3 (diâmetro); até micrômetros (comprimento)
Referência	(“VULCAN® XCMAX™ carbon blacks”, 2016)	(MALLETTE et al., 2001)	(GREEN et al., 2008)	(BONACCORSO et al., 2015)	(EATEMADI et al., 2014)

**Fonte:** Própria autora, 2025

O Carvão do tipo VULCAN® XCMAX™ 22 é uma variedade do carbono black com característica principal de supercondutor, desenvolvido pela Cabot Corporation, projetado para aplicações que necessitam de alta condutividade elétrica e baixas cargas de preenchimento, visto que sua morfologia permite alcançar níveis de condutividade mesmo que haja uma menor adição de material. Estudos de lixiviação revelaram que o XCMAX 22 é capaz de preservar as propriedades mecânicas como alongamento na ruptura e resistência ao impacto, mesmo quando utilizado como modificador, além de que apresenta baixa absorção de umidade (“VULCAN® XCMAX™ carbon blacks”, 2016).

Assim, comparando-se com as demais variedades do carbono supracitadas na Tabela 5, o VULCAN® XCMAX™ 22 destaca-se devido à combinação de alta condutividade elétrica, elevada área superficial e excelente dispersão em matrizes poliméricas. Diferentemente do carbono black convencional e do grafite, o material carbonáceo aplicado nesse trabalho possui maior estabilidade, superando o desempenho de materiais que são mais porosos. Equiparando-se as estruturas cristalinas, é possível verificar uma melhor compatibilidade com diferentes matrizes devido à sua morfologia amorfa e aglomerada, favorecendo a dispersão homogênea, assim, todos os atributos citados quando aliados, o tornam uma escolha eficiente em inúmeras aplicações (ALAGHMANDFARD et al., 2021; GREEN et al., 2008).

A dispersão homogênea do carbono na matriz polimérica permite uma distribuição mais uniforme das partículas de carbono, evitando aglomeração ou formação de zonas não reativas. Isso resulta em uma melhor condutividade elétrica, uma vez que a rede de carbono pode estabelecer um caminho contínuo e eficiente para a condução de elétrons. Além disso, a dispersão adequada também melhora a interação entre o carbono e os outros componentes da matriz polimérica, o que pode otimizar propriedades mecânicas e térmicas. Esse fator aumenta a durabilidade e a performance do material, e, a compatibilidade entre o carbono e a matriz polimérica, propiciada pela sua morfologia amorfa e aglomerada, também facilita o processamento e a integração do material (DOEFF et al., 2008; MA et al., 2010; XIE; MAI; ZHOU, 2005).

Pensando em contrapor com as demais caracterizações utilizadas no presente trabalho, vale observar os resultados obtidos na Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS), correlacionando as modificações estruturais observadas com a composição química das amostras. Tais espectros revelaram a presença

predominante de bismuto (Bi), vanádio (V) e oxigênio (O), o que era esperado, visto que que são os constituintes do  $\text{BiVO}_4$ .

Nas amostras modificadas com carvão, observou-se uma variação significativa nos picos de carbono (C), proporcional ao aumento da concentração do composto. Houve uma intensificação dos picos, indicando a dispersão do carbono na matriz do  $\text{BiVO}_4$ , devido à maior homogeneidade composicional e ao efeito de sombreamento causado pela camada de carbono e as partículas do material, conforme descrito por Donnet et al. (1993). Quando uma camada de carbono é formada sobre as partículas, ela pode atuar como uma cobertura que reduz a exposição das superfícies do  $\text{BiVO}_4$  à radiação, impedindo que a radiação atinja diretamente a superfície da partícula e, conseqüentemente, modificando a distribuição dos picos característicos no espectro. Assim, pode causar modificações nas análises devido à absorção ou bloqueio parcial da radiação incidente (BOUKFESSA; BEZZAZI, 2021; DONNET, 1993).

Segundo Wang et al. (2017) o aumento da proporção de carbono é correlacionado com a redução da intensidade relativa do oxigênio, indicando uma possível interação química entre o  $\text{BiVO}_4$  e o carvão Vulcan. Desse modo, é possível visualizar a influência da concentração de carbono na composição elementar, e, afetando a distribuição da densidade eletrônica na interface do compósito.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nas caracterizações realizadas, se fez possível apurar as propriedades estruturais e morfológicas do vanadato de bismuto modificado com carvão VULCAN® XCMAX™ 22. A modificação conferiu mudanças significativas nas fases cristalinas, especialmente no que se refere à transição entre as fases monoclinica e tetragonal. A adição do carbono na rede cristalina resultou em uma melhoria na dispersão do material, mas quando em excesso, pode ser prejudicial às propriedades fotocatalíticas devido as alterações na rede cristalina, reduzindo a separação de cargas e bloqueando a ativação da luz nas superfícies ativas.

Além disso, após a análise do FTIR, DRX e MEV, observou-se uma distribuição homogênea do carbono na matriz do  $\text{BiVO}_4$ , confirmando a eficácia da modificação realizada na síntese. A presença do carvão foi corroborada de forma proporcional à concentração adicionada, sendo possível visualizar tal fator em todas as caracterizações, de modo que afetou a composição elementar e influenciou no aumento ou diminuição da absorção de luz visível. A combinação dos resultados obtidos confirmou o potencial do material modificado para aplicações futuras, embora, a depender, se faz necessário a realização de outras metodologias de caracterização para avaliar a eficiência específica da concentração de carbono para otimizar o desempenho.

Com isso, conclui-se que, a modificação do  $\text{BiVO}_4$  com carvão VULCAN® XCMAX™ 22 demonstrou eficácia para a melhor funcionalidade do material, ampliando suas possibilidades de aplicações.

## REFERÊNCIAS

ADÁN, C. et al. Photocatalytic activity of bismuth vanadates under UV-A and visible light irradiation: Inactivation of *Escherichia coli* vs oxidation of methanol. **Catalysis Today**, v. 240, p. 93–99, fev. 2015.

AFONSO, R. et al. Photoelectroactivity of Bismuth Vanadate Prepared by Combustion Synthesis: Effect of Different Fuels and Surfactants. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2014.

ALAGHMANDFARD, A. et al. Recent advances in the modification of carbon-based quantum dots for biomedical applications. **Materials Science and Engineering: C**, v. 120, p. 111756, jan. 2021.

ALMEIDA, K. A. DE. **Nanoestruturas de BiVO<sub>4</sub> obtidas via método hidrotérmico de micro-ondas e avaliação da sua atividade fotocatalítica**. Uberlândia.

BASIVI, P. K. et al. Graphitic carbon nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)-Based Z-scheme photocatalysts: Innovations for energy and environmental applications. **Materials Today Sustainability**, v. 29, p. 101069, mar. 2025.

BONACCORSO, F. et al. Graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage. **Science**, v. 347, n. 6217, 2 jan. 2015.

BOUKFESSA, H.; BEZZAZI, B. The effect of carbon black on the curing and mechanical properties of natural rubber/ acrylonitrile- butadiene rubber composites. **Journal of Applied Research and Technology**, v. 19, n. 3, p. 194–201, 30 jun. 2021.

BOUROUSHIAN, M.; KOSANOVIC, T. Characterization of Thin Films by Low Incidence X-Ray Diffraction. **Crystal Structure Theory and Applications**, v. 01, n. 03, p. 35–39, 2012.

CAI, H. et al. Facile Phase Control and Photocatalytic Performance of BiVO<sub>4</sub> Crystals for Methylene Blue Degradation. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 4, p. 3093, 10 fev. 2023.

CAROLINA MANEA BUENO, A. et al. Síntese e caracterização de nanofibras de C/BiVO<sub>4</sub> via carbonização do polímero PVA: um potencial material fotoeletrocatalítico. **COLLOQUIUM EXACTARUM**, v. 11, n. 3, p. 104–112, 1 set. 2019.

CHEN, S.-H.; JIANG, Y.-S.; LIN, H. Easy Synthesis of BiVO<sub>4</sub> for Photocatalytic Overall Water Splitting. **ACS Omega**, v. 5, n. 15, p. 8927–8933, 21 abr. 2020.

CHEN, W.-S.; WU, M.-H.; WU, J.-Y. Effects of Tb-Doped BiVO<sub>4</sub> on Degradation of Methylene Blue. **Sustainability**, v. 15, n. 8, p. 6994, 21 abr. 2023.

COSTA, F. R. T. DA. **Microscopia Eletrônica de Varredura: potencialidades e aplicações**. São Luís: UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO, 2016.

CULLITY, B. D.; WEYMOUTH, J. W. Elements of X-Ray Diffraction. **American Journal of Physics**, v. 25, n. 6, p. 394–395, 1 set. 1957.

DA SILVA ARAÚJO, M. et al. Visible Light Photoelectrochemical Sensor for Acetaminophen Determination using a Glassy Carbon Electrode Modified with BiVO<sub>4</sub> Nanoparticles. **Electroanalysis**, v. 33, n. 3, p. 663–671, 5 mar. 2021.

DA SILVA PELISSARI, M. R. et al. Evaluation of the heterostructure ITO/BiVO<sub>4</sub> under blue monochromatic light irradiation for photoelectrochemical application. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 31, n. 4, p. 2833–2844, 4 fev. 2020.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA Aplicações e preparação de amostras**. EDIPUCRS ed. Porto Alegre.

DEEBASREE, J. P.; MAHESKUMAR, V.; VIDHYA, B. Investigation of the visible light photocatalytic activity of BiVO<sub>4</sub> prepared by sol gel method assisted by ultrasonication. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 45, p. 123–132, jul. 2018.

DELGADO, G. E.; QUINTERO, M. Synthesis and structural characterization using the Rietveld method of the quaternary compound CuAlGeSe<sub>4</sub>. **Revista Mexicana de Física**, v. 68, n. 2 Mar-Apr, 9 fev. 2022.

DOEFF, M. M. et al. Impact of carbon structure and morphology on the electrochemical performance of LiFePO<sub>4</sub>/C composites. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 12, n. 7–8, p. 995–1001, 19 ago. 2008.

DONNET, J.-B. **Carbon Black**. 2nd ed ed. Hürth: Copyright, 1993.

EATEMADI, A. et al. Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. **Nanoscale Research Letters**, v. 9, n. 1, p. 393, 13 dez. 2014.

EGERTON, R. F. **PHYSICAL PRINCIPLES OF ELECTRON MICROSCOPY: AN INTRODUCTION TO TEM, SEM, AND AEM**. 1ª edição ed.

FANG, W. et al. A highly enhanced photoelectrochemical performance of BiVO<sub>4</sub> photoanodes modified with CoPi groups by increasing energy band bending, accelerating hole separation and improving water oxidation kinetics. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 6, n. 4, p. 1075–1083, 2022.

FAWZI, T. et al. Photocatalytic Carbon Dioxide Conversion by Structurally and Materially Modified Titanium Dioxide Nanostructures. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 15, p. 8143, 24 jul. 2022.

FUJISHIMA, A.; HONDA, K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. **Nature**, v. 238, n. 5358, p. 37–38, jul. 1972.

GOLDSTEIN, J. I. et al. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. New York, NY: Springer New York, 2018.

GORLA, F. A. et al. Development of novel nanocomposite-modified photoelectrochemical sensor based on the association of bismuth vanadate and MWCNT-grafted-molecularly imprinted poly(acrylic acid) for dopamine determination at nanomolar level. **Talanta**, v. 266, p. 125044, jan. 2024.

GREEN, M. et al. The Electrical Conductivity of Graphite Nanoplatelet Filled Conjugated Polyacrylonitrile. **Macromolecular Rapid Communications**, v. 29, n. 14, p. 1254–1258, 16 jul. 2008.

HERRERA, J. B. V. **Estudo da formação de partículas de vanadato de bismuto via síntese hidrotérmica: avaliação da eficiência na conversão fotocatalítica de CO<sub>2</sub>**; São Carlos: Universidade de São Paulo, 9 out. 2023.

HU, C. et al. Efficient Combination of Carbon Quantum Dots and BiVO<sub>4</sub> for Significantly Enhanced Photocatalytic Activities. **Catalysts**, v. 13, n. 3, p. 463, 22 fev. 2023.

**INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA (ICDD)**. Newtown Square, 2001.

JARIA, G. et al. Effect of the surface functionalization of a waste-derived activated carbon on pharmaceuticals' adsorption from water. **Journal of Molecular Liquids**, v. 299, p. 112098, fev. 2020.

JENKINS, R.; SNYDER, R. L. **Introduction to X-ray Powder Diffractometry**. Wiley, 1996.

JIANG, H. et al. Hydrothermal fabrication and visible-light-driven photocatalytic properties of bismuth vanadate with multiple morphologies and/or porous structures for Methyl Orange degradation. **Journal of Environmental Sciences**, v. 24, n. 3, p. 449–457, mar. 2012.

JO, W. J. et al. Phase transition-induced band edge engineering of BiVO<sub>4</sub> to split pure water under visible light. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 45, p. 13774–13778, 10 nov. 2015.

JOSEPHINE, A. J. et al. Effect of pH on visible-light-driven photocatalytic degradation of facile synthesized bismuth vanadate nanoparticles. **Materials Research Express**, v. 7, n. 1, p. 015036, 1 jan. 2020.

KADYRZHANOV, D. B. et al. The Influence of Variations in Synthesis Conditions on the Phase Composition, Strength and Shielding Characteristics of CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Films. **Crystals**, v. 14, n. 5, p. 453, 10 maio 2024.

KUDO, A.; MISEKI, Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. **Chem. Soc. Rev.**, v. 38, n. 1, p. 253–278, 2009.

KUDO, A.; OMORI, K.; KATO, H. A Novel Aqueous Process for Preparation of Crystal Form-Controlled and Highly Crystalline BiVO<sub>4</sub> 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, 1 dez. 1999.

KUMAR, S. et al. Two-dimensional carbon-based nanocomposites for photocatalytic energy generation and environmental remediation applications. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, v. 8, p. 1571–1600, 3 ago. 2017.

LAI, C. et al. Fabrication of CuS/BiVO<sub>4</sub> (0 4 0) binary heterojunction photocatalysts with enhanced photocatalytic activity for Ciprofloxacin degradation and mechanism insight. **Chemical Engineering Journal**, v. 358, p. 891–902, fev. 2019.

LI, H.; LIU, G.; DUAN, X. Monoclinic BiVO<sub>4</sub> with regular morphologies: Hydrothermal synthesis, characterization and photocatalytic properties. **Materials Chemistry and Physics**, v. 115, n. 1, p. 9–13, maio 2009.

LIU, B. et al. Preparation and Characterization of Mo Doped in BiVO<sub>4</sub> with Enhanced Photocatalytic Properties. **Materials**, v. 10, n. 8, p. 976, 21 ago. 2017.

LIU, W. et al. Solvothermal synthesis of nanostructured BiVO<sub>4</sub> with highly exposed (0 1 0) facets and enhanced sunlight-driven photocatalytic properties. **Applied Surface Science**, v. 357, p. 1053–1063, dez. 2015.

MA, P.-C. et al. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 41, n. 10, p. 1345–1367, out. 2010.

MALLETTE, J. G. et al. Carbon black-filled PET/HDPE blends: Effect of the CB structure on rheological and electric properties. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 81, n. 3, p. 562–569, 18 jul. 2001.

MANSHA, M. S. et al. Facile hydrothermal synthesis of BiVO<sub>4</sub> nanomaterials for degradation of industrial waste. **Heliyon**, v. 9, n. 5, p. e15978, maio 2023.

MCDONALD, K. J.; CHOI, K.-S. A new electrochemical synthesis route for a BiOI electrode and its conversion to a highly efficient porous BiVO<sub>4</sub> photoanode for solar water oxidation. **Energy & Environmental Science**, v. 5, n. 9, p. 8553, 2012.

MENG, S. et al. Enhanced Photocatalytic Activity of BiVO<sub>4</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/SnS<sub>2</sub> Heterojunction under Visible Light. **Catalysts**, v. 10, n. 11, p. 1294, 9 nov. 2020.

MINES, P. D. et al. Covalent organic polymer functionalization of activated carbon surfaces through acyl chloride for environmental clean-up. **Chemical Engineering Journal**, v. 309, p. 766–771, fev. 2017.

MOTA, M. V. DE C. **ADSORÇÃO DE CORANTE INDUSTRIAL REATIVO PRETO 5 UTILIZANDO CARVÃO VULCAN XC-72**. Dissertação de Mestrado—Alegre: UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, 2020.

NALLAMUTHU, N. et al. Synthesis and Characterization of Sol-Gel Derived BiVO<sub>4</sub> Nanoparticles for Electrochemical Applications. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, v. 9, n. 1s4, p. 390–393, 30 dez. 2019.

NIU, M. et al. The effects of precursors and loading of carbon on the photocatalytic activity of C–BiVO<sub>4</sub> for the degradation of high concentrations of phenol under visible light irradiation. **Catalysis Today**, v. 258, p. 585–594, dez. 2015.

PACKIARAJ, R. et al. Structural and electrochemical studies of Scheelite type BiVO<sub>4</sub> nanoparticles: synthesis by simple hydrothermal method. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 29, n. 15, p. 13265–13276, 15 ago. 2018.

PACKIARAJ, R. et al. Structural, morphological and electrochemical studies of nanostructured BiVO<sub>4</sub> for supercapacitor application. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 115, p. 105122, ago. 2020.

PARK, Y.; MCDONALD, K. J.; CHOI, K.-S. Progress in bismuth vanadate photoanodes for use in solar water oxidation. **Chem. Soc. Rev.**, v. 42, n. 6, p. 2321–2337, 2013.

PAVIA, D. L. et al. **Introdução a Espectroscopia**. 5. ed. São Paulo.

PERRY, S. C. et al. Electrochemical synthesis of hydrogen peroxide from water and oxygen. **Nature Reviews Chemistry**, v. 3, n. 7, p. 442–458, 19 jun. 2019.

PHURUANGRAT, A. et al. Characterization and photocatalytic properties of BiVO<sub>4</sub> synthesized by combustion method. **Journal of Molecular Structure**, v. 1274, p. 134420, fev. 2023.

QI, Y. et al. Effect of calcination temperature on the structure and photocatalytic performance of BiVO<sub>4</sub> prepared via an improved solution combustion method. **Micro & Nano Letters**, v. 13, n. 7, p. 1017–1020, jul. 2018.

QIN, L.; FAN, L.-S. (EDS.). **Clean Energy Materials**. Washington, DC: American Chemical Society, 2020. v. 1364

RAVEN, P. H. **Biology of plants**. New York.

RODRIGUES, B. S. et al. Microwave-assisted reflux synthesis of Tungsten-doped BiVO<sub>4</sub> for improved photocatalytic activity. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 107, n. 2, p. 995–1008, 10 fev. 2024.

SCHERRER, P. Bestimmung der inneren Struktur und der Größe von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. Em: **Kolloidchemie Ein Lehrbuch**. Latest edition ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1912. p. 387–409.

SHANNON, R. D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. **Acta Crystallographica Section A**, v. 32, n. 5, p. 751–767, 1 set. 1976.

SONG, H. et al. Insights into the Mechanism of the Bi/BiVO<sub>4</sub> Composites for Improved Photocatalytic Activity. **Catalysts**, v. 11, n. 4, p. 489, 12 abr. 2021.

SUN, S. et al. Efficient Methylene Blue Removal over Hydrothermally Synthesized Starlike BiVO<sub>4</sub>. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 4, p. 1735–

1739, 18 fev. 2009.

THOMPSON, P.; COX, D. E.; HASTINGS, J. B. Rietveld refinement of Debye–Scherrer synchrotron X-ray data from  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . **Journal of Applied Crystallography**, v. 20, n. 2, p. 79–83, 1 abr. 1987.

TIMMAJI, H. K. et al. Solution Combustion Synthesis of  $\text{BiVO}_4$  Nanoparticles: Effect of Combustion Precursors on the Photocatalytic Activity. **Journal of Advanced Oxidation Technologies**, v. 14, n. 1, 1 jan. 2011.

TOKUNAGA, S.; KATO, H.; KUDO, A. Selective Preparation of Monoclinic and Tetragonal  $\text{BiVO}_4$  with Scheelite Structure and Their Photocatalytic Properties. **Chemistry of Materials**, v. 13, n. 12, p. 4624–4628, 1 dez. 2001.

TSAY, C.-Y. et al. Enhanced Photocatalytic Performance of Visible-Light-Driven  $\text{BiVO}_4$  Nanoparticles through W and Mo Substituting. **Catalysts**, v. 13, n. 3, p. 475, 26 fev. 2023.

USAI, S. et al. Monoclinic–Tetragonal Heterostructured  $\text{BiVO}_4$  by Yttrium Doping with Improved Photocatalytic Activity. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 117, n. 46, p. 24479–24484, 21 nov. 2013.

**VULCAN® XCmax™ carbon blacks**. Cabot Corporation, 2016.

WAN, X. et al. Enhanced Photoelectrochemical Water Oxidation on  $\text{BiVO}_4$  Photoanodes Functionalized by Bimetallic Dicyanamide Molecular Catalysts. **Sustainability**, v. 15, n. 4, p. 3129, 8 fev. 2023.

WANG, M. et al. Characterization and photocatalytic properties of N-doped  $\text{BiVO}_4$  synthesized via a sol–gel method. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 548, p. 70–76, jan. 2013.

WANG, M. et al.  $\text{Sb}_4\text{O}_5\text{Cl}_2$  embedded in carbon polyhedra for fast charge kinetics towards high-capacity Li-ion capacitors. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 13, n. 4, p. 2624–2630, 2025.

WANG, N. et al. Effect of Functional Group Modifications on the Photocatalytic Performance of g- $\text{C}_3\text{N}_4$ . **Small**, v. 19, n. 27, 25 jul. 2023.

WANGKAWONG, K. et al. Sustainable carbonaceous material from durian peel to modify the photocatalytic activity of Ag/activated carbon/ $\text{BiVO}_4$  for RhB degradation under visible light irradiation. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 169, p. 113023, nov. 2024.

WEI, P. et al. 2D/3D  $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$  heterostructures for efficient photoelectrocatalytic water splitting. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 54, p. 27506–27515, ago. 2021.

WELLER, M. et al. **Química Inorgânica**. 7ª Edição ed.

XIE, X.; MAI, Y.; ZHOU, X. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 49, n. 4, p. 89–112, 19 maio 2005.

XU, Y. et al. Carbon-based nanostructures for emerging photocatalysis: CO<sub>2</sub> reduction, N<sub>2</sub> fixation, and organic conversion. **Trends in Chemistry**, v. 4, n. 11, p. 984–1004, nov. 2022.

YALÇIN, E.; DÜKKANCI, M. Ternary CuS@Ag/BiVO<sub>4</sub> composite for enhanced photocatalytic and sono-photocatalytic performance under visible light. **Journal of Solid State Chemistry**, v. 313, p. 123319, set. 2022.

YI, Q.; WANG, H.; LEE, J. BiVO<sub>4</sub> -Based Photoelectrochemical Water Splitting. **ChemElectroChem**, 23 dez. 2024.

YUAN, Y. et al. Structural stability, band structure and optical properties of different BiVO<sub>4</sub> phases under pressure. **Journal of Materials Science**, v. 51, n. 14, p. 6662–6673, 18 jul. 2016.

ZHANG, C. et al. Preparation and photocatalytic activity characterization of activated carbon fiber–BiVO<sub>4</sub> composites. **RSC Advances**, v. 8, n. 43, p. 24665–24672, 2018.

ZHANG, K. et al. Photocatalytic Removal of Organics over BiVO<sub>4</sub>-Based Photocatalysts. Em: **Semiconductor Photocatalysis - Materials, Mechanisms and Applications**. [s.l.] InTech, 2016.

ZHANG, L.; CHEN, D.; JIAO, X. Monoclinic Structured BiVO<sub>4</sub> Nanosheets: Hydrothermal Preparation, Formation Mechanism, and Coloristic and Photocatalytic Properties. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 110, n. 6, p. 2668–2673, 1 fev. 2006.

ZHANG, Y. et al. Surface site design in photocatalytic carbon conversion applications. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 529, p. 216459, abr. 2025.

ZHAO, D. et al. Synthesis of carbon-doped BiVO<sub>4</sub>@multi-walled carbon nanotubes with high visible-light absorption behavior, and evaluation of their photocatalytic properties. **CrystEngComm**, v. 18, n. 47, p. 9007–9015, 2016.

ZHONG, X. et al. Recent progress in BiVO<sub>4</sub>-based heterojunction nanomaterials for photocatalytic applications. **Materials Science and Engineering: B**, v. 289, p. 116278, mar. 2023.

ZHU, Y.-P. et al. Carbon-Doped ZnO Hybridized Homogeneously with Graphitic Carbon Nitride Nanocomposites for Photocatalysis. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 118, n. 20, p. 10963–10971, 22 maio 2014.