



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DOUTORADO ASSOCIATIVO EM QUÍMICA
UFMA-IFMA

RICARDO HENRIQUE NASCIMENTO FRAZÃO

**COMPÓSITO $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ /GRAFENO APLICADO À DEGRADAÇÃO
FOTOCATALÍTICA DE HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS**

SÃO LUÍS
2025

RICARDO HENRIQUE NASCIMENTO FRAZÃO

**COMPÓSITO $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ /GRAFENO APLICADO À DEGRADAÇÃO
FOTOCATALÍTICA DE HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Doutorado em Química da Universidade Federal Maranhão como requisito para a obtenção do título de Doutor em Química.

Orientador: Prof. Dr. Adeilton Pereira Maciel.
Área de concentração: Físico-química.

SÃO LUÍS

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Frazão, Ricardo Henrique Nascimento.

COMPÓSITO $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ /GRAFENO APLICADO À DEGRADAÇÃO
FOTOCATALÍTICA DE HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS / Ricardo
Henrique Nascimento Frazão. - 2025.

94 p.

Orientador(a): Adeilton Pereira Maciel.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação Doutorado
em Química/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São
Luís, 2025.

1. Fotocatálise. 2. Babaçu. 3. Attalea Speciosa. 4.
Molibdato. 5. Fibra Ótica. I. Maciel, Adeilton Pereira.
II. Título.

RICARDO HENRIQUE NASCIMENTO FRAZÃO

**COMPÓSITO $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ /GRAFENO APLICADO À DEGRADAÇÃO
FOTOCATALÍTICA DE HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Doutorado em Química da Universidade Federal do Maranhão como requisito para a obtenção do título de Doutor em Química.

Orientador: Prof. Dr. Adeilton Pereira Maciel.
Área de concentração: Físico-química.

Defesa de Tese de Doutorado defendida e aprovada em: ____/____/____
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adeilton Pereira Maciel (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Prof.^a Dr. Marcelo Moizinho Oliveira
Instituto Federal do Maranhão - IFMA
(1º examinador)

Prof.^a Dr. José Hilton Gomes Rangel
Instituto Federal do Maranhão - IFMA
(2º examinador)

Prof.^a Dr.^a Antoninho Valentini
Universidade Federal do Ceará – UFC
(3º examinador)

Prof.^a Dr.^a Fernanda Marur Mazze
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
(4º examinador)

Dedico a Deus.

Dedico a minha família (esposa e filha).

Aos meus pais, dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sou grato pela vitória.

Aos meus pais, José Henrique Frazão e Maria dos Remédios, que são meus referenciais, bem como pelo incentivo na carreira profissional.

A minha esposa Fabiana Frazão Frazão, pelo companheirismo, incentivos de melhorias e apoio no decorrer do curso e elaboração da tese.

Ao Prof. Dr. Adeilton Pereira Maciel pela orientação, credibilidade e oportunidade cedida.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo durante o período do doutorado.

Aos professores: Dr. Valmor Roberto Mastelaro do Instituto de Física de São Carlos (IFSC-USP), Dr. Mauricio Roberto Bomio Delmonte da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Dr. Alan Silva de Menezes e Dr. Clenilton Costa dos Santos do departamento de Física da UFMA pela ajuda com as técnicas de caracterizações que foram de grande importância na conclusão dos estudos durante o doutorado.

Aos professores que tornaram possível o Programa de Pós-Graduação Doutorado Associativo em Química UFMA-IFMA.

À professora Dra. Caritas de Jesus Silva Mendonca, de laboratório Núcleo de Combustíveis Catálise e Ambiental (NCCA) da UFMA pelo apoio técnico.

A todos que de alguma forma contribuíram para que eu estivesse aqui, finalizando esta etapa e, então, poder proferir meus agradecimentos.

“Sim, colocarei em Deus a minha
confiança e ficarei tranquilo. A minha vida
provará que as promessas de Deus são
verdadeiras! Eu confio em Deus; que poderá
fazer um simples mortal? “

(Salmos 65:4, NBV)

FRAZÃO, RICARDO HENRIQUE NASCIMENTO. Compósito $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$ aplicado à degradação fotocatalítica de hidrocarbonetos aromáticos. 2025. 94f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

RESUMO

Os processos oxidativos avançados se destacam com contribuição direta com o método utilizado na degradação de poluentes que, por exemplo, oriundos da gasolina, como os compostos orgânicos voláteis, dentre eles o BTEX, que são altamente prejudiciais à para a saúde humana. Dessa forma, é importante o desenvolvimento de novos materiais com objetivo de degradar poluentes de origem orgânica, que porventura possam alcançar o meio aquático, onde vivem a fauna marinha ou até lençóis freáticos de onde se faz o uso de água de consumo humano. Nesse contexto, fotocatalisadores, que são materiais semicondutores utilizados em processos oxidativos avançados, podem ser utilizados para realizar a mineralização desses poluentes e, quando associados ou suportados em outros materiais, permitem uma remoção mais efetiva do fotocatalisador após o processo de degradação. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi sintetizar o compósito molibdato de prata com fosfato de prata em Grafeno ($\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$) para degradação fotocatalítica de BTEX. A síntese do fotocatalisador foi feita pelo método de precipitação simples, adaptados de metodologias disponíveis na literatura. A obtenção do Grafeno, se deu a partir epicarpo do coco babaçu (*Attalea speciosa*), coletado na Universidade Federal do Maranhão. Os materiais obtidos foram caracterizados por meio das seguintes técnicas: microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), análise de Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopia Raman e Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios X (XPS) e Espectroscopia de Refletância Difusa (ERD). Os ensaios de fotocatalise, sob luz visível, no reator desenvolvido, mostraram que após 60 min de irradiação, a quantidade de BTEX presente nas amostras estavam de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo Ministério da Saúde em água de consumo humano. Indicando que o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$, possui potencial para aplicações como fotocatalisador.

Palavras-chave: Fotocatálise; Babaçu; *Attalea speciosa*; Molibdato; Fibra ótica.

ABSTRACT

Advanced oxidative processes stand out due to their direct contribution to the degradation of pollutants, such as those derived from gasoline, including volatile organic compounds (VOCs) like BTEX, which are highly harmful to human health. Therefore, the development of new materials aimed at degrading organic pollutants—those that may eventually reach aquatic environments inhabited by marine fauna or even groundwater sources used for human consumption—is of great importance. In this context, photocatalysts, which are semiconductor materials used in advanced oxidative processes, can be employed to mineralize these pollutants. When supported on or combined with other materials, they allow for more effective removal of the photocatalyst after the degradation process. Thus, the overall objective of this work was to synthesize a silver molybdate and silver phosphate composite on graphene ($\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Graphene}$) for the photocatalytic degradation of BTEX. The photocatalyst was synthesized via a simple precipitation method, adapted from methodologies available in the literature. The graphene was obtained from the epicarp of the babassu coconut (*Attalea speciosa*), collected at the Federal University of Maranhão. The materials obtained were characterized using the following techniques: Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Raman Spectroscopy, X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), and Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS). Photocatalysis tests, under visible light in a custom-built reactor, showed that after 60 minutes of irradiation, the amount of BTEX present in the samples complied with the parameters established by the Ministry of Health for drinking water. These results indicate that the $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Graphene}$ composite has potential for use as a photocatalyst.

Keywords: Photocatalysis; Babassu; *Attalea speciosa*; Molybdate; Optical fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo de fotocatalise heterogênea.	20
Figura 2 – Representação da célula unitária da fase alfa do molibdato de prata (α - Ag_2MoO_4).	23
Figura 3 - Cristalografia da fase cúbica do molibdato de (β - Ag_2MoO_4).	23
Figura 4 – Representação das moléculas do grupo BTEX.....	25
Figura 5 - Estrutura do Grafeno.....	26
Figura 6 - Fluxograma do curso experimental do trabalho.	31
Figura 7 - Processo de síntese do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$	33
Figura 8 - Microscópio HITACHI, modelo TM3030.....	35
Figura 9 - Difratorômetro de Raios-X D8 Advance, Bruker.....	36
Figura 10 - Espectrofotômetro Modelo IR Prestige 21 da Shimadzu.....	37
Figura 11 - Espectrômetro Jobin Yvon T 64000.	38
Figura 12 - Representação esquemática do processo XPS.	39
Figura 13 - Esquema geral de um espectrofotômetro de fotoelétrons de raios X.....	39
Figura 14 - Espectrômetro de raios-X modelo – Scienta-Omicron ESCA+.	40
Figura 15 – Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura dos materiais sintetizados, aumentados 500 vezes (I) e 5000 vezes (II): a) $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$; b) Grafeno; c) $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$	47
Figura 16 - Avaliação semiquantitativa da composição química do fotocatalisadores e do Grafeno obtidas por EDS: a) $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$; b) Grafeno; c) $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$	49
Figura 17 - Difratoograma de raios X do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$	51
Figura 18 - Espectro FTIR dos fotocatalisador $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$	52
Figura 19 - Espectros Raman para o Grafeno sintetizado a diferentes temperaturas.	54
Figura 20 - Espectro exploratório de uma amostra do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$	55
Figura 21 - Espectro exploratório dos átomos P, Mo, Ag e O do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$. ajustado.....	57
Figura 22 - Espectro exploratório dos átomos C, O e para uma amostra de Grafeno ajustados por deconvolução.....	58
Figura 23 – Curvas de deconvolução para os átomos de P, Mo, Ag, C e O do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$	59

Figura 24 - Espectro de absorbância (a) e plote de Tauc (b) para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$	60
Figura 25 - Cinética de adsorção de BTEX sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ ($[\text{BTEX}] = 50$ mg/L; pH = 6.0; $T = 25.0 \pm 2$ °C).	61
Figura 26 - Isoterma de adsorção para o BTEX sob pH 6 e temperatura ambiente. .	62
Figura 27 - Fotodegradação de BTEX com o uso de luz visível e ultravioleta.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição elementar do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$, Grafeno e do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$ obtidas por EDS.	48
Tabela 2 - Distribuição das ligações no espectro FTIR.	53
Tabela 3 - Parâmetros dos modelos cinéticos.....	62
Tabela 4 - Parâmetros de equilíbrio resultante dos ajustes aos diferentes modelos de equilíbrio.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$	Molibdato de prata com fosfato de prata
APHA	American public health association
BTEX	Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno
POA's	Processos Oxidativos Avançados
MP	Molibdato de prata
$\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$	Molibdato de prata com fosfato de prata em Grafeno
DRX	Difração de raios X
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EDX	Energia Dispersiva de Raios X
ERD	Espectroscopia de refletância difusa
eV	Elétron volts
FTIR	Infravermelho com Transformada de Fourier
$h\nu$	Energia de fótons
K_{DR}	Constante da isoterma de Dubinin e Radushkevich
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
RAMAN	Espectroscopia Raman
TGA	Análise termogravimétrica
XPS	Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X
ε	Potencial de adsorção de Polanyi

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	OBJETIVOS.....	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1	FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA.....	19
3.2	MOLIBDATO DE PRATA COM FOSFATO DE PRATA.....	21
3.3	BTEX (BENZENO, TOLUENO, ETILBENZENO, XILENO).....	24
3.4	GRAFENO.....	26
3.5	BABAÇU (<i>ATTALEA SPECIOSA</i>).....	28
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
5.	MATERIAIS.....	32
5.1	REAGENTES.....	32
6.	MÉTODOS.....	32
6.1	SÍNTESE DO FOTOCATALISADOR.....	32
6.2	SÍNTESE DO GRAFENO.....	33
6.3	DESENVOLVIMENTO DO REATOR FOTOCATALÍTICO.....	34
7.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS SINTETIZADOS.....	34
7.1	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROMETRIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS).....	34
7.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	35
7.3	ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	37
7.4	ESPECTROSCOPIA RAMAN.....	37
7.5	ESPECTROSCOPIA DE FOTOELÉTRONS EXCITADOS POR RAIOS X (XPS).....	38
7.6	ESPECTROSCOPIA DE REFLETÂNCIA DIFUSA (ERD).....	40
8.	CINÉTICA E EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO DO XILENO E ETILBENZENO NOS FOTOCATALISADORES.....	41
8.1	CINÉTICA DE ADSORÇÃO.....	41
8.2	EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO.....	42
9.	CINÉTICA DE FOTODEGRADAÇÃO DE BTEX.....	44

10.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
10.1	CARACTERIZAÇÃO DO $AG_2MOO_4/AG_3PO_4(S)$ E $AG_2MOO_4/AG_3PO_4/GRAFENO$	46
10.1.1	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS)</i>	46
10.1.2	<i>Difração de Raios X</i>	50
10.1.3	<i>Espectroscopia na região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)</i> 51	
10.1.4	<i>Espectroscopia Raman</i>	53
10.1.5	<i>Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios X (XPS)</i>	55
15.1.6	<i>Espectroscopia de Refletância Difusa do $Ag_2MoO_4/Ag_3PO_4(S)$</i>	59
16.	CINÉTICA E EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO DE BTEX SOBRE $AG_2MO_4/AG_3PO_4(S)$	60
17.	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA SOBRE BTEX	64
18.	CONCLUSÕES	67
19.	REFERÊNCIAS	69
	APENDICE 1 – CINÉTICA DE ADSORÇÃO DE XILENO E ETILBENZENO	80
	APENDICE 2 – FOTÓLISE UV/VIS SOBRE XILENO E ETILBENZENO	82
	APENDICE 3 – FOTODEGRADAÇÃO UV/VIS SOBRE BTEX COM $AG_2MOO_4/AG_3PO_4(S)$	86
	APENDICE 4 – ISOTERMA DE ADSORÇÃO DE BTEX	88
	APENDICE 5 – FOTOCATÁLISE UV/VIS SOBRE BTEX $AG_2MOO_4/AG_3PO_4/GRAFENO$	90
	APENDICE 6 – REATOR FOTOCATALÍTICO	94

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, tratamentos convencionais de águas não tem se mostrado eficientes devido à alta complexidade de substâncias orgânicas que estão cada vez mais presentes na água. Neste sentido, novos métodos têm sido desenvolvidos e entre eles a fotocatálise, que é um processo alternativo para a degradação efetiva de poluentes orgânicos e tem sido considerada uma tecnologia verde, conveniente e promissora no tratamento de água. Como uma parte importante da tecnologia fotocatalítica, a escolha adequada de fotocatalisadores é de grande importância para a degradação eficaz de poluentes (Feng *et al.*, 2020).

Estudos tem mostrado que alguns fotocatalisadores com modificações, como TiO_2 , ZnO , Ag_2MoO_4 e Ag_3PO_4 , podem efetivamente promover a degradação de poluentes orgânicos presentes na água e considerados altamente tóxicos. Por este motivo, o interesse na busca de novas tecnologias para degradação destes poluentes em meio aquoso, tem crescido ao longo dos anos (Foggi *et al.*, 2020; Frazão *et al.*, 2019; Feng *et al.*, 2020).

Novos materiais têm sido desenvolvidos com o objetivo de obter fotocatalisadores mais ativos, sensíveis à luz solar, fáceis de serem recuperados e com custo competitivo na degradação de poluentes. Dos materiais estudados, aqueles a base de prata (Ag) têm ganhado destaque devido aos resultados promissores. Deste modo, tem-se buscado desenvolver materiais ativos sob luz visível afim de poder usufruir do espectro solar para ativação natural. Entre os materiais estudados, o molibdato de prata com fosfato de prata ($\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$) tem chamado atenção devido à sua facilidade de absorção da luz visível para uso na fotocatálise (Frazão *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2017).

Um importante aspecto das reações fotocatalíticas é a forma adequada e eficiente de iluminação do fotocatalisador. O uso de fibras óticas Sidelight (emissão de luz lateral), resultado do desenvolvimento das tecnologias de transporte de luz, surge como uma alternativa eficiente e econômica de iluminar uniformemente o reator (Frazão *et al.*, 2019).

Outro ponto importante é que a maioria dos estudos utilizando fotocatalisadores, são realizados com os mesmos modificados. Uma das alternativas é modifica-los com materiais de baixo custo, tendo em vista o aproveitamento de resíduos de materiais biológicos e ou lignocelulósicos para modificar a superfície do catalisador (Balasurya

et al., 2023; Ammar *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2023). O grafeno, por exemplo, pode ser sintetizado a partir de materiais de baixo custo, como biomassa rica em carbono (incluindo cascas de coco, resíduos de borra de café ou amido), o que possibilita uma rota sustentável e econômica para sua obtenção. Além disso, o grafeno facilita a migração dos elétrons fotoexcitados, reduzindo a recombinação entre elétrons e lacunas (e^-/h^+), o que aumenta a eficiência fotocatalítica (Saha; Dutta, 2021).

Diante do exposto, no presente trabalho foram sintetizados fotocatalisadores pela modificação do molibdato de prata com fosfato de prata, $Ag_2MoO_4/Ag_3PO_4(s)$ em Grafeno formado a partir de fibra vegetal. A atividade fotocatalítica foi avaliada por meio da degradação de compostos que fazem parte do grupo BTEX, que são compostos orgânicos voláteis (COV's), em reator fotocatalítico, sob a ação de luz ultravioleta e visível com uso de fibra ótica.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Sintetizar o compósito molibdato de prata com fosfato de prata em Grafeno ($\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$) para degradação fotocatalítica de BTEX (Benzeno, Tolueno, Etil benzeno e Xileno).

2.2 Objetivos específicos

- Sintetizar e caracterizar molibdato de prata com fosfato de prata em Grafeno ($\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$);
- Desenvolver um reator fotocatalítico com iluminação canalizada por fibra ótica.
- Investigar a atividade fotocatalítica do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$ na degradação de BTEX.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

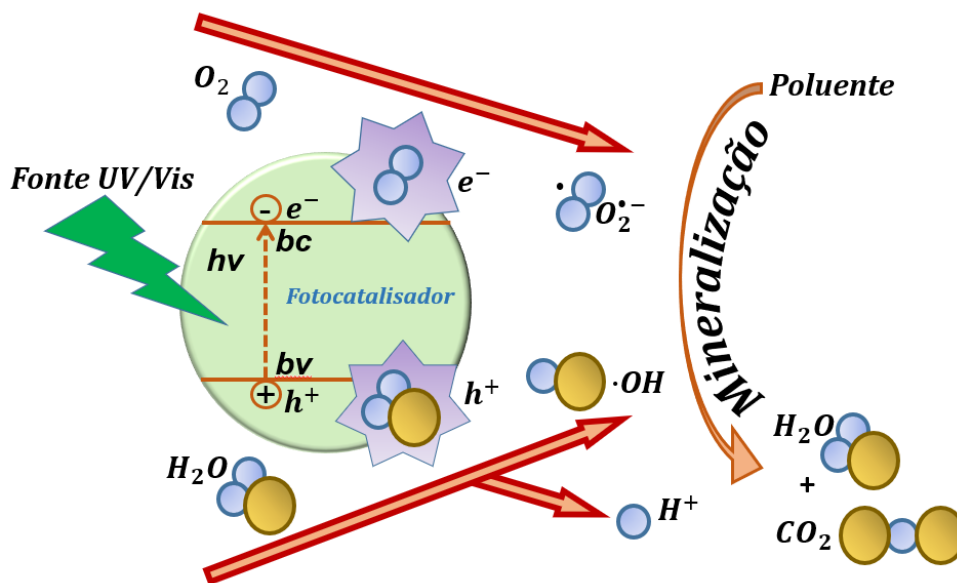
3.1 Fotocatálise heterogênea

Os processos oxidativos avançados (POA's) são baseados na geração de radicais livres, sendo o radical hidroxil ($\bullet\text{OH}$) um dos principais, por apresentar um alto potencial oxidante que pode promover a degradação de diversos poluentes de modo eficiente (Elbakry *et al.*, 2022, Chang *et al.*, 2023, Kane *et al.*, 2022, Chinnasamy *et al.*, 2023).

A fotocatálise heterogênea pertence aos processos oxidativos avançados e foi descrita pela primeira vez por Fujishima e Honda (1972), que realizaram a oxidação da água em uma suspensão de TiO_2 , gerando hidrogênio e oxigênio. Esta propriedade do semicondutor TiO_2 sob luz, foi descrita como o Efeito Fujishima- Honda, no qual foi demonstrado que por meio de um eletrodo de dióxido de titânio em uma solução aquosa sob luz de intensidade forte, bolhas de ar emergiam para a superfície, de modo que quando a luz cessava, as bolhas paravam de serem produzidas. Dessa forma, surgiu a ideia inicial do que hoje se compreende sobre a fotocatálise (Foggi *et al.*, 2020, Chinnasamy *et al.*, 2023, Kane *et al.*, 2022, Kokilavani *et al.*, 2021, Moinuddin *et al.*, 2022, Kane *et al.*, 2022).

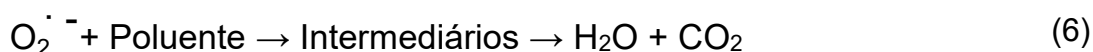
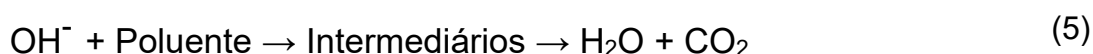
As reações fotocatalíticas são reações redox que ocorrem em série ou em paralelo, após a absorção de fótons gerados por uma fonte de radiação ($h\nu$). Para isso é necessário que a energia do fóton incidente seja superior à do band gap. Esse fóton promove o elétron da banda de valência para a banda de condução da espécie química utilizada como fotocatalisador gerando um par elétron-lacuna (elétron: e_{BC}^- e lacuna: h_{BV}^+), respectivamente (Abdul-Wahidet *et al.*, 2023, Elbakry *et al.*, 2022, Pysarenko *et al.*, 2022, Bourzami *et al.*, 2022, Al-Rasheedi *et al.*, 2023). Esse par elétron-lacuna interage com a água gerando espécies de oxigênio, que por sua vez reagem com os contaminantes presentes no meio, podendo mineralizar essas substâncias, inativando-as, Figura 1.

Figura 1 - Esquema do processo de fotocatalise heterogênea.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As Equações (1) a (6) propõe o mecanismo de geração de espécies de oxigênio no fotocatalisador e a interação dessas com o poluente:



A Fotocatálise se enquadra como um processo limpo que vem sendo estudado e aprimorado com o passar dos anos tendo em vista a melhora da sua eficiência. Um dos pontos mais importantes do processo é a fonte de radiação que depende das características do semicondutor, com destaque para materiais que podem atuar melhor na região do ultravioleta ou do campo do visível. Nesse aspecto o sol é a primeira fonte natural a ser pensada, porém a reação fotocatalítica é realizada com a dependência da radiação ultravioleta, apenas uma pequena quantidade dela é

que alcança a atmosfera terrestre, e nesse caso normalmente se utiliza fontes artificiais (Yang *et al.*, 2021, Elbakry *et al.*, 2022, Kane *et al.*, 2022).

Outro aspecto importante é a adsorção do poluente na superfície do semicondutor, que contribui diretamente para o processo de oxidação e redução, que sofre influência direta da temperatura reacional, ou seja, o aumento da mesma diminui a quantidade de poluentes adsorvidos na superfície, tendo em vista os processos dessa natureza terem caráter exotérmico (Ammar *et al.*, 2023, Fan *et al.*, 2023, Moinuddin *et al.*, 2022).

Um outro aspecto importante é a morfologia dos semicondutores, em que os tamanhos das partículas interferem diretamente no processo, sabendo que a alta porosidade e a alta área superficial ativa disponível são parâmetros necessários para uma boa taxa de mineralização dos poluentes (Syed, Elgorban, Bahkali, 2021, Balasurya *et al.*, 2023, Teodoro *et al.*, 2022 Chang *et al.*, 2023).

Em geral, o modo como o reator está disposto, bem como sua configuração, influenciará diretamente o meio reacional, tendo em vista ser um ponto importante, assim como ter a parte ativa do semicondutor irradiada uniformemente. Porém, ainda mais relevante é ter um semicondutor que ao ser irradiado, seja ativo e eficiente na degradação de poluentes no meio reacional. Dessa maneira, materiais compósitos têm sido sintetizados como alternativa na busca por uma fotoatividade maior que a dos catalisadores já conhecidos e aplicados em meio líquido para degradação em suspensão. (Fan *et al.*, 2023, Moinuddin *et al.*, 2022, Xu, Zhong, Li, 2023, Kokilavani *et al.*, 2021, Tang *et al.*, 2022, Lian *et al.*, 2022, Singh *et al.*, 2023).

3.2 Molibdato de prata com fosfato de prata

O molibdênio é um metal de transição de cor branca e aspecto prateado e quando combinado com outro elemento químico, pode apresentar diferentes propriedades funcionais. Assim, nos últimos anos, óxidos desse metal têm chamado a atenção devido essas propriedades (Kokilavani *et al.*, 2021, Fan *et al.*, 2023, Xu, Zhong, Li, 2023, Singh *et al.*, 2023).

Dentre as muitas possibilidades de óxidos que podem ser obtidos a partir do molibdênio, os molibdatos são alguns deles. Esses compostos apresentam uma geometria do tipo tetraédrica, composta por 4 átomos de oxigênios nos vértices do tetraedro, coordenando o átomo de molibdênio no centro, ou uma geometria do tipo

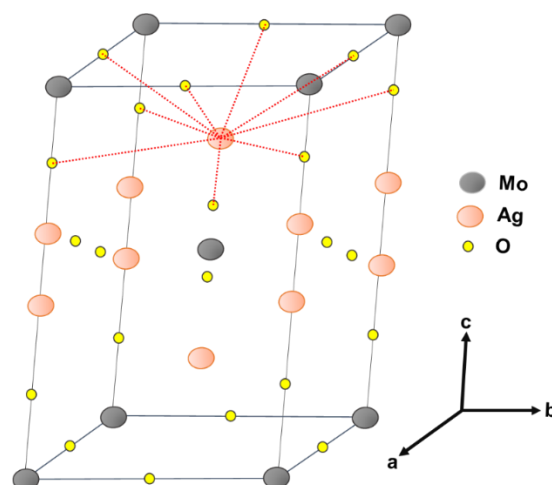
octaédrica composta por 6 átomos de oxigênio nos vértices do octaedro coordenando com o molibdênio no centro da estrutura. Devido a possibilidade de formar uma ampla quantidade de diferentes fases e estruturas cristalinas, com propriedades físico-químicas diversas, esse material tem chamado a atenção da comunidade científica, para aplicações tecnológicas (Ng; Fan, 2015, Abdul-Wahidet *et al.*, 2023).

Óxidos formados a partir do molibdênio tiveram seus primeiros registros na literatura por volta 1922, em que, Wyckoff propôs o primeiro arranjo cristalino para o Ag_2MoO_4 , que foi mostrado posteriormente, na década de 70, com mais clareza, quando se descobriu que o molibdato de prata pode assumir diversas formas, entre as quais $\text{Ag}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ e $\text{Ag}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}$, que apresentam propriedades variadas, que os tornam apropriados a aplicações tribológicas, ópticas, elétricas, catalíticas, bem como bactericidas (Moura *et al.*, 2017, Frazão *et al.*, 2019, Foggi *et al.*, 2020, Tang *et al.*, 2022).

Por volta dos anos 90, foi proposto o diagrama termal do sistema $\text{MoO}_3\text{-Ag}_2\text{O}$, com os molibdatos de prata, até o presente momento sendo obtidos especialmente por reações do estado sólido, onde a partir da identificação e determinação com mais clareza desse material, foi identificado com o passar dos anos, que algumas fases em específico, tem contribuição em suas propriedades ópticas: a fase alfa ($\alpha\text{-Ag}_2\text{MoO}_4$) que é uma estrutura tetragonal e a fase beta ($\beta\text{-Ag}_2\text{MoO}_4$), do tipo cúbica (Lian *et al.*, 2022, Tang *et al.*, 2022, Balasurya *et al.*, 2023).

A fase alfa do molibdato de prata (Figura 2) foi observada pela primeira vez quando o material foi obtido em alta pressão. Ele apresentou uma estrutura tetragonal na qual os átomos de molibdênio são coordenados por seis átomos de oxigênio, o que leva a formação de clusters do tipo octaédrico $[\text{MoO}_6]$ e os átomos de prata são coordenados por nove átomos de oxigênio originando clusters $[\text{AgO}_9]$ (Beltrán *et al.*, 2014, Ng; Fan, 2015, Teodoro, 2022).

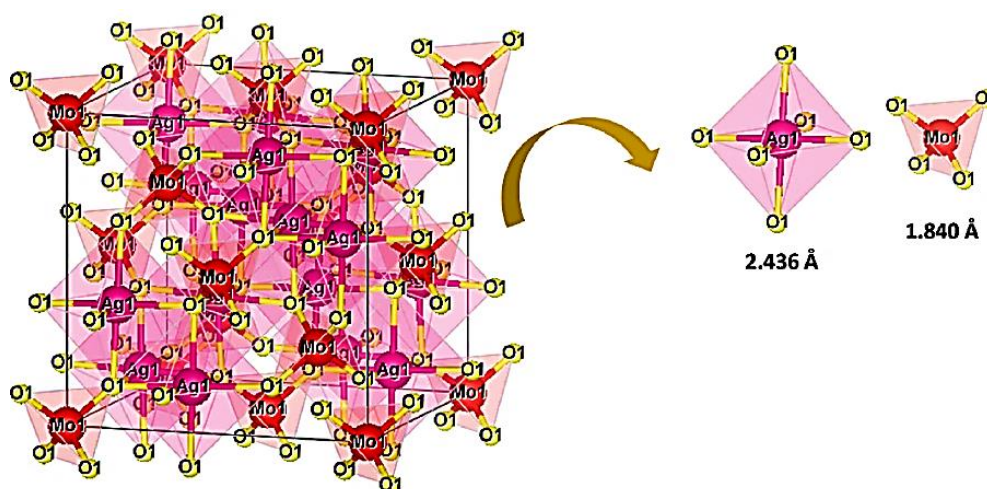
Figura 2 – Representação da célula unitária da fase alfa do molibdato de prata (α - Ag_2MoO_4).



Fonte: Adaptado de Ng; Fan (2015).

Por outro lado, a fase beta (Figura 3) possui estrutura do tipo cúbica spinel com clusters tetraédricos e octaédricos com átomos de molibdênio coordenados aos átomos de oxigênio que levam a formação de clusters do tipo $[\text{MoO}_4]$. Os átomos de prata aparecem na estrutura com coordenação a seis átomos de oxigênio formando clusters do tipo octaédrico $[\text{AgO}_6]$. A estrutura monoclinica ($\text{Ag}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$) e o óxido de prata (Ag_2O) são cadeias infinitas formadas por blocos de quatro octaedros com íons de prata entre elas. Tal forma costuma surgir pela decomposição do molibdato de prata. (Tang *et al.*, 2022, Xu, Zhong, Li, 2023).

Figura 3 - Cristalografia da fase cúbica do molibdato de (β - Ag_2MoO_4).



Fonte: Teodoro *et al.*, 2022.

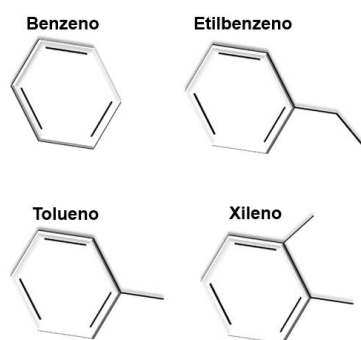
Apesar das boas propriedades que apresenta, a fase alfa do Ag_2MoO_4 é de difícil sintetização. Essa fase apresenta uma boa cristalinidade e potencializa a atividade fotocatalítica do material, mas por ser metaestável, é preciso de mais estudos para uma melhor compreensão quanto a sua obtenção, e possível aplicação em POA's. Dessa forma, o fosfato de prata, que é um sólido cristalino de coloração amarelada, com baixa toxicidade e alta sensibilidade no espectro do visível, tem sido sintetizado juntamente com o molibdato de prata com o objetivo de criar um material híbrido, que ofereça mais estabilidade, bem como potencial fotocatalítico aumentado, pois estudos mostram que o grupo fosfato tem contribuído para resultados notáveis com respeito à degradação de poluentes, devido à alta eficiência de separação das cargas e^-/h^+ fotogeradas, e que ao ser sintetizado juntamente com o molibdênio pode levar o fosfato a redução da fotocorrosão que sofre ao ser aplicado isolado em POA's (Zhuang *et al.*, 2023; Frazão *et al.*, 2019).

O conjunto híbrido do molibdato de prata com fosfato de prata tem sido estudado tendo em vista que a combinação do poder de adsorção e catalítico do molibdato de prata associado ao alto poder catalítico, sob luz visível do fosfato de prata, formam um heteroestrutura com propriedades óticas notáveis. Estudos mostram que band gaps que giram em torno de 2,36 ate e 3,36 eV, podem ser obtidos pelos métodos hidrotérmico, solvotérmico ou também pela precipitação simples e a partir de diferentes precursores para este material (Dhanabal; Velmathi; Bose, 2016, Cao *et al.*, 2017 e Tang *et al.*, 2017, Zhang *et al* 2023, Tan *et al* 2022).

3.3 BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno)

Dentre os compostos poluentes que estão presentes na atmosfera, além dos que são regulamentados por legislação, como o ozônio, particulados, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio e monóxido de carbono, se tem os compostos orgânicos voláteis (COV's), e nesse grupo estão os hidrocarbonetos, em especial o grupo BTEX (Benzeno, Tolueno, etilbenzeno, xileno) (Figura 4) Esses compostos contribuem para a contaminação de solos e dos recursos hídricos devido à falta de tratamento para o seu descarte ou oriundo de vazamento de instalações industriais ou pontos comerciais, tendo em vista o mal armazenamento de substâncias como a gasolina que tem em sua constituição esse compostos orgânicos voláteis (Aydin *et al.*, 2023, Ebrahimi *et al.*, 2023, Emmanuel *et al.*, 2023, Ghosh *et al.*, 2023, Han, Xu, Zhu, 2023).

Figura 4 – Representação das moléculas do grupo BTEX.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Dentre a diversidade de poluentes presentes nas águas residuárias, o grupo BTEX está entre os altamente tóxicos típicos, que aparecem em efluentes aquosos de indústrias químicas e petroquímicas. Esses compostos são frequentemente apontados como nocivos e/ou carcinogênicos, com a possibilidade de ocasionar problemas de saúde diretamente ao homem, bem como ao meio ambiente em ecossistemas, com a promoção de efeitos adversos, ainda que em baixas concentrações (Kamani, et al., 2023, Kaur *et al.*, 2023, Ma *et al.*, 2024, Qiu *et al.*, 2023, Sobczyk *et al.*, 2023).

Dessa forma, o Brasil dispõe de uma legislação com respeito a classificação e diretrizes para o meio ambiente, no que diz respeito ao enquadramento dos copos de águas superficiais, bem como o estabelecimento de condições e padrões para o lançamento de efluentes (Brasil, 2005). Nesse âmbito, existe uma classificação para os copos de águas salinas, salobras e doce, sendo esta última apresentando quatro classes especiais (Classe 1, Classe 2, Classe 3, Classe 4). Esta resolução foi alterada parcialmente em 2011, que determina os padrões para o máximo lançamento em recursos hídricos de Benzeno, Tolueno, etilbenzeno e xileno, que são: 1,2 mg/L, 1,2 mg/L, 0,84 mg/L e 1,6 mg/L, respectivamente (Brasil, 2011). Para o ministério da saúde, a potabilidade da água é regulamentada com respeito a concentração máxima permitida de Benzeno, Tolueno, etilbenzeno e xileno, que é igual respectivamente a 0,005 mg/L, 0,17 mg/L, 0,2 mg/L e 0,3 mg/L (Brasil, 2017).

Em relação à contaminação por BTEX em solos, a Resolução CONAMA n° 420, de 28 de dezembro de 2009 estabelece parâmetros que norteiam a qualidade do solo, quanto à presença de substâncias químicas e determina diretrizes para o

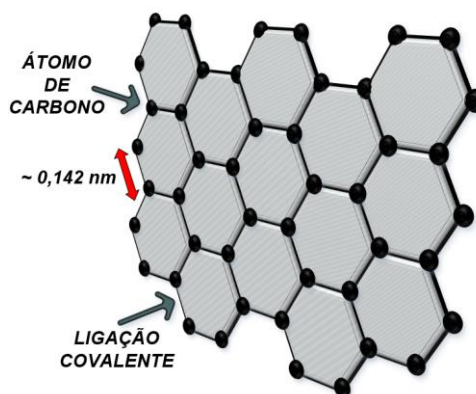
gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias, devido atividades realizadas pelo homem (Brasil, 2009). Dessa forma, a resolução normatiza valores para as concentrações que definem a qualidade e as alterações do solo e da água subterrânea a partir de sua presença. Para a água subterrânea, as quantidades permitidas para Benzeno, Tolueno, etilbenzeno e xileno são os mesmos apresentados pela Portaria de Consolidação nº5, de 28 de setembro de 2017 do ministério da saúde (Brasil, 2017).

Neste sentido é de grande importância, devido à alta mobilidade de compostos contaminantes como o grupo BTEX, que seja feito não somente o monitoramento dessas substâncias, mas também a remoção, degradação e eliminação, destes, com o uso de técnicas que possam agir de forma direta, sem prejuízo ao meio ambiente e de forma limpa, como as utilizadas nos POA's (Emmanuel *et al.*, 2023, Ghosh *et al.*, 2023, Kaur *et al.*, 2023).

3.4 Grafeno

O Grafeno é um alótropo do carbono, que pode alcançar espessura inferior a 1 nm e tem semelhança a uma folha plana, em que os átomos de carbonos compactados estão dispostos em uma rede de duas dimensões disposta em uma estrutura hexagonal, mostrado na Figura 5. Dessa forma, essa estrutura tem sido apontada, nos últimos anos, como uma das formas alotrópicas do carbono que apresenta maior quantidade de aplicações tecnológicas. (Yu *et al.*, 2023, Guan *et al.*, 2023, Chen *et al.*, 2023).

Figura 5 - Estrutura do Grafeno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Estudos mostram que esse material pode ser um promissor substituto para o silício na microeletrônica e devido sua elevada área superficial de $2600 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$, pode ser utilizado como suporte catalítico. (Li *et al.*, 2023, Kim *et al.*, 2023, He, Li, 2023).

Vários pesquisadores têm buscado desenvolver diversas aplicações para este material este material, bem como associado a outros materiais. Na medicina, ele tem mostrado grande potencial como biossensor, pois possibilita o diagnóstico de doenças cancerígenas. No campo da eletroquímica, cientistas buscam melhorar a tecnológica OLED, com eletrodos a base de Grafeno, bem como aplicações analíticas por gravação a laser (Guan *et al.*, 2023, Ma *et al.*, 2023, Apponi *et al.*, 2023, Ning *et al.*, 2023, Hussain, Maktedar, 2023).

O interesse por esse material, fez com que a comunidade científica busca-se obtê-lo por meio de fontes renováveis. Assim o uso de bagaço de cana, serragem, epicarpo de coco, casca de frutas, jornais, ossos de frango e esterco de vaca, são exemplos de matérias-primas que vem sendo utilizados na obtenção da síntese do Grafeno, por meio de inúmeras rotas (Zhang *et al.*, 2023, Wang *et al.*, 2023, Chen, Wang *et al.*, 2023b).

Estudos mostram que é possível sintetizar Grafeno cristalino e ondulado, de baixo custo e de forma rápida a partir de cinza de casca de arroz, através da ativação química. E com o mesmo objetivo, também foi proposta a síntese a partir de folhas de cânfora, reduzindo assim os impactos ambientais com resultados satisfatórios quanto as propriedades (Ramaligam *et al.*, 2022, Hoai *et al.*, 2023, Chen *et al.*, 2021, Chinnasamy *et al.*, 2023).

Além dos diversos materiais utilizados como precursores do Grafeno, diversas rotas têm sido estudadas para se alcançar um material com características específicas em cada campo de estudo, pois cada caminho determinará as propriedades que ele terá. Nesse aspecto, a clivagem micromecânica/esfoliação micromecânica, tem sido utilizada para a produção de folhas de Grafeno de única camada, onde através de forças mecânicas o material é depositado sobre a superfície de uma fita adesiva para o processo de esfoliação. Em fase líquida, é possível a síntese de Grafeno em meio líquido por meio de 3 estágios: 1) dispersão do grafite em solvente; 2) esfoliação; e 3) Purificação. O terceiro método dos mais conhecidos, é o de deposição química de vapor, um processo em que moléculas gasosas são transformadas em materiais

sólidos na forma de filmes finos, cristalinos ou amorfos (He, Li, 2023, Rahim, Chun, 2022, Wang *et al.*, 2023, Hu, Liu, Tian, 2019).

A utilização de materiais lignocelulósicos, como madeira por exemplo, também vem ganhando espaço na síntese do Grafeno. De modo que resultados recentes apontam altos teores de lignina como o responsável pela melhor formação do Grafeno. Dessa forma, materiais de origem vegetal têm sido apontados como alternativa limpa para a formação de Grafeno. (Zhang *et al.*, 2023, Kumar *et al.*, 2023, Hussain, Maktedar, 2023).

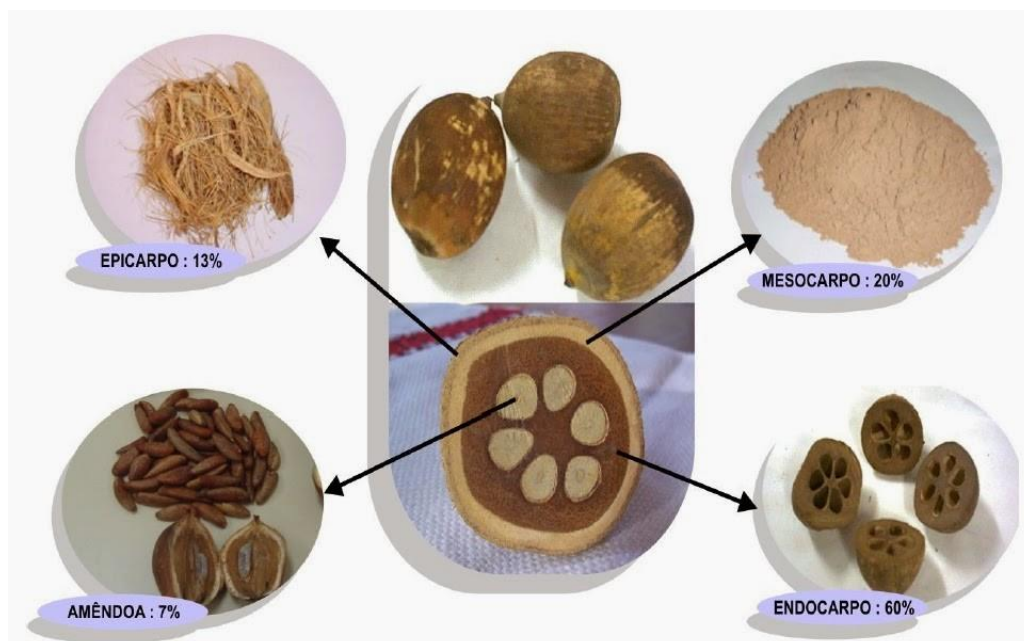
3.5 Babaçu (*Attalea speciosa*)

A planta Babaçu (*Attalea speciosa*) é uma árvore da família Arecaceae, conhecida como Palmeiras. Apresenta grande ocorrência no Meio Norte do Brasil, onde predominam os climas semiárido do Nordeste e sub-úmido da Amazônia, que proporcionam as condições adequadas para o desenvolvimento desse tipo palmeira em grande parte do nordeste do Maranhão, bem como do noroeste do Piauí (Almeida Júnior *et al.*, 2016).

O uso dos componentes da palmeira babaçu como modo de sobrevivência é considerada antiga, acreditando-se ser oriunda dos povos indígenas, datada de antes da descoberta do Brasil. Porém, essa cultura continuou como em comunidades quilombolas e, ainda hoje, é o meio de subsistência de indivíduos carentes que habitam em regiões de maior incidência dessa vegetação, como no caso dos estados do Maranhão, Piauí e Tocantins (Almeida Júnior *et al.*, 2016).

O uso da palmeira Babaçu tem despertado o interesse também da comunidade científica devido ao fruto que é chamado de coco babaçu que é dividido nas seguintes frações: epicarpo (parte externa e material fibroso e lignocelulósico, correspondente a 13% em quantidade do coco), mesocarpo (parte abaixo do epicarpo e com alta concentração de amido corresponde a 20% de constituição), o endocarpo (a fração com maior dureza correspondendo a 60 %) e a amêndoa (representa apenas 7% da sua constituição) (Quadro 1). De modo que, quando as comunidades pobres utilizam o fruto da palmeira como fonte de subsistência, surgiu a possibilidade do aproveitamento de outras partes, que geralmente viram resíduos, como matéria prima no campo da síntese de novos materiais (Kumar *et al.*, 2023, Hussain, Maktedar, 2023).

Quadro 1: Frações do coco babaçu.



Fonte: Almeida Júnior *et al.*, 2016.

O babaçu (*Attalea speciosa*), tem sido utilizado em diversas inovações tecnológicas visando ao aproveitamento de suas partes. Tradicionalmente utilizado por comunidades extrativistas, o babaçu tem ganhado atenção de centros de pesquisa, que buscam agregar valor a seus derivados. A casca, por exemplo, tem sido empregada na produção de carvão ativado, com alta eficiência na remoção de contaminantes de águas residuais. Já o mesocarpo, rico em amido, é utilizado na produção de biofilmes biodegradáveis, com potencial substitutivo ao plástico convencional (Almeida Júnior *et al.*, 2016, Chaves *et al.*, 2023).

O óleo extraído da amêndoa é amplamente aproveitado nas indústrias cosmética e alimentícia, além de servir como matéria-prima para biodiesel. Em relação ao uso energético, o epicarpo é uma fonte promissora de biomassa para geração de calor e energia elétrica em comunidades isoladas. A farinha do mesocarpo também tem sido enriquecida com micronutrientes, sendo indicada para suplementação alimentar em programas de combate à desnutrição (Morales *et al.*, 2025).

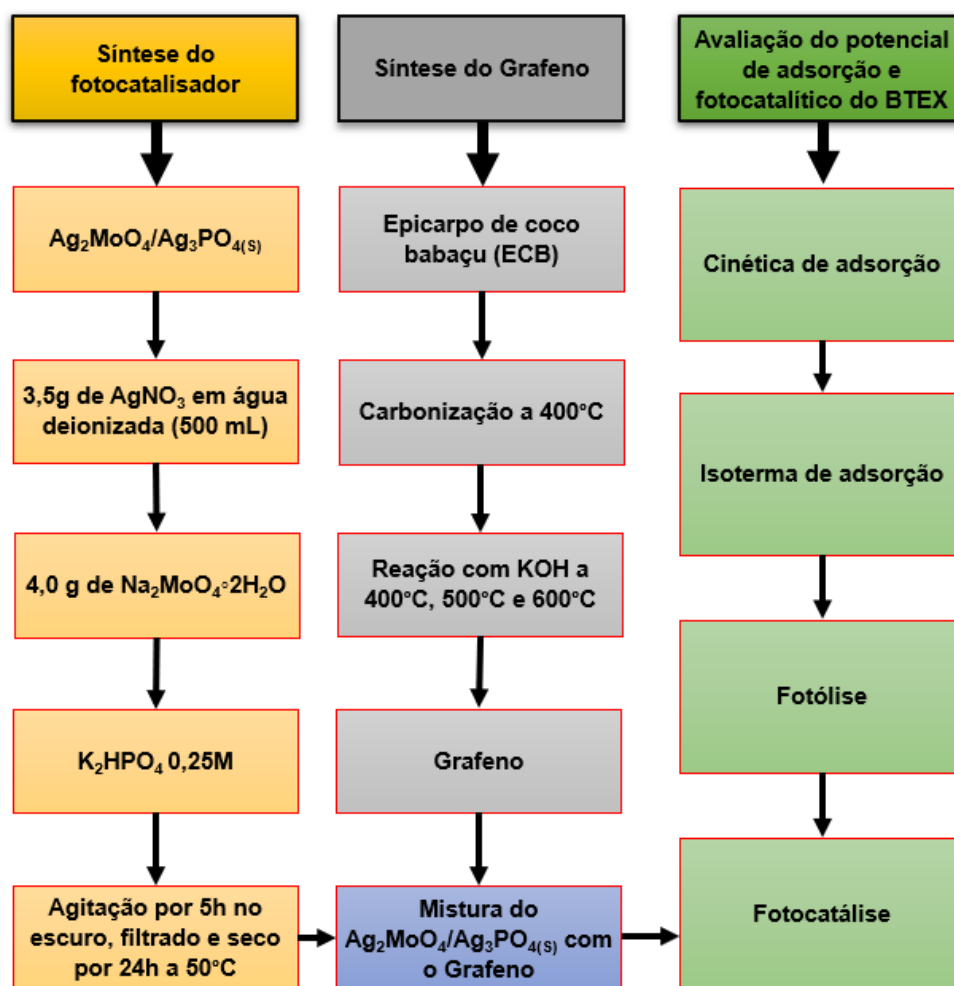
As tecnologias de extração e processamento têm avançado, incluindo a automação do desdobramento dos frutos, promovendo maior eficiência e segurança para os trabalhadores. Tais iniciativas representam não apenas ganhos econômicos, mas também sociais e ambientais, ao promoverem o uso sustentável de um recurso

regional abundante, reforçando práticas de bioeconomia no contexto amazônico e nordestino (Chaves *et al.*, 2023, Morales *et al.*, 2025).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada para síntese e caracterização do compósito $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$, bem como a avaliação da cinética e do equilíbrio de adsorção de BTEX, na superfície do fotocatalisador. Para avaliar a atividade fotocatalítica, foi desenvolvido um reator iluminado por fibra ótica para verificar degradação dos poluentes. Um fluxograma do curso experimental da tese é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma do curso experimental do trabalho.



Na primeira etapa foram sintetizados o molibdato de prata com fosfato de prata ($\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_{4(s)}$) pelo método de precipitação simples, o Grafeno a partir de epicarpo de coco babaçu (EBC) e a construção do reator fotocatalítico. Na segunda etapa, foram caracterizados os materiais sintetizados, onde se fez o uso das seguintes técnicas: microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX),

análise de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia Raman, espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS), e espectroscopia de refletância difusa (ERD).

Na terceira etapa foi feita a avaliação da cinética e do equilíbrio adsorção na superfície do fotocatalisador no escuro. Na sequência foram realizados testes fotocatalíticos com o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ e o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$, utilizando o sistema desenvolvido.

5. MATERIAIS

5.1 Reagentes

Para a síntese do fotocatalisador $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ foram utilizados os seguintes reagentes: nitrato de prata AgNO_3 com pureza de 99,0 %, molibdato de sódio di-hidratado $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ com pureza de 99,5 % e fosfato de potássio K_2HPO_4 com pureza de 98,0 % todos da empresa NEON.

Na síntese do Grafeno foi utilizado o epicarpo de coco babaçu (*Attalea speciosa*), que foi coletado na Universidade Federal do Maranhão, como precursor e hidróxido de potássio (KOH), da empresa NEON.

Como poluentes, foram escolhidos o benzeno com pureza de 99,9 %, tolueno com pureza de 99,9 %, xileno com pureza de 99,9 % e o etilbenzeno com pureza de 99,5 % todos da empresa Isofar, para avaliar a atividade fotocatalítica.

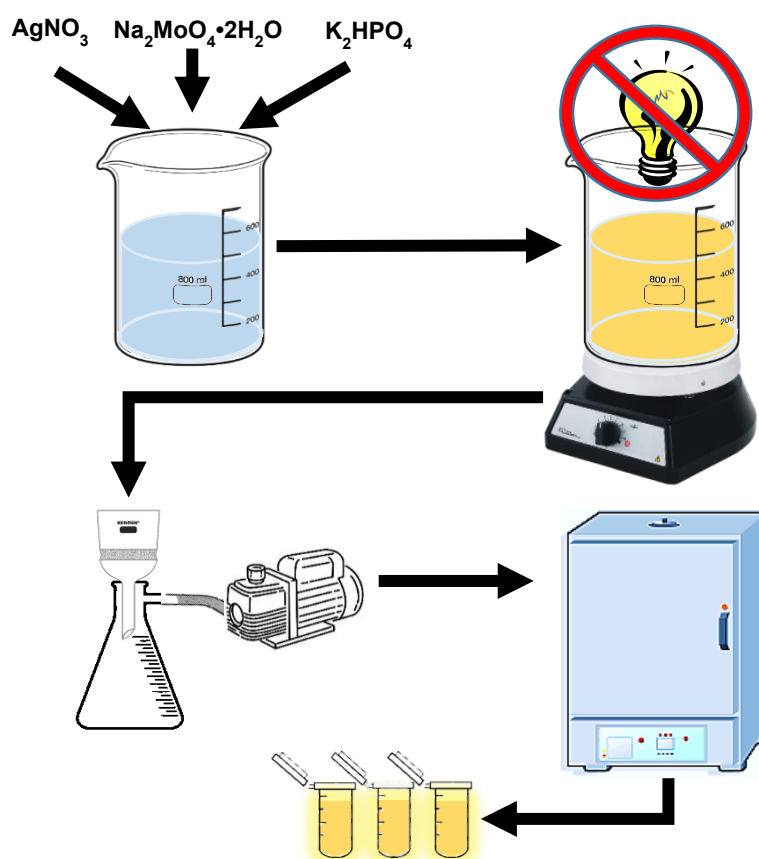
6. MÉTODOS

6.1 Síntese do fotocatalisador

A síntese do fotocatalisador foi realizada pelo método de precipitação simples, adaptado de Wang *et al.*, (2017a) e Frazão (2019), ilustrado na Figura 7. Primeiro, foram pesados 3,5 g de nitrato de prata (AgNO_3) que foram dissolvidos em 500 mL de água destilada. Na sequência foram adicionados 4,0 g de molibdato de sódio di-hidratado ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e por último foi feita uma solução de fosfato de potássio (K_2HPO_4) (0,25 M) que foi adicionado gota a gota, ao sistema contendo a solução de nitrato de prata e de molibdato de sódio di-hidratado, até formar uma suspensão de

cor amarela, que foi mantida sob agitação constante por 5 h isolado da iluminação externa com o auxílio de folha de alumínio que envolveu todo o reator. Essa condição é importante pois a luz é o agente ativador do fotocatalisador. Após esse tempo o material foi filtrado a vácuo e seco em estufa a 50 °C por 24 h e guardado em microtubos de polipropileno (0,2 mL) para posterior caracterização e aplicação fotocatalítica. Este material foi denominado molibdato de prata com fosfato de prata ($\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$)

Figura 7 - Processo de síntese do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.2 Síntese do Grafeno

O processo de síntese do Grafeno foi realizado a partir do coco babaçu (*Attalea speciosa*) com método adaptado de Severo (2020).

Inicialmente o coco babaçu foi coletado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA), e levado ao laboratório Núcleo de Combustíveis, Catálise e Ambiental

(NCCA), onde foi separado o epicarpo presente no coco babaçu, que foi utilizado como material precursor, e na sequência, foi realizada uma lavagem para retirada de impurezas externas e posteriormente foi seco em estufa a 100 °C por 24h.

Após o período de secagem, o material foi separado em 3 cadinhos de porcelana, 100 g em cada. Levados para o forno mufla, cada um submetido a uma temperatura diferente, 400 °C, 500 °C e 600 °C, respectivamente, por 2 h. Na sequência, todos os materiais foram pesados e anotadas as massas após o tratamento térmico.

Na sequência, foram pesados 1 g de cada um dos materiais tratados a diferentes temperaturas, misturados a 4 g de hidróxido de potássio (KOH) e levados por 2 h ao forno mufla a 850 °C. Após esse período, todas as amostras foram acrescidas de 50 mL de água destilada e agitadas por 5h, filtradas e secas a 100°C por 24 h. Por último, os materiais, a 400 °C, 500 °C e 600 °C, foram adicionados juntamente com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$, em mesma proporção mássica, a três béqueres diferentes com 100 mL de água destilada, sob agitação constante por 2 h, seco a 100 °C por 24 h e destinadas a caracterização e aplicação na degradação de BTEX.

6.3 Desenvolvimento do reator fotocatalítico.

Para a avaliação dos testes fotocatalíticos foi desenvolvido um reator (Apêndice 6), com capacidade de 50 mL. O dispositivo utilizado para iluminação foi criado a partir de sucata eletrônica, no qual foram implementadas uma fonte de iluminação no campo do ultravioleta e no campo do visível, com leds de alto brilho. Para melhorar a iluminação do fotoreator, foram utilizados 126 filamentos de fibra ótica de polimetilmetacrilato (PMMA), com diâmetro de 1 mm, da empresa FASA LTDA.

7. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS SINTETIZADOS

7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é um tipo de microscopia que utiliza feixe de elétrons que ao ser focalizado sobre a superfície, consegue fazer a varredura da amostra em análise, de modo que a interação com a matéria possibilita a geração de sinais que podem fornecer informação sobre a morfologia, bem como sobre a composição química do material por Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) (Chen *et al.*, 2023, Guan *et al.*, 2023, Lian *et al.*, 2022).

As análises de caracterização morfológica, bem como de composição elementar foram realizadas no microscópio HITACHI, modelo TM3030, Figura 8. A preparação dos materiais para a análise consistiu em fixar as amostras em pó, a um suporte metálico (*stub*), com fita de carbono e fixadas com nitrogênio. Após a realização da análise de caracterização, os dados foram verificados com o programa Size Meter (versão 1.0), onde foram realizados os cálculos dos tamanhos médios, desvio padrão e variância das partículas que compõe o material analisado.

Figura 8 - Microscópio HITACHI, modelo TM3030.



Fonte: Corporation (2023).

7.2 Difração de raios X

A cristalinidade do fotocatalisador foi medida através do difratômetro Rigaku modelo Miniflex II 4053-A3, Figura 9.

O material sintetizado teve sua estrutura analisada pela técnica de difração de raios X (DRX), utilizando um Difratorômetro de Raios-X D8 Advance, Bruker, Figura 9, com radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), ângulo de varredura de 20 a 110° (2 θ), utilizando velocidade de varredura de 4 min⁻¹ e passo de 0,02°. As posições e as intensidades dos picos foram comparadas usando as fichas JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*).

Os tamanhos dos cristalitos de cada uma das fases foram estimados pela equação de Scherrer (Equação 7), utilizando seus picos de maiores intensidades como referência.

$$\tau = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (7)$$

Onde τ é o tamanho médio do cristalito, K é o fator de forma adimensional (o valor típico de 0,9 foi aplicado), λ é o comprimento de onda dos raios X (em nm), β é o comprimento do pico na metade da altura de sua intensidade máxima (FWHM) em radianos e θ é o ângulo de Bragg.

Figura 9 - Difratorômetro de Raios-X D8 Advance, Bruker



Fonte: Página da [Central multiusuário de Pesquisa em materiais e biosistemas](#) (2023).

Com arquivos de difração de pó padrões do JCPDS e o software HighScore (Joint Committee Powder Diffraction Standard) foi possível identificar as fases cristalinas do fotocatalisador sintetizado.

7.3 Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia na região do infravermelho é a análise que permite verificar a presença de grupos funcionais que estão presentes na estrutura de determinada substância, em que a medida mostra a transição entre estados vibracionais e rotacionais que ocorrem quando uma molécula absorve energia na região do infravermelho (Mekoung *et al.*, 2023, Anand *et al.*, 2023).

Os espectros de infravermelho com transformadas de Fourier foram obtidos usando o espectrofotômetro Shimadzu, modelo IR Prestige-21 na faixa compreendida entre 400 – 4000 cm^{-1} . As análises foram realizadas usando pastilhas prensadas e compostas por 99% de KBr e 1% do material sintetizado, a fim de identificar os estiramentos de grupos funcionais presente nas amostras, Figura 10.

Figura 10 - Espectrofotômetro Modelo IR Prestige 21 da Shimadzu.



Fonte: Espectrofotômetros FTIR (2023).

7.4 Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman se baseia no espalhamento da luz pela matéria, de modo que a radiação monocromática incide sobre a amostra onde ocorre a interação dos fótons incidentes com a nuvem eletrônica que é modulada pelas vibrações moleculares ou fônons de cristais, o que causa a indução a pequenos deslocamentos

de comprimentos de onda dos fótons espalhados. Essa técnica de caracterização é fundamental para a determinação de materiais gráfiticos, pois descreve a simetria das ligações carbono-carbono o que revela a natureza da estrutura de carbono das moléculas. Para as medidas foi utilizado o espectrômetro Horiba Jobin Yvon Triplemate 64000 equipado com CCD resfriada a nitrogênio líquido com geometria de retro espalhamento, Figura 11.

Figura 11 - Espectrômetro Jobin Yvon T 64000.



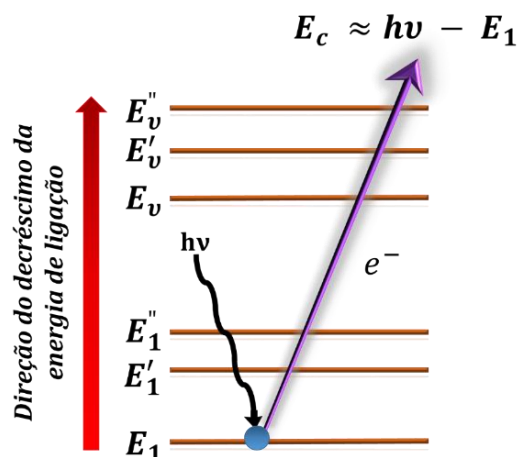
Fonte: Laboratório de Física da UFMA.

O feixe do laser foi focado com auxílio de um microscópio modelo Olympus BX40 equipado com uma lente objetiva de 20x de distância focal $f = 20,5$ mm. A fonte de excitação foi um laser semiconductor da Coherent modelo Verdi-V5, operando na linha de 532 nm e ajustado a uma potência de 250 mW em que a amostra foi disposta em uma lâmina, devidamente espalhada e prensada para evitar deslocamento de massa durante a realização da técnica.

7.5 Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios X (XPS)

Esta técnica mede energias de ionização das moléculas, através da ejeção de elétrons tendo em vista os diferentes orbitais e, pode ser utilizada na determinação de energias de ligação em sólidos, bem como na identificação de elementos químicos, conforme mostra a Figura 12.

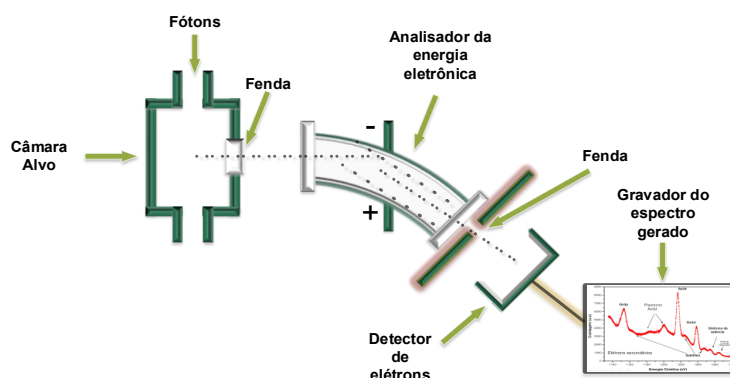
Figura 12 - Representação esquemática do processo XPS.



Fonte: Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O equipamento para a medição consiste numa fonte de radiação ionizante, um analisador eletrostático que mede a energia dos elétrons que são ejetados e um detector de elétrons (Figura 13). Para se estudar os elétrons é necessário a utilização de fótons de energias mais altas, por volta de 100 keV, na região de raios x, que pode ser alcançada da radiação de sincrotron, esta técnica se chama Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios X (XPS). Essa medida de energia cinética dos fotoelétrons é realizada com analisadores que verificam a velocidade dos elétrons pela deflexão do feixe num campo eletromagnético.

Figura 13 - Esquema geral de um espectrofotômetro de fotoelétrons de raios X.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Para a análise de XPS foi realizada uma medida para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ e para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$, onde foi utilizado o espectrômetro Scienta Omicron

ESCA (Figura 14), de origem alemã, com Al K α monocromático (1486,7 eV) do Instituto de Física de São Carlos (IFSC-USP). Os dados obtidos foram tratados matematicamente e mostrados na seção de resultados.

Figura 14 - Espectrômetro de raios-X modelo – Scienta-Omicron ESCA+.



Fonte: Página da [Central IFSC-USP Multiusuários](#) (2023).

7.6 Espectroscopia de Refletância Difusa (ERD)

Para verificar as propriedades ópticas do Ag₂MoO₄/Ag₃PO_{4(s)} foi realizada espectroscopia de refletância difusa UV-vis. A análise foi realizada num espectrômetro de UV-Vis Shimadzu, modelo UV-2600, no modo de refletância difusa, operando na faixa de comprimento de onda de 200-800 nm. Com os resultados obtidos foram calculados os valores de Energia de bandgap (E_{gap}), e das Energias das Bandas de Condução (E_{BC}) e de Valência (E_{BV}) da amostra.

A partir dos resultados de refletância difusa em função do comprimento de onda característico e utilizando o método de Kubelka-Munk, Equação 8, foi estimado a energia de bandgap do Ag₂MoO₄/Ag₃PO_{4(s)}.

$$F_{KM}(RD) = \frac{(1-RD)^2}{2RD} = \frac{\alpha}{s} \quad (8)$$

Onde,

α = coeficiente de extinção molar.

S = fator de espalhamento.

RD = refletância difusa.

O coeficiente de extinção molar pode ser definido segundo como

$$\alpha = \frac{A(h\nu - E_{gap})^{\frac{n}{2}}}{h\nu} \quad (9)$$

A = constante de absorção.

$h\nu$ = energia do fóton emitida, relacionada com o comprimento de onda, em que $\nu = c/\lambda$.

E_{gap} = energia de bandgap.

Sendo a energia de band gap do fotocatalisador a base de molibdato de prata do tipo direta permitida e, portanto, $n=1$ (KUMAR *et al.*, 2016; FABBRO *et al.*, 2016; DHANABAL; VELMATHI; BOSE, 2016). Assim, plotando-se um gráfico $(\alpha h\nu)^2$ por $h\nu$, o valor aproximado da energia de bandgap pode ser obtido pela extrapolação da região linear da curva até $(\alpha h\nu)^2 = 0$.

8. CINÉTICA E EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO DO XILENO E ETILBENZENO NOS FOTOCATALISADORES

8.1 Cinética de adsorção

A cinética de adsorção de BTEX em banho finito, foi realizada em um reator com volume de 50 mL. Para ambos, foram seguidos os seguintes procedimentos:

adicionou-se de 25 mL de solução do poluente cuja concentração foi de 50 mg/L, e 10 mg de catalisador foram acrescentados ao meio. O reator foi mantido no escuro e a suspensão foi controlada a temperatura ambiente (25 ± 2 °C). Em intervalos regulares de tempo, uma alíquota (2 mL) da fase líquida era retirada do reator, filtrada com o auxílio de membrana (PVDF, 0,22 μ m) e a concentração determinada a partir da absorbância, lida no espectrofotômetro UV-VIS 1800 Shimadzu UV/vis. Os resultados de absorbância foram convertidos em concentração utilizando uma curva de calibração previamente construída. O volume total de solução retirado do reator, ao final do experimento, foi menor que 10% do volume total inicial, de modo a não prejudicar o equilíbrio da reação.

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (10) e de pseudo-segunda ordem (11), onde foram determinadas as constantes de velocidades k_1 (min^{-1}) e k_2 (min^{-1}), para primeira e segunda ordem respectivamente, juntamente com a quantidade adsorvida em equilíbrio, q_e (mg/g), a partir dos dados de quantidade adsorvida, q_t (mg/g), nos determinados tempos, t (min).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (10)$$

$$\frac{t}{q_1} = \frac{t}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (11)$$

8.2 Equilíbrio de adsorção

A verificação do equilíbrio de adsorção para o xileno e o etilbenzeno foi feita seguindo um procedimento em que, para ambos os poluentes, em 6 diferentes frascos foram adicionados 25 mL de solução aquosa em diferentes concentrações (50, 40, 30, 20, 10 e 5 mg/L) e 10 mg de catalisador em cada frasco, no escuro e à temperatura ambiente (25 ± 2 °C). Os frascos foram mantidos sob agitação constante e, após 30 min, a suspensão aquosa foi filtrada utilizando uma membrana PVDF (0,22 μ m) e a concentração remanescente na solução foi determinada pelo espectrofotômetro. Os resultados de absorbância foram convertidos para concentração utilizando uma curva de calibração.

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de equilíbrio de adsorção de Langmuir (12), Freundlich (13), Temkin (14), Dubinin-Radushkevich (15) e de Redlich-Peterson (17) para observar o melhor ajuste que representa o desenvolvimento da reação.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (12)$$

Em que,

$q_{\max}$ = capacidade máxima de adsorção correspondente à formação da monocamada.

q_e = quantidade adsorvida em equilíbrio (mg/g).

C_e = concentração no equilíbrio (mg/L).

b = coeficiente relacionado à energia de adsorção e aumenta com o aumento da resistência da ligação de adsorção.

$$\log q_e = \log k_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (13)$$

Em que,

q_e = quantidade adsorvida em equilíbrio (mg/g).

C_e = concentração no equilíbrio (mg/L).

k_f = capacidade do adsorvente para o adsorbato.

$1/n$ = intensidade de adsorção que é uma função da força de adsorção.

$$q = \frac{RT}{b_T} \ln (K_T C_e) \quad (14)$$

Em que,

q = quantidade adsorvida por massa de adsorvente no equilíbrio (mg/g).

R = constante universal dos gases ideais.

T = temperatura do reator.

K_T = constante de equilíbrio da Isoterma de Temkin.

C_e = concentração de equilíbrio no leito fluido (mg/L).

b_T = termo que representa o calor de adsorção.

$$q = q_s \exp(-K_{DR} \varepsilon^2) \quad (15)$$

Em que,

q = quantidade adsorvida por massa de adsorvente no equilíbrio (mg/g).

q_s = capacidade de adsorção máxima.

K_{DR} = constante da isoterma de Dubinin e Radushkevich.

ε = potencial de adsorção de Polanyi definido a partir da (16).

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (16)$$

$$q = \frac{K_{RP} C_e}{1 + a C_e^\beta} \quad (17)$$

Em que,

q = quantidade adsorvida por massa de adsorvente no equilíbrio (mg/g).

K_{RP} = constante da isoterma de Redlich e Peterson.

C_e = concentração no equilíbrio (mg/L).

a e β são constantes empíricas da equação de Redlich e Peterson.

9. CINÉTICA DE FOTODEGRADAÇÃO DE BTEX

Para o estudo da fotodegradação de BTEX, utilizou-se um volume de 50 mL de solução com a concentração de 50 mg/L e pesados 10 mg do material a ser utilizado como fotocatalisador ($\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{S})$ e/ou $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$), por último adicionados ao reator. Para o início do processo, o meio reacional foi isolado da luz externa, para proporcionar a ativação do fotocatalisador apenas pela iluminação da fonte interna ao reator, quando ligada. A reação foi mantida no escuro por 30 min, para garantir que o equilíbrio de adsorção fosse alcançado. Após esse tempo, para ativação do fotocatalisador, duas rotas foram propostas: a primeira com a ação de luz ultravioleta acoplada na parte superior do reator, sem fazer contato com o meio líquido, a segunda, com a ação apenas da luz visível por meio de fibra ótica

imersa no meio líquido. Com a reação em andamento, em intervalos regulares de tempo, uma alíquota da solução era removida, filtrada em membrana (PVDF, 0,22 μm) e a concentração verificada por espectrofotometria UV/vis ($\lambda = 263 \text{ nm}$ - xileno e 260 nm - etilbenzeno).

Os resultados de absorbância, para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ e o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$, foram matematicamente tratados e ajustados segundo a lei de velocidade de pseudo-primeira ordem, expressa pela Equação (10).

10. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados experimentais de caracterização dos fotocatalisador, do Grafeno, da cinética e do equilíbrio de adsorção, bem como os resultados das cinéticas de fotodegradação de BTEX.

10.1 Caracterização do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ e $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$.

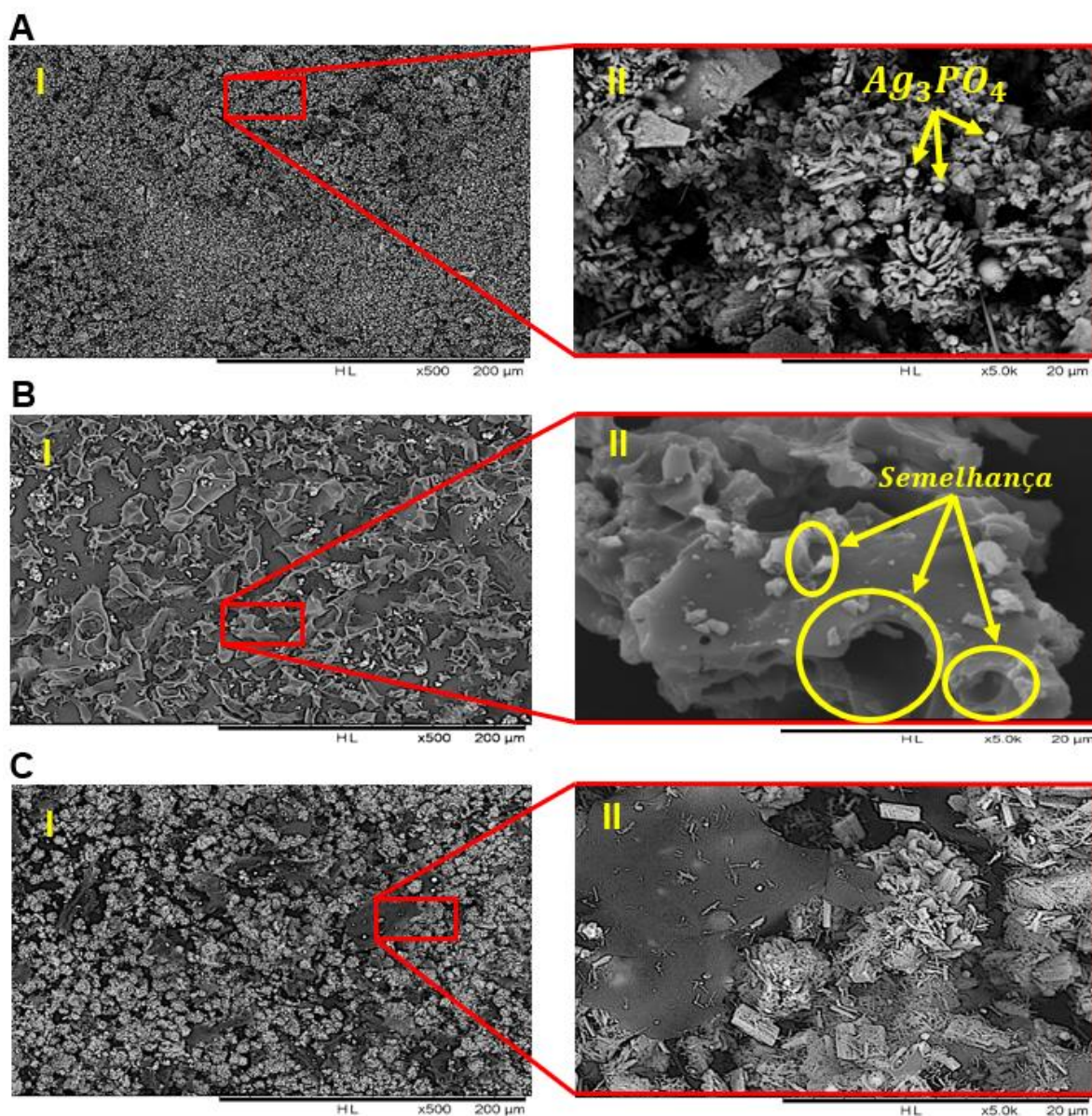
10.1.1 *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS)*

O tamanho e a morfologia das partículas do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$, do Grafeno e do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$ foram observadas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) com aumentos de 500 e 5000 vezes, Figura 15. Pode-se observar, por meio da Figura 15a, que o material sintetizado se apresenta com algumas partículas no formato de pequenas esferas, que foram atribuídas ao fosfato de prata (Frazão *et al.*, 2019), e que apresentam um diâmetro médio de 0,73 μm (20 formas esféricas medidas), com desvio padrão = 0,34 e variância = 0,12. Também é possível observar estruturas predominantes na forma de microbastões, semelhantes a corais, com tamanho médio de comprimento, em torno de 1,93 μm , com desvio padrão = 0,95 e variância = 0,90 (Safartoobi; Mazloom; Ghodsi, 2023).

Na Figura 15b pode-se observar a morfologia do Grafeno sintetizado na temperatura de 400°C (escolheu-se essa temperatura pelo material ter apresentado melhor cristalinidade). Pode-se observar na Figura 15b, imagem II, a presença de estruturas semelhantes, porém em tamanhos diferentes. A morfologia obtida está de acordo com os estudos de Abd-Elrahim, Chun (2022); Hussain, Maktedar (2023) e Ma *et al.*, (2023), e na Figura 15c é possível notar a presença de aglomerados associados ao $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ sobre a superfície do Grafeno.

A determinação semiquantitativa da composição química elementar dos materiais sintetizados é mostrada na Figura 16 e na Tabela 1, onde se observa a composição química, obtida por meio do EDS em concordância com o esperado, bem como a sua composição elementar, indicando a presença dos constituintes básicos do fotocatalisador e do Grafeno.

Figura 15 – Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura dos materiais sintetizados, aumentados 500 vezes (I) e 5000 vezes (II): a) $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$; b) Grafeno; c) $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na Tabela 1 é possível observar um percentual de prata em maior destaque devido a sua proporção molar em conjunto com molibdato e o fosfato, bem como à maior proporção mássica adicionada durante o processo de síntese. Para o fósforo é possível perceber uma proporção bem inferior em relação aos demais componentes do fotocatalisador, para a formação do grupo fosfato de prata, o que é corroborado com a Figura 15a onde se percebe pequenas formas esféricas/arredondadas,

indicando a sua presença, como discutido por Zhang *et al.*, 2023, Zhuang *et al.*, 2023, Oliveira *et al.*, 2021 e El Masaoudi *et al.*, 2021. Por outro lado, o baixo percentual de fósforo aponta também para uma provável cristalinidade do mesmo em relação ao molibdênio, o que pode ser visto com a Figura 17, onde o fosfato de prata aparece em sua maioria com picos de intensidade cristalina relativamente bastante inferior ao do molibdato de prata.

Tabela 1 - Composição elementar do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$, Grafeno e do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$ obtidas por EDS.

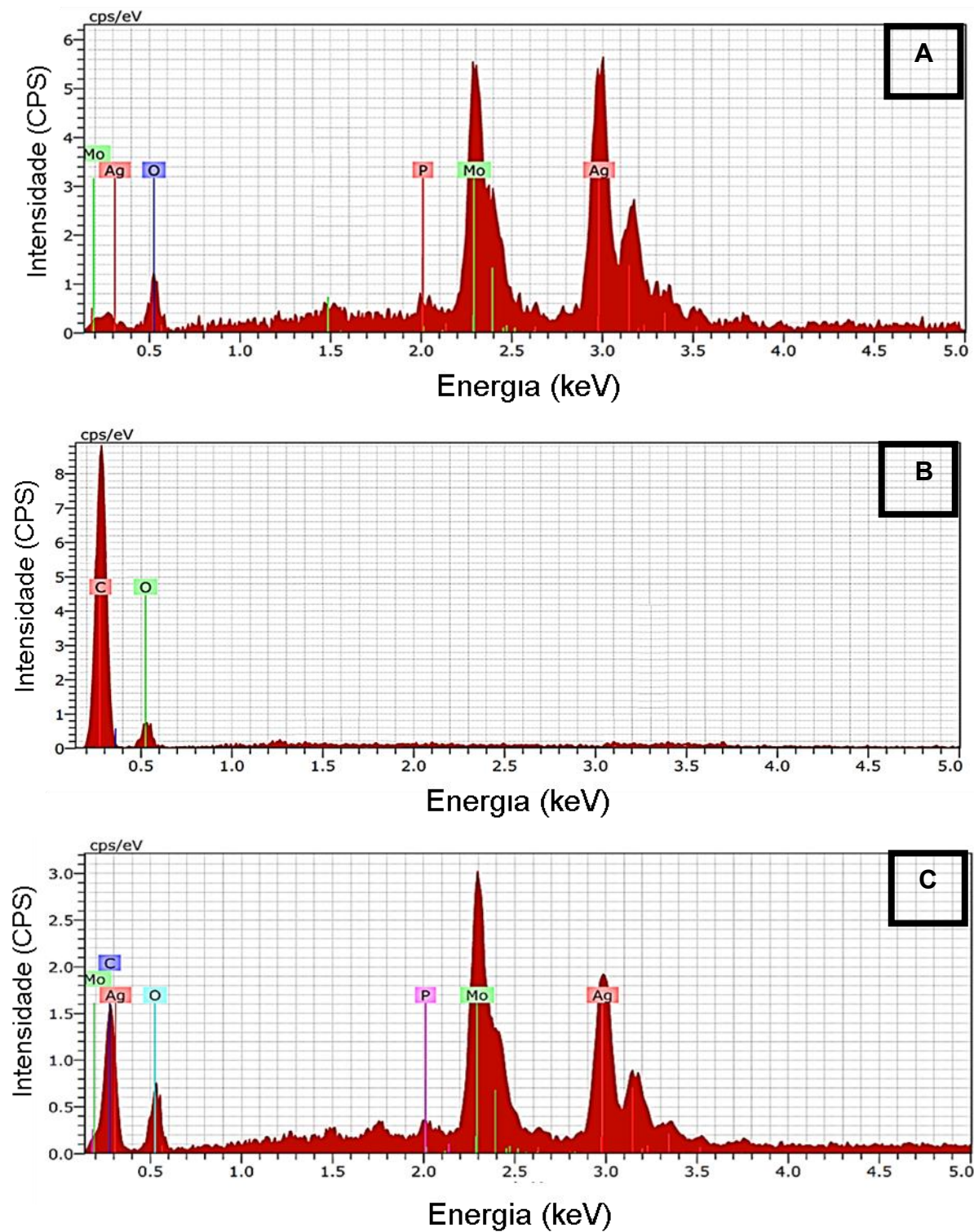
Elemento	Percentual mássico, %		
	$\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$	Grafeno	$\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$
Ag	51,43	-	32,27
Mo	32,35	-	29,74
O	15,16	17,52	17,45
P	1,07	-	0,08
C	-	82,48	20,45

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Diferentemente, o molibdênio se apresenta em proporção superior e com maior presença do mesmo, que pode ser notada com estruturas do tipo coral (De *et al.*, 2017) que se destacam, e que podem ser vistas na Figura 15a, de modo que com a apresentação de um percentual de cerca de 32,35%, Tabela 1, presente na amostra analisada, além de uma morfologia heterogênea, várias fases do molibdato de prata se evidenciam, Figura 17.

Na composição percentual do Grafeno é possível notar a predominância de carbono, com cerca de 82,48%, Tabela 1, e uma menor parte de oxigênio, sem qualquer traço de outro elemento como mostra a Figura 16b, o que sugere a possível ausência de impurezas no material.

Figura 16 - Avaliação semiquantitativa da composição química dos fotocatalisadores e do Grafeno obtidas por EDS: a) $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$; b) Grafeno; c) $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

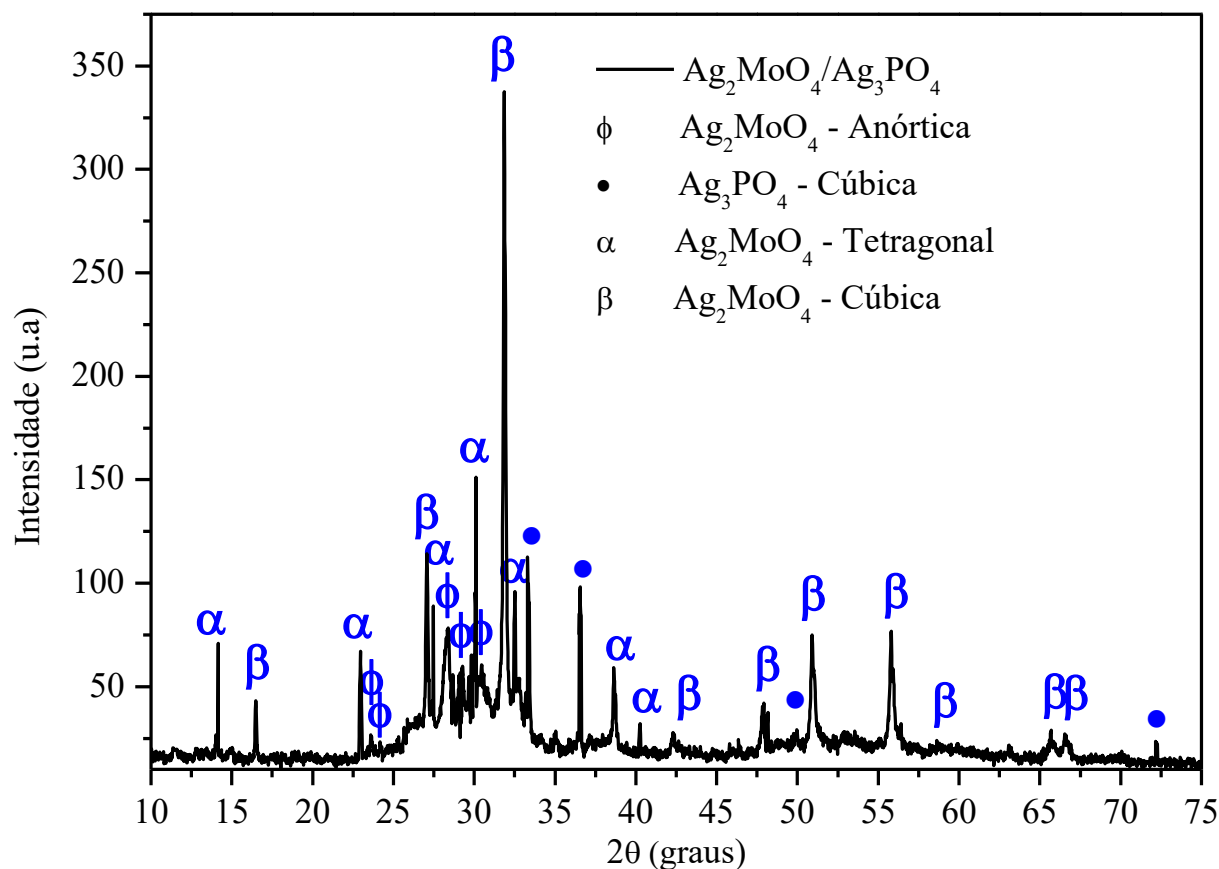
De acordo com a Figura 16, é possível perceber no espectro de EDS uma diversidade de elementos, e que todos que o compõe fazem parte do fotocatalisador com o Grafeno. Na Tabela 1, nota-se que há uma leve redução nos valores percentuais do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$, que podem ser atribuídos ao acréscimo de carbono e oxigênio à composição final.

10.1.2 Difração de Raios X

A verificação da cristalinidade é um fator importante para uma boa atividade fotocatalítica do material semiconductor, tendo em vista a redução da taxa de possível recombinação do par elétron-lacuna pode ser reduzida (Wang *et al.*, 2017a).

A Figura 17) mostra o difratograma do material sintetizado, no qual é possível observar três fases cristalinas referentes ao molibdato de prata: fase alfa (JCPDS 21-1340), fase beta (JCPDS 08-0473) e a fase monoclinica (JCPDS 75-1505). As propriedades da fase beta ($\beta\text{-Ag}_2\text{MoO}_4$) são bem conhecidas e discutidas devido a facilidade de síntese desta fase bem como a sua estabilidade, mas a obtenção da fase alfa ($\alpha\text{-Ag}_2\text{MoO}_4$) é mostrada na literatura como sendo de difícil síntese devido a sua instabilidade, e em algumas situações requer tratamento sob alta pressão (Wang *et al.*, 2017a). Isso corrobora a ideia de que esta fase ($\alpha\text{-Ag}_2\text{MoO}_4$) tem maior energia e, por conseguinte, maior atividade fotocatalítica, sabendo que ao ser fornecida uma maior energia sobre à superfície do fotocatalisador, por meio de uma fonte de luz, leva a um maior número de pares elétron-lacuna, que resulta em uma maior atividade fotocatalítica (Huo *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017a, Wang *et al.*, 2017b, e Ng; Fan, 2015).

Figura 17 - Difratoograma de raios X do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

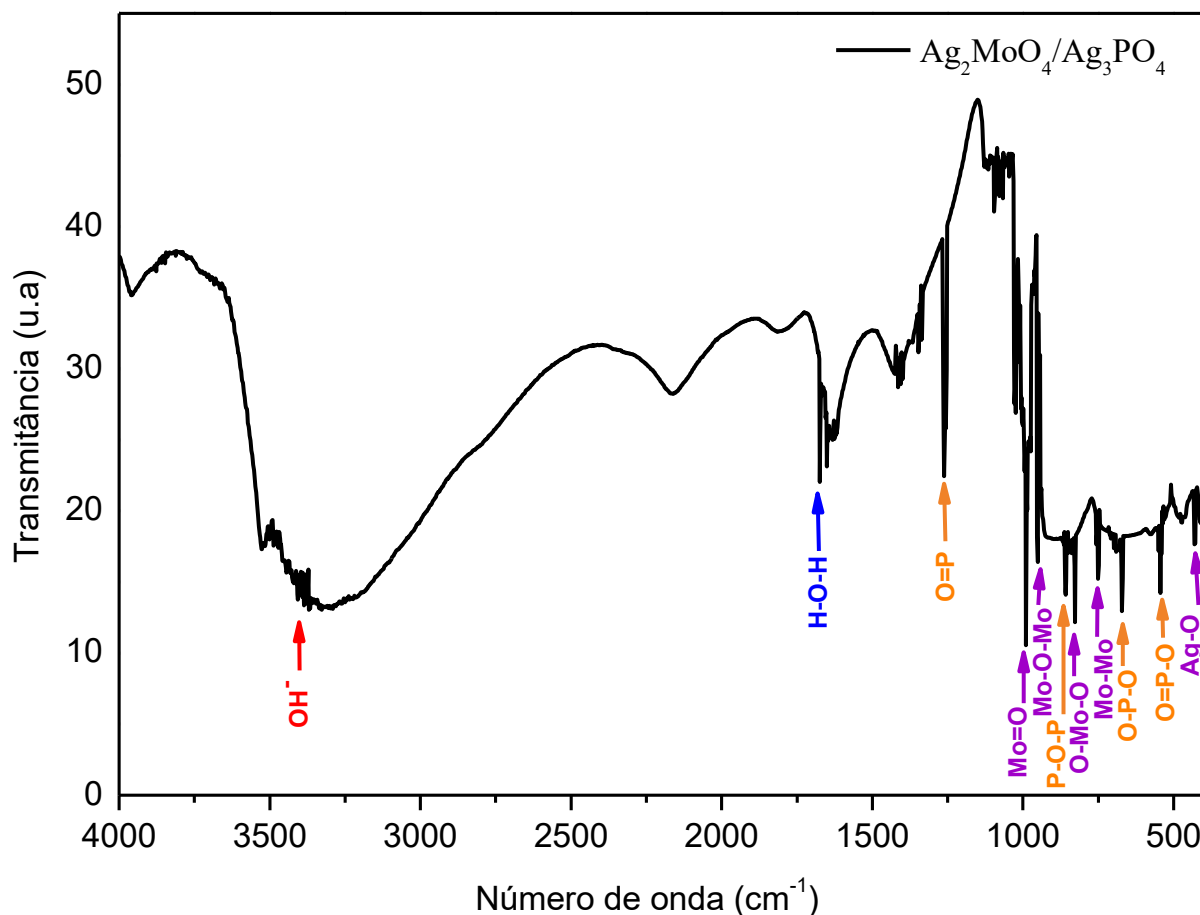
O tamanho de cristalito de 53 nm, foi obtido considerando as fases anórtica, cúbica e tetragonal, o qual foi superior ao apresentado por Della Rocca *et al.*, 2021, com 46 nm, para o molibdato de prata. O $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ também se destaca em relação a outros materiais como dióxido de titânio, apresentado por Nasiri *et al.*, (2023) com tamanho de 15,87 nm.

10.1.3 Espectroscopia na região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

No espectro de FTIR para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ mostrado na Figura 18 onde é possível perceber em torno de 428 cm^{-1} (Balasurya, S. *et al.*, 2021), o alongamento do metal prata (Ag), referente ao molibdato de prata. Com uma forte flexão, aparece a ligação O=P-O em torno de 543 cm^{-1} e 550 cm^{-1} (Amiezatul Amirulsyafiee *et al.*, 2022) e com vibrações de alongamento em torno de 558 cm^{-1} e 870 cm^{-1} aparecem ligações do tipo P-O e P-O-P (Hamrouni, A. *et al.*, 2020, Tan, S. *et al.*, 2003).

As ligações que representam o molibdato de prata aparecem com o alongamento Mo-Mo, O-Mo-O, e M=O, distribuídas entre 749 cm^{-1} a 990 cm^{-1} . Por outro lado, é possível notar a vibração de alongamento e flexão dos íons OH^{-1} adsorvidos na superfície.

Figura 18 - Espectro FTIR dos fotocatalisador $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Também é possível observar na Figura 18 - Espectro FTIR dos fotocatalisador $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$. as bandas que indicam o estiramento das ligações O–Mo–O do molibdato de prata (Balasurya, S. *et al.*, 2021, Dhanabal, R.; Velmathi, S.; Bose, A. C. 2016, Utami, R. W.; Rafsanjani, R. A.; D Triyono. 2019, S. Jayasubramaniyan *et al.*; 2018), e a banda em torno de 3400 cm^{-1} que mostra a vibração de alongamento e flexão do radical hidroxila (OH^{-}) (Amiezatul Amirulsyafiee *et al.*, 2022, Dhanabal, R.; Velmathi, S.; Bose, A. C. 2016), que permanece adsorvido na superfície do material sintetizado. Nota-se também as bandas que indicam a presença de fosfato de prata no $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

A Tabela 2 apresenta as bandas do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ distribuídas pelos respectivos números de onda.

Tabela 2 - Distribuição das ligações no espectro FTIR.

$\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ (cm^{-1})	Grupo funcional	Referência
428	Ag de Ag_2MoO_4	[BALASURYA, S. et al., (2021)]
510	Ag-O	[AMIEZATUL AMIRULSYAFIEE et al., (2022)]
543	O=P-O	[AMIEZATUL AMIRULSYAFIEE et al., (2022); UYI SULAEMAN et al., (2022)]
558	P-O	[HAMROUNI, A. et al., (2020); TAN, S. et al.; (2003)]
749	Mo-Mo	[BALASURYA, S. et al., (2021)]
828	O-Mo-O	[BALASURYA, S. et al., (2021); DHANABAL, R.; VELMATHI, S.; BOSE, A. C. (2016); UTAMI, R. W.; RAFSANJANI, R. A.; D TRIYONO. (2019); S. JAYASUBRAMANIYAN et al.; (2018)]
850	O-P-O	[S. AUSTIN SUTHANTHIRARAJ; R. SARUMATHI. (2012); AMIEZATUL AMIRULSYAFIEE et al., (2022)]
870	P-O-P	[UYI SULAEMAN et al., (2022); LIU, H. S.; CHIN, T. S.; YUNG, S. W. (1997); MANSOUR, E.; EL-DAMRAWI, G. (2010)]
950	Mo-O-Mo	[BALASURYA, S. et al., (2021); HIND LAKHLIFI et al.; (2020); TAN, S. et al.; (2003); BOSACKA, M. et al.; (2024)]
990	Mo=O	[HIRATA, T. (1989); TSILOMELEKIS, G.; BOGHOSIAN, S. (2010)]
1261	O=P	[AMIEZATUL AMIRULSYAFIEE et al., (2022); LIU, H. S.; CHIN, T. S.; YUNG, S. W. (1997)]
1675	H-O-H	[UYI SULAEMAN et al., (2022)]
3400	O-H	[AMIEZATUL AMIRULSYAFIEE et al., (2022); DHANABAL, R.; VELMATHI, S.; BOSE, A. C. (2016)]

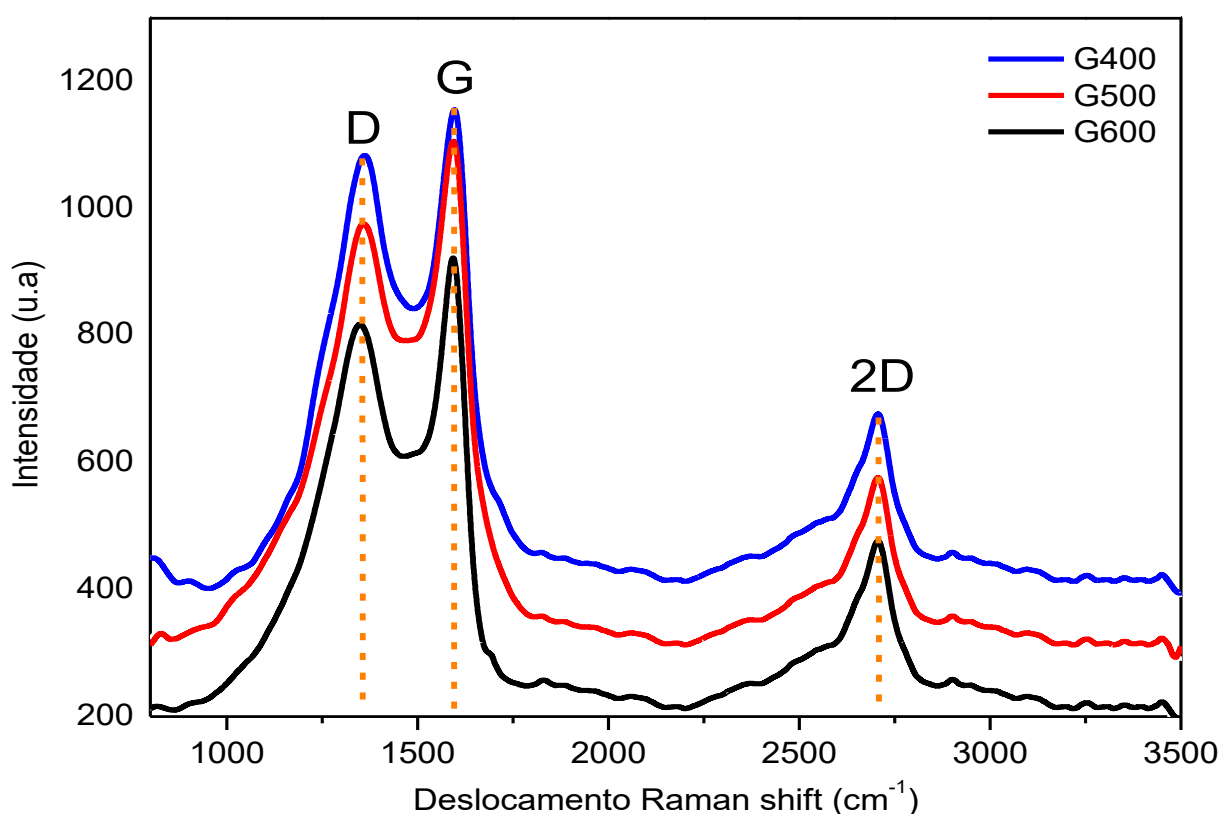
10.1.4 Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman é capaz de mostrar a simetria das ligações carbono-carbono e informações sobre a natureza da estrutura de carbono dessas moléculas. A principal característica que é possível verificar em materiais à base de grafite e Grafeno referentes as bandas D, G e 2D. A banda G situada em torno de 1580 cm^{-1} corresponde a ligações entre átomos de carbono do tipo sp^2 e evidenciam a presença de grafite no material. Por outro lado, uma banda tipo D situada na região de 1350 cm^{-1} está relacionada com os defeitos da estrutura cristalina do carbono. Uma terceira banda com característica particular é a 2D localizada na região em torno de 2690 cm^{-1} .

¹, que se refere ao aparecimento de Grafeno (Tuinstra; Koenig, 1970; Ferrari; Robertson, 2000).

Com o intuito de verificar a formação de Grafeno a partir do epicarpo de coco babaçu (*Attalea speciosa*), bem como a influência da temperatura na sua formação, são apresentados três espectros Raman para a síntese do Grafeno a temperaturas de 400, 500 e 600°C, onde é possível verificar curvas características da banda 2D que representa o Grafeno, tendo em vista que para uma temperatura de 400°C, com um pico de mais intensidade associado a uma estrutura mais cristalina (Figura 19).

Figura 19 - Espectros Raman para o Grafeno sintetizado a diferentes temperaturas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Para materiais carbonáceos, como o Grafeno, é importante destacar o nível de desordem na estrutura cristalina, e diante disso se percebe na Figura 19 que para as três diferentes temperaturas estudadas na formação do Grafeno, o material que mais se destaca com menor grau de desordem, permitindo assim um melhor arranjo cristalino, é o perfil G400, que foi sintetizado a uma temperatura de 400°C, e que permite um entendimento de que uma temperatura mais amena favorece uma melhor formação do Grafeno oriundo da matriz vegetal, utilizada neste trabalho. Dessa forma

se nota que os perfis de G500 e G600 devem apresentar um maior grau de desordem referente ao carbono amorfo da estrutura.

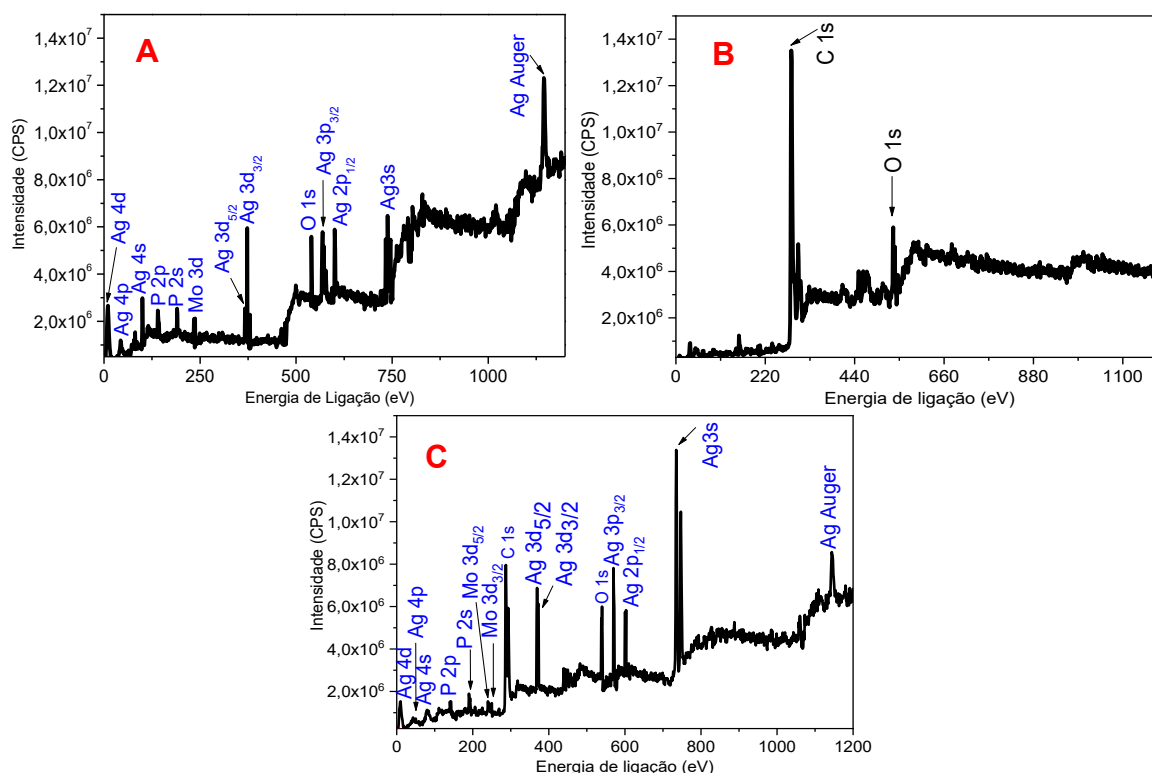
10.1.5 Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios X (XPS)

Em um experimento de XPS se destaca o número de fotoelétrons que são emitidos em função da sua energia cinética, porém, o espectro é normalmente apresentado como o número de contagens em função da energia de ligação (obtida pela Equação 18).

$$E_k = h\nu - E_b - \phi_a \quad (18)$$

Um espectro típico de XPS é mostrado na Figura 20 para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$, Grafeno e para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$ de modo que os picos presentes em um espectro de XPS são denominados de acordo com o número quântico do nível de origem do fotoelêtron, bem como o estado químico presente na superfície.

Figura 20 - Espectro exploratório de uma amostra do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na Figura 20a é possível perceber a presença de Ag, Mo, P e O na composição do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$, onde é possível verificar a presença de dois picos individuais com energias de ligação de 368 eV e 374 eV, podendo ser atribuídos à Ag ($3d_{5/2}$) e Ag ($5d_{3/2}$), respectivamente, correspondentes ao Ag_2MoO_4 . Além disso, foram observados dois picos distintos com energias de ligação de 232 eV e 235 eV correspondentes ao Mo $3d_{5/2}$ e Mo $3d_{3/2}$ confirmando a formação da fase Ag_2MoO_4 .

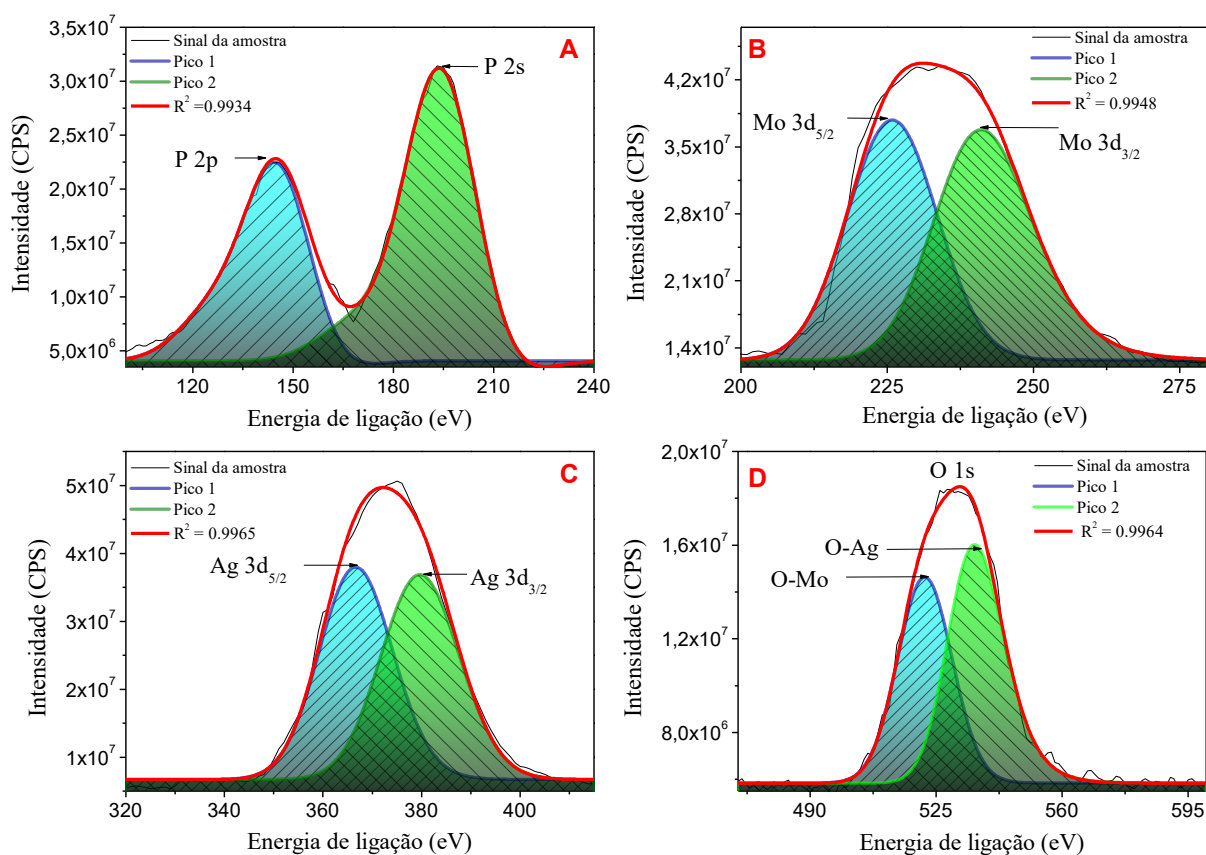
Na Figura 20 - Espectro exploratório de uma amostra do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.b é possível observar o espectro exploratório para a amostra de Grafeno, onde se destacam dois picos característicos, o de carbono (C 1s) e o de oxigênio (O 1s).

O espectro mostrado na Figura 20c para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$, apresenta os átomos de constituição do semiconductor, bem característicos, com intensidades similares às mostradas na Figura 20a, apontando a presença de Ag, Mo, O e P, juntamente com a presença de C 1s e O 1s evidenciando a ligação com o Grafeno.

Os espectros de varredura confirmam os níveis de Ag 3d, Mo 3d, O 1s, P 2p e P 2s, ao serem ajustados usando o método de ajuste gaussiano (Figura 21). Para o fósforo é evidente o pico P 2p localizado em uma energia de ligação de 133 eV e o pico P 2s que são devidos ao P^{5+} em PO_4^{3-} (Figura 21a).

Os principais picos de energia de ligação do átomo de molibdênio apresentados são $3d_{5/2}$ e Mo $3d_{3/2}$ e são separados por cerca de 3 eV, sendo pertencentes ao estado de oxidação Mo^{6+} conforme representado (Figura 21b). Os picos de alta intensidade na faixa de 530 a 533 eV mostram a presença do nível central de oxigênio 1s pertencentes ao molibdato de prata (Figura 21d). Dessa forma, os resultados mostrados nos espectros confirmam as valências de Ag (+ 1), Mo (+ 6) e O (- 2), que mostra indícios de uma boa estrutura do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

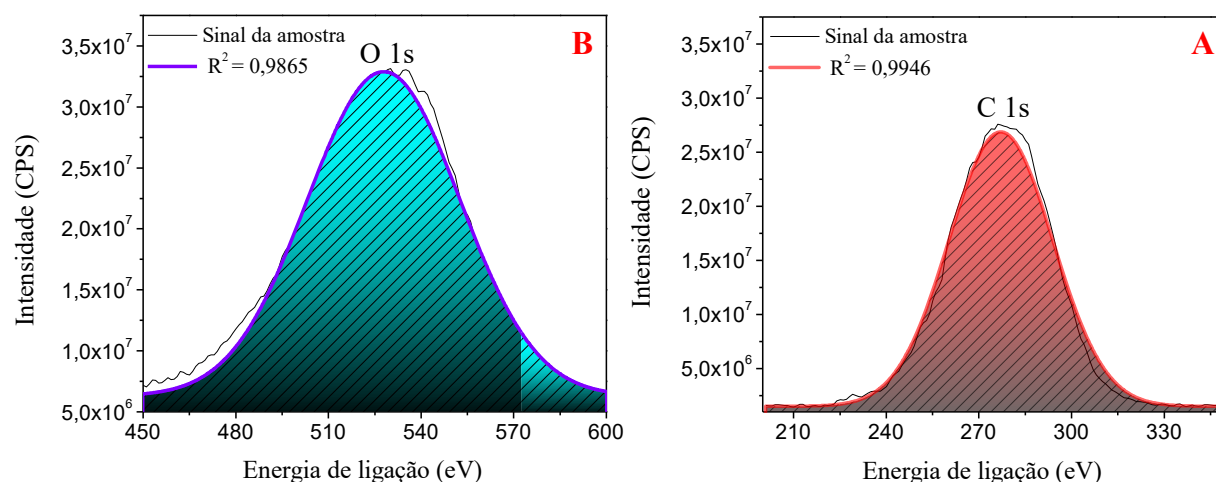
Figura 21 - Espectro exploratório dos átomos P, Mo, Ag e O do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$. ajustado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

É possível observar na Figura 22 os espectros referentes aos átomos de carbono (C 1s) e de oxigênio (O 1s) que após a deconvolução com o ajuste gaussiano picos característicos do tipo do tipo sp^2 e sp^3 para o aparecimento de C 1s em torno de 285 eV. O surgimento do pico de oxigênio mais acentuado pode ser atribuído pela ação da atmosfera da mufla durante a formação do Grafeno durante o processo de síntese.

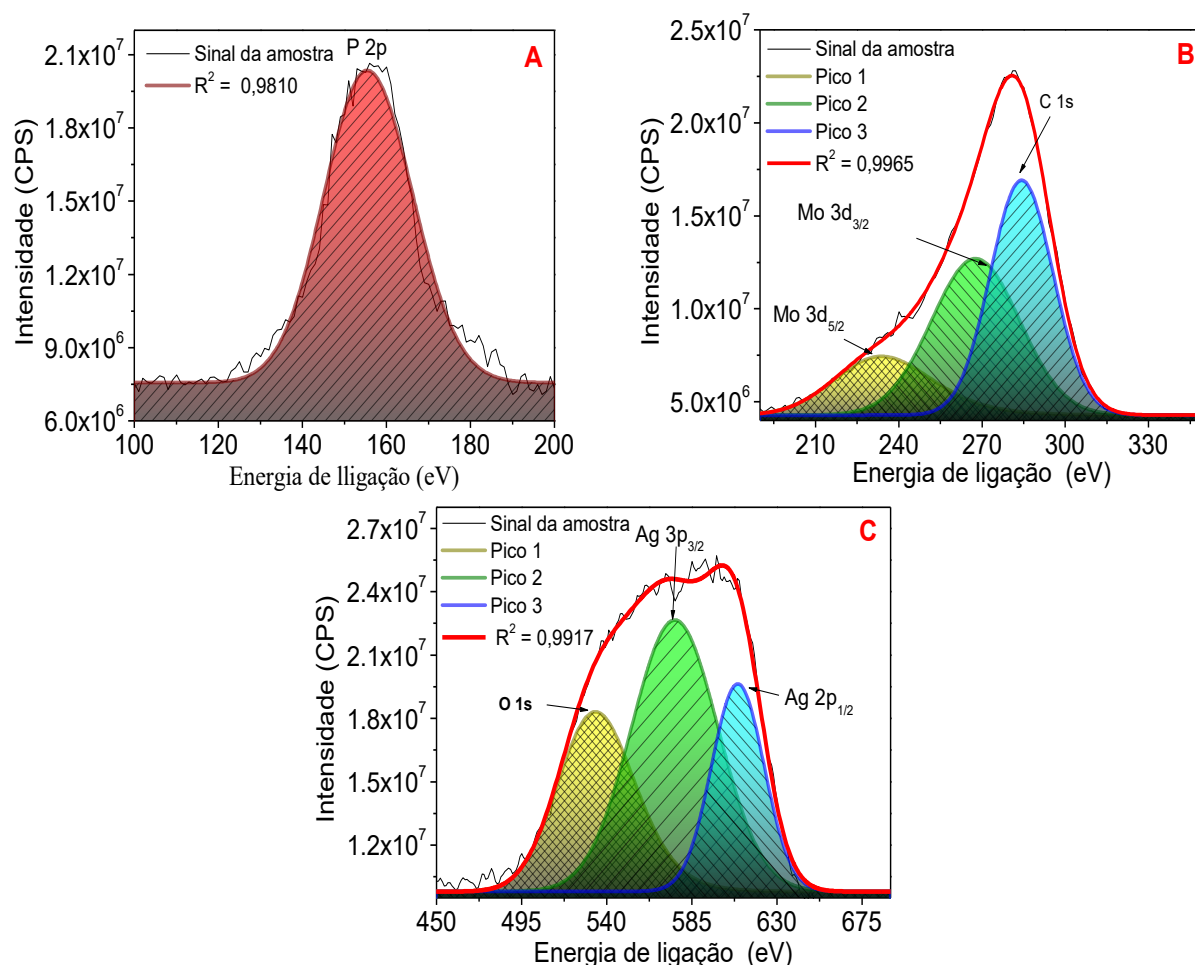
Figura 22 - Espectro exploratório dos átomos C, O e para uma amostra de Grafeno ajustados por deconvolução.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na Figura 23a, é possível notar que após deconvolução dos picos, o átomo de P (2p) em torno de 133 eV. O átomo de molibdênio Mo (3d) (Figura 23b) fica notório ao lado do pico de carbono C (1s) com energias de ligação de 240 eV e 246 eV para Mo 3d_{5/2} e Mo 3d_{3/2} respectivamente, bem como 285 eV para o constituinte do Grafeno.

Figura 23 – Curvas de deconvolução para os átomos de P, Mo, Ag, C e O do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$.

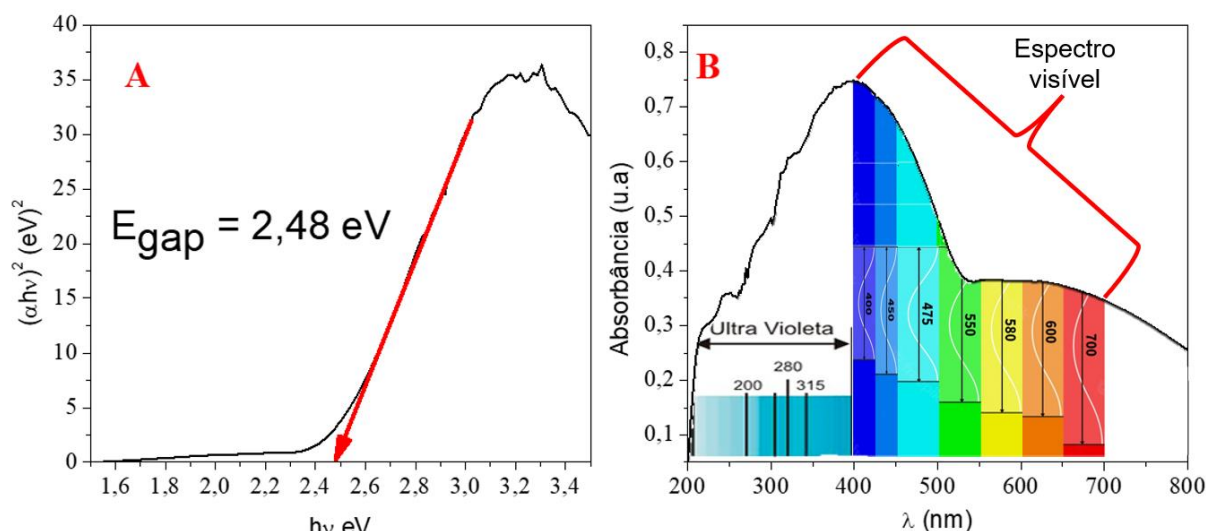


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

15.1.6 Espectroscopia de Refletância Difusa do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

Os resultados de absorvância e o plot de Tauc para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ estão apresentados na Figura 24, onde é possível observar que o mesmo é capaz de absorver luz na faixa espectral da região visível, bem como da região do ultravioleta (Figura 24b). A luz é uma parte importante da fotocatalise, pois quanto o material pode absorver, reflete diretamente na sua atividade fotocatalítica. Dessa forma, o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ com capacidade de absorção em ampla faixa espectral, supera materiais como o TiO_2 puro, relatado por Tasisa *et al.*, (2024) e Araújo *et al.*, (2017).

Figura 24 - Espectro de absorbância (a) e plote de Tauc (b) para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

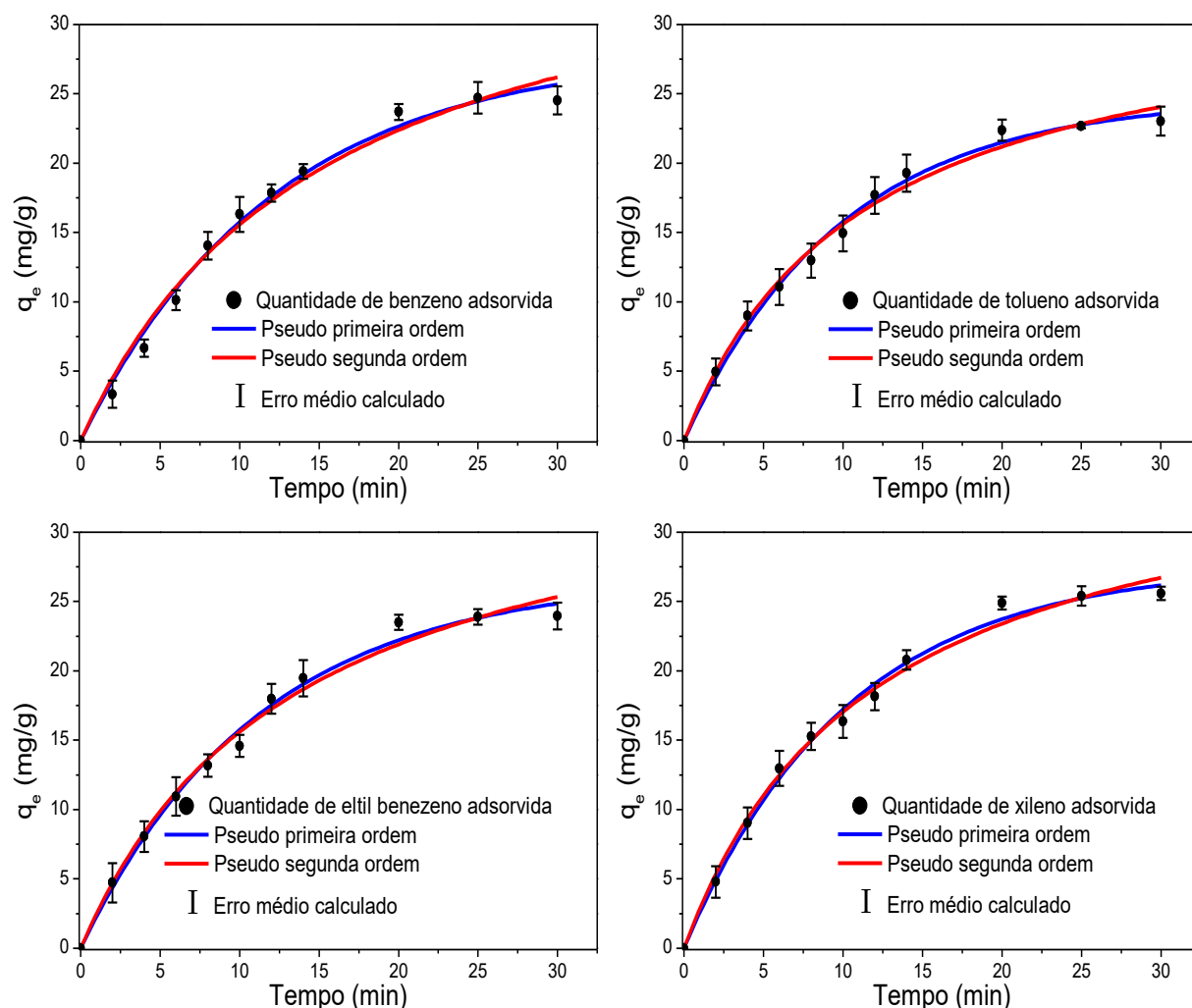
Os resultados de refletância difusa foram utilizados para a determinação da energia de bandgap, onde foi calculado $(\alpha h\nu)^2$, Equação 9, plotado pela energia do fóton ($h\nu$), como mostrado na Figura 24 - Espectro de absorbância (a) e plote de Tauc (b) para o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

De acordo com o plote de Tauc a energia de bandgap encontrada tem valor de 2,48 eV. De forma que esse valor está de acordo com obtido para materiais semicondutores, cuja ativação se dá por meio de luz visível, que varia dependendo da aplicação, mas geralmente está entre 1,0 eV e 2,5 eV (Marques; Stumbo; Canela, 2017; Khatun; Mitra; Mukherjee, 2023; Tasisa *et al.*, 2024).

16. CINÉTICA E EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO DE BTEX SOBRE $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

O desenvolvimento da cinética de adsorção de BTEX em solução aquosa (50 mg/L) sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ é mostrada na Figura 25, para um tempo de 30 min e teve o modelo de pseudo-primeira ordem com melhor ajuste aos dados experimentais para o BTEX. De modo que os dados cinéticos, Tabela 3, corroboram a tendência para o ajuste do modelo de pseudo-primeira ordem, o que é observado em trabalhos publicados e que está em acordo com o esperado para o material (Foggi, C. C. *et al.*, 2020; Tang, H. *et al.*, 2017).

Figura 25 - Cinética de adsorção de BTEX sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ ($[\text{BTEX}] = 50 \text{ mg/L}$; $\text{pH} = 6.0$; $T = 25.0 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Em relação aos dados apresentados na Tabela 3, o parâmetro cinético q_e , apresenta valores experimentais entre 23 mg/g a 25 mg/g de BTEX adsorvidos sobre a superfície do catalisador, de um total de 50 mg/L no início da reação. De modo que o modelo de pseudo-primeira ordem apresentou valores mais próximos dos dados experimentais, bem como constantes cinéticas de velocidade que apontam para um processo mais rápido, o que corrobora a ideia do melhor ajuste por parte do modelo cinético.

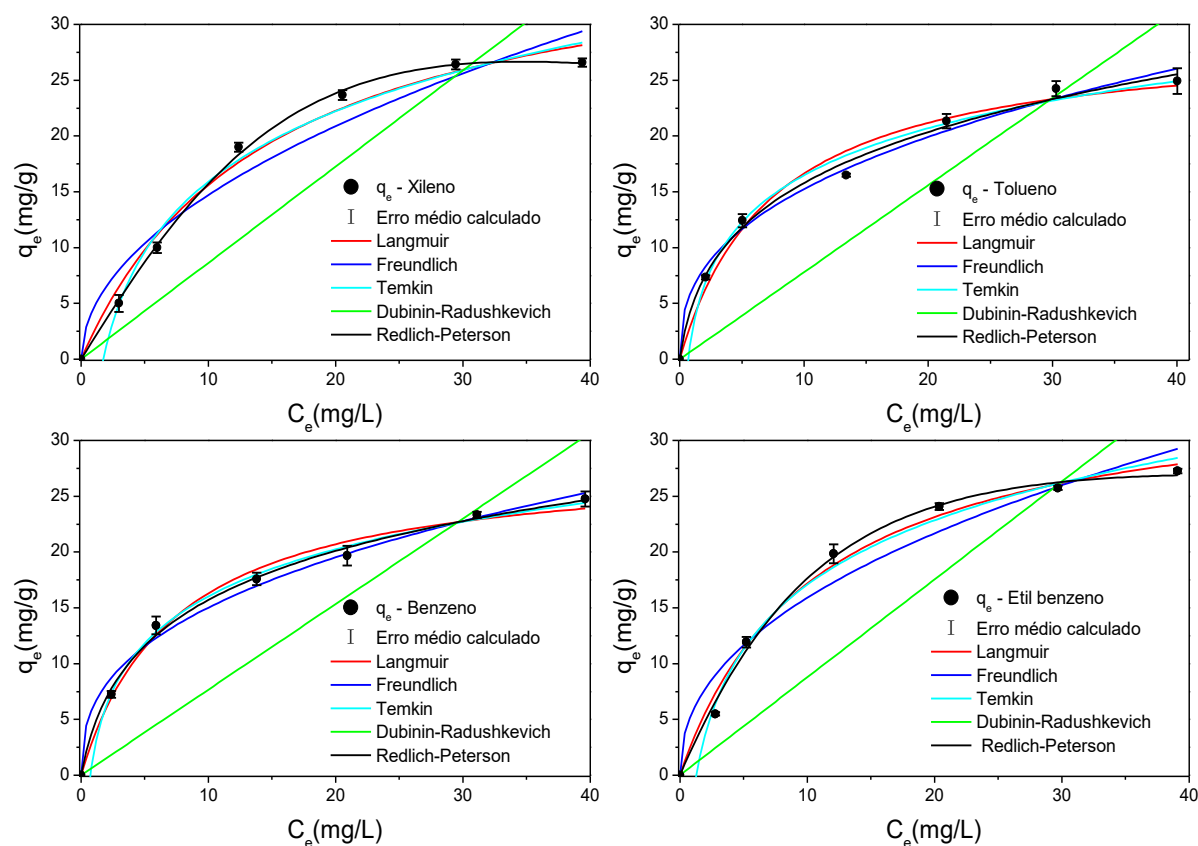
Tabela 3 - Parâmetros dos modelos cinéticos.

Poluente	Parâmetros	Pseudo-primeira ordem	Pseudo-segunda ordem	Experimental
Benzeno	k_1 (min^{-1})	0,08259	0,00161	25,590
	q_e (mg/g)	28,0316	39,8254	
	r^2	0,9908	0,98429	
Tolueno	k_1 (min^{-1})	0,10182	0,00271	23,036
	q_e (mg/g)	24,7109	33,0269	
	r^2	0,99339	0,99033	
Etilbenzeno	k_1 (min^{-1})	0,08921	0,00199	23,949
	q_e (mg/g)	26,6891	36,8304	
	r^2	0,99229	0,98813	
Xileno	k_1 (min^{-1})	0,09758	0,00225	24,524
	q_e (mg/g)	27,6560	37,3292	
	r^2	0,99394	0,99169	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As isotermas de adsorção foram realizadas a uma concentração inicial de 50 mg/L em 30 minutos, cujos resultados foram aplicados aos modelos de adsorção conhecidos, onde se destacou o modelo de Redlich-Peterson como o que fornece melhor ajuste aos dados experimentais para o BTEX.

Figura 26 - Isoterma de adsorção para o BTEX sob pH 6 e temperatura ambiente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Como pode ser notado pela Tabela 4, onde o valor da constante de velocidade é superior às obtidas pelos ajustes dos demais modelos, assim como r^2 como um valor médio de 0,99 para todos os compostos orgânicos estudados. Essa ideia é corroborada pela Figura 26 que mostra os ajustes realizados, com o de Redlich-Peterson como o modelo que mais representa às reações para as condições escolhidas, sendo o mesmo um melhoramento dos modelos clássicos de Langmuir e de Freundlich, ajustando melhor à reação tanto a baixas como altas concentrações levando em consideração os parâmetros usados nos dois modelos clássicos (Foggi, C. C. *et al.*, 2020; Borges, S. S. *et al.*, 2016; Balasurya, S. *et al.*, 2023).

Tabela 4 - Parâmetros de equilíbrio resultante dos ajustes aos diferentes modelos de equilíbrio.

Modelo	Parâmetros	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xileno
Langmuir	k_1 (L/mg)	0,06757	0,1334	0,09383	0,06757
	q_m (mg/g)	38,7192	29,11526	35,46547	38,7192
	r^2	0,98336	0,9829	0,98993	0,98336
Freundlich	$k_f ((L/mg)^{1/n})$	4,60229	6,27	5,67806	4,60229
	n	1,98106	2,5921	2,23648	1,98106
	r^2	0,94361	0,9895	0,9514	0,94361
Temkin	k_T (L/mg)	0,57533	1,5034	0,77427	0,57533
	B (mg/g)	9,09467	6,08228	8,33866	9,09467
	r^2	0,98625	0,98976	0,99096	0,98625
Dubinin-Radushkevich	k_{D-R} (mol ² /kJ ²)	0,3617	0,49838	0,3617	0,38378
	q_s (mg/g)	0,3617	0,49838	0,3617	0,38378
	r^2	0,58426	0,52897	0,58426	0,67658
Redlich-Peterson	k_{R-P} (L/mg)	2,56065	8,79949	2,56065	1,82167
	a (L/mg)	0,02185	0,82737	0,02185	0,00298
	β	1,3164	0,74226	1,3164	1,72907
	r^2	0,99523	0,99102	0,99523	0,99829

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Sabendo que a capacidade de adsorção é vista na literatura como um ponto fundamental para explicar a atividade fotocatalítica aumentada de diversos materiais semicondutores (Wang *et al.*, 2017c). O $Ag_2MoO_4/Ag_3PO_4(s)$ mostrou que tem capacidade superior a apresentada pelo dióxido de titânio (0,31 mg/g), que é um catalisador comercial (Chen; Ray, 1999).

17. AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA SOBRE BTEX

A Figura 27 mostra os resultados de fotólise, com o uso de luz ultravioleta (UV-A - 315 a 400 nm) e visível (445 nm a 480 nm), bem como de fotodegradação com o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_{4(s)}$ e $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$, realizados em 60 min.

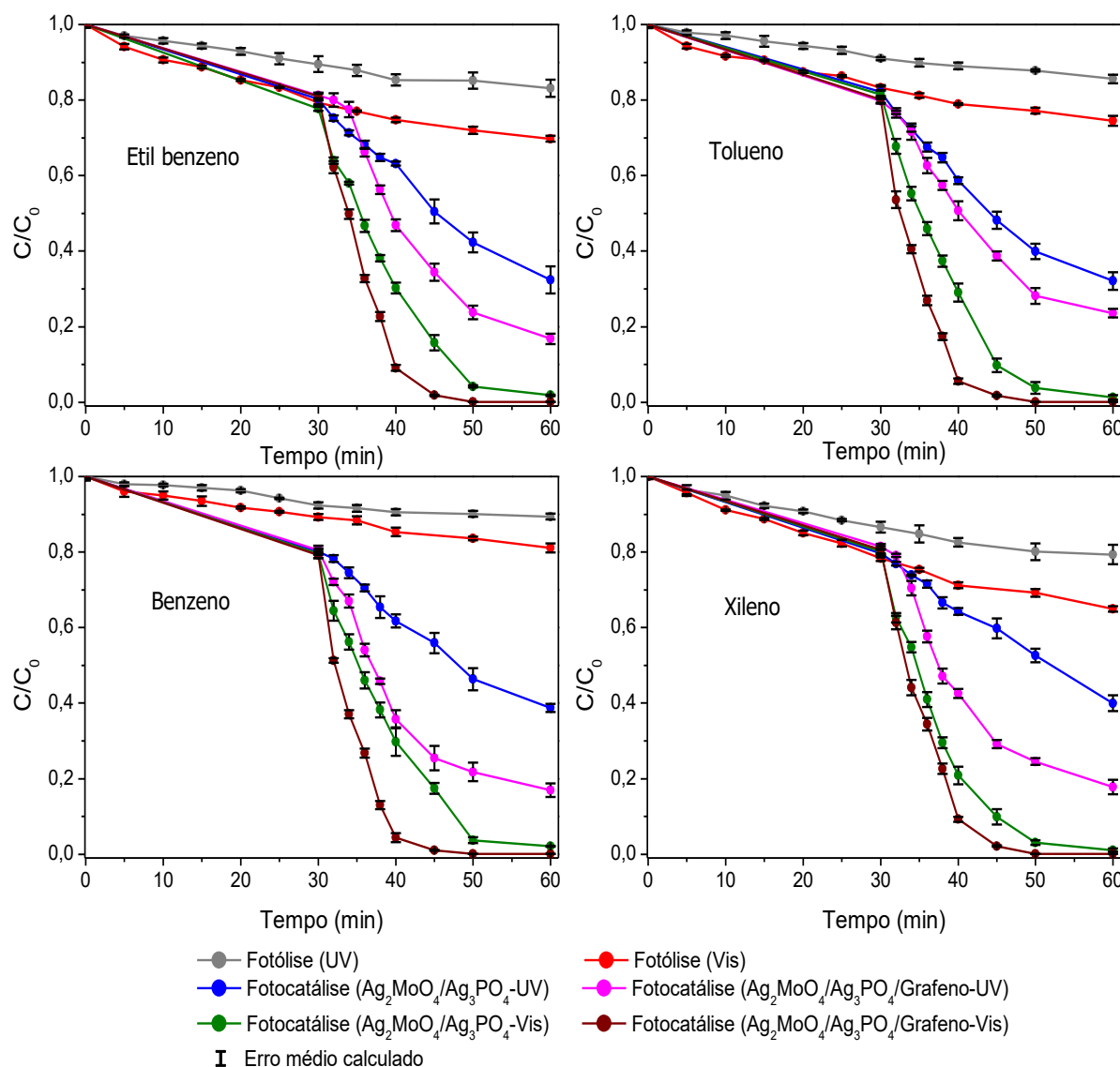
A fotodegradação de BTEX foi realizada em duas etapas de 30 min, consecutivas. Onde na primeira metade do tempo foi executada a etapa de adsorção e na segunda metade com o uso do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_{4(s)}$ e $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$ fotoativados, em reações diferentes, sob luz visível e ultravioleta (UV).

É notório que a primeira etapa realizada de reação teve sua importância, tendo em vista ser necessária a adsorção do poluente na superfície para a fotodegradação. E como mostrado nos ensaios de cinética de adsorção, a capacidade do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_{4(s)}$ variou entre 23 mg/g a 25 mg/g de BTEX, o que justifica a segunda etapa, para a fotodegradação da concentração em meio líquido.

Os resultados de fotólise, apresentados na Figura 27, foram realizados primeiro apenas com a ação da luz UV. Onde ficou evidente que a mesma tem potencial de fotodegradação para compostos de origem orgânica (Marmitt, S.; Pirotta, L. V.; Stülp, S. 2010; Tasisa, E. Y. et al. 2024). Porém sob luz visível com o uso de fibra ótica, se obteve maior destaque, com 20% de degradação dos poluentes a mais do que apenas com a aplicação de luz UV, e que está de acordo com o esperado, tendo em vista que a aplicação da fibra ótica como meio de melhor espalhar a luz no meio líquido e proporciona maior contato dos fótons com o BTEX, o que possivelmente levou a melhores resultados de fotodegradação.

Para os resultados de fotocatalise com o uso do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_{4(s)}$, tendo em vista a capacidade de absorção de luz UV e visível, Figura 24. É importante destacar que o material sintetizado apresentou resultados promissores para ambos os espectros. Porém, é notório que a aplicação da fibra ótica como modo de espalhamento da luz no meio reacional proporcionou uma maior exposição dos fótons com a superfície do material sintetizado, que permitiu sua ativação de modo mais eficiente em relação a luz UV, tendo em vista a fibra ótica imersa no meio reacional. A luz UV, por outro lado, foi aplicada separadamente, em outra reação e posicionada sem contato direto com o meio líquido, que não proporciona uma iluminação tão eficiente como a citada anteriormente.

Figura 27 - Fotodegradação de BTEX com o uso de luz visível e ultravioleta.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O processo de fotodegradação realizado com o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_{4(s)}/\text{Grafeno}$, mostrou-se mais eficiente com o uso de luz visível, de modo que após 60 minutos se obteve a redução da concentração de BTEX ao aceitável para o Ministério da Saúde, com 0,3 mg/L, 0,2 mg/L, 0,2 mg/L e 0,08 mg/L. O que evidencia que a combinação da luz visível com a fibra ótica, para iluminação do meio e fotoativação do material, apresenta potencial notório na degradação de BTEX. De modo que a implementação de fibra ótica na aplicação do processo fotocatalítico sob luz visível merece destaque, pela possibilidade de iluminação mais eficiente ao meio e ativação do $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_{4(s)}/\text{Grafeno}$. Com a aplicação do material sólido, $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_{4(s)}$, notou-se uma boa capacidade de degradação. Porém o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_{4(s)}/\text{Grafeno}$

mostrou resultado superior de degradação, de modo que com o uso de luz visível canalizada por meio de fibra ótica, alcançou-se em menor tempo, a redução da concentração a menos de 1% do BTEX no fim da reação.

Assim, pode-se verificar o $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ com estrutura em forma de coral e evidências de fosfato, relatado como pequenas esferas e o Grafeno que apresentou morfologia semelhante aos resultados reportados na literatura (Safartoobi; Mazloom; Ghodsi, 2023; De *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017a), com as principais fases cristalinas identificadas e correspondentes aos padrões encontrados nos arquivos JCPDS (Huo *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017a, Wang *et al.*, 2017c, e Ng; Fan, 2015), com ligações O=P-O, P-O e P-O-P para a parte do grupo fosfato. Por outro lado, as ligações que representam o molibdato de prata se evidenciaram com o alongamento Mo-Mo, O-Mo-O, e M=O e O-Mo-O que respaldam a síntese realizada com sucesso, caracterizadas por FTIR, bem como os estados de ionização mostrados através dos dados de XPS, bem como para o Raman que possibilitou a verificação da melhor temperatura de síntese para o Grafeno tendo em vista a cristalinidade mais acentuada. E com os resultados apresentados para a fotodegradação, é importante ressaltar o uso da luz visível com fibra ótica imerso direto no meio líquido reacional, com resultados de degradação melhores em relação aos apresentados com o uso de luz ultravioleta na degradação de BTEX.

18. CONCLUSÕES

Os compósitos $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ e $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$ foram sintetizados com êxito e caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de dispersão de energia (EDS), difração de raios X (DRX), espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS) e espectroscopia de refletância difusa (ERD). As micrografias obtidas por MEV revelaram uma morfologia heterogênea, compatível com descrições previamente reportadas na literatura. A análise por DRX evidenciou a presença das fases tetragonal e cúbica do Ag_2MoO_4 , que são comumente associadas a elevado desempenho fotocatalítico, apresentando cristalinidade semelhante aos padrões previamente descritos.

As bandas características identificadas por FTIR, bem como os estados de oxidação determinados por XPS, corroboraram a composição química dos materiais. Adicionalmente, a análise por ERD indicou que o compósito $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$ possui capacidade de absorção na região do visível, sugerindo viabilidade para aplicações em processos fotocatalíticos sob irradiação de luz visível.

A síntese do grafeno foi realizada com sucesso a partir do epicarpo do coco babaçu (*Attalea speciosa*), sendo confirmada por meio das técnicas de MEV, espectroscopia Raman e XPS, que indicaram, respectivamente, morfologia compatível, estrutura cristalina e estados eletrônicos coerentes com o material alvo e em conformidade com a literatura especializada.

A incorporação do grafeno ao compósito resultou em desempenho aprimorado nos testes de fotodegradação, demonstrando sua relevância funcional no sistema reacional. A avaliação da atividade fotocatalítica revelou que o sistema $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$ é eficaz na degradação de compostos do tipo BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), promovendo redução significativa na concentração dos poluentes em aproximadamente 60 minutos de exposição à luz visível.

Os ensaios fotocatalíticos evidenciaram que o reator desenvolvido para este estudo operou de maneira eficaz, sendo fundamental para a obtenção dos resultados observados. Destaca-se, nesse contexto, a aplicação de fibra óptica

imersa no meio reacional, o que potencializou a eficiência do sistema sob iluminação visível. Como resultado, foi possível reduzir as concentrações de BTEX a níveis compatíveis com os limites estabelecidos pelo Ministério da Saúde.

Dessa forma, o presente estudo demonstrou que o compósito $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$, quando aplicado em um reator fotocatalítico sob irradiação de luz visível com suporte de fibra óptica, apresenta considerável potencial para aplicações ambientais, especialmente na descontaminação de efluentes contendo compostos orgânicos voláteis como o BTEX.

19. REFERÊNCIAS

ABDUL-WAHID, I. K. *et al.* Enhanced synergistic photocatalytic degradation of oxytetracycline antibiotic using novel $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Co}$ -zeolitic imidazolate framework (ZIF-67) Z-type heterojunction. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 156, p. 111277–111277, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111277>.

ABOU-GAMRA, Z. M.; AHMED, M. A. TiO_2 Nanoparticles for Removal of Malachite Green Dye from Waste Water. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 05, n. 03, p. 373–388, 2015. [10.4236/aces.2015.53039](https://doi.org/10.4236/aces.2015.53039).

ABD-ELRAHIM, A.G.; CHUN, D. One-step mechanical exfoliation and deposition of layered materials (graphite, MoS_2 , and BN) by vacuum-kinetic spray process. **Vacuum**, v. 196, p. 110732–110732, 1 fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110732>.

ALMEIDA JR, Eduardo Bezerra de. *et al.* In: MACIEL, Adeilton Pereira (org.). **Biocombustíveis de Babaçu**: Ensaio técnico sobre oportunidades de produção de Biocombustíveis a partir do Coco Babaçu. São Luís: EDUFMA, 2016. p. 41-60.

AHMED, S. *et al.* Heterogeneous photocatalytic degradation of phenols in wastewater: A review on current status and developments. **Desalination**, v. 261, n. 1-2, p. 3–18, out. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.062>.

AMMAR, S. H. *et al.* Facile assembly of $\text{CoS}/\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ nanohybrids for visible light-promoted Z-type-induced synergistically improved photocatalytic degradation of antibiotics. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 444, p. 115000–115000, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.115000>.

AMIEZATUL AMIRULSYAFIEE *et al.* Visible light active La-doped Ag_3PO_4 for photocatalytic degradation of dyes and reduction of Cr(VI) . **Solid State Sciences**, v. 131, p. 106950–106950, 1 set. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2022.106950>.

ANAND. G *et al.* Synthesis, spectroscopic elucidation (FT-IR, FT-Raman, UV-vis), quantum chemical computation (PES, FMO, HOMO–LUMO, MEP, NLO, Hirshfeld) and molecular docking studies on 2-thiophenecarboxamide crystal. **Journal of Molecular Structure**, v. 1286, p. 135586–135586, 1 ago. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135586>.

AL-RASHEEDI, A. *et al.* Photocatalysis activity of ZnO nanorods arrays prepared via hydrothermal. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 158, p. 111568–111568, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111568>.

APPONI, A. *et al.* Transmission through graphene of electrons in the 30 – 900 eV range. **Carbon**, v. 216, p. 118502–118502, 1 jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118502>.

ARAÚJO, D. S. et al. Avaliação da fotoluminescência do TiO₂ sintetizado pelo método Pechini. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, p. 350–360, set. 2017. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633672104>.

AUGUGLIARO, V. et al. Overview on oxidation mechanisms of organic compounds by TiO₂ in heterogeneous photocatalysis. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, v. 13, n. 3, p. 224–245, set. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.04.003>.

AYDIN, D. C. et al. Indene, indane and naphthalene in a mixture with BTEX affect aerobic compound biodegradation kinetics and indigenous microbial community development. **Chemosphere**, v. 340, p. 139761, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139761>.

BELTRÁN, A.; GRACIA, L.; LONGO, E.; ANDRÉS, J. First-Principles Study of Pressure-Induced Phase Transitions and Electronic Properties of Ag₂MoO₄. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 118, n. 7, p. 3724–3732, 10 fev. 2014. <https://doi.org/10.1021/jp4118024>.

BALASURYA, S. et al. Elucidation of photocatalysis, photoluminescence and antibacterial studies of Ag₂MoO₄ decorated NiMoO₄ nano-heterostructure. **Optical Materials**, v. 113, p. 110856, mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.110856>.

BALASURYA, S. et al. CaMoO₄ modified nanorods-branched Ag₂MoO₄ a nano-diatomic heterojunction as efficient visible-light-driven photocatalysts for water remediation processes and antimicrobial applications. **Materials Today Communications**, v. 34, p. 104945–104945, 1 mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104945>.

BORGES, S. S. et al. Immobilized titanium dioxide (TiO₂) in different support materials to use in heterogeneous photocatalysis. **Química Nova**, 2016. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160106>.

BOURZAMI, R. et al. Effect of high rGO ratio on structural properties, photoluminescence and adsorptive & photocatalytic performances under 365 nm-UV and simulated solar light of NaTaO₃/rGO heterojunction composites. **Diamond and Related Materials**, v. 125, p. 109022–109022, 1 maio 2022. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109022>.

BOSACKA, M. et al. The reactivity of CeO₂ towards MoO₃ in air atmosphere – reinvestigation. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 27 abr. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13170-z>.

BRASIL, Resolução CONAMA n°357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicado no Diário Oficial da União, Seção 1, de 18 de março de 2005.

BRASIL, Resolução CONAMA nº420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Publicado no Diário Oficial da União, nº 249, de 30/ de dezembro de 2009, pág. 81-84.

BRASIL, Resolução CONAMA nº430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Publicado no Diário Oficial da União, Seção 1, de 16 de maio de 2011, p. 89.

BRASIL. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde.

CAO, W. *et al.* Visible-light-driven $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ composites with enhanced photocatalytic activity. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 701, p. 350–357, 1 abr. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.436>.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-ray Diffraction**. [s.l.] Pearson, 2001.

CHANG, F. *et al.* Jointly augmented photocatalytic No removal by S-scheme $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}/\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ heterojunctions with surface oxygen vacancies. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 649, p. 713–723, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.168>.

CHAVES *et al.* Babassu Coconut Fibers: Investigation of Chemical and Surface Properties (*Attalea speciosa*). **Polymers**, v. 15, n. 19, p. 3863–3863, 23 set. 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15193863>

CHEN, L. *et al.* Photocatalytic degradation of ethylene in cold storage using the nanocomposite photocatalyst $\text{MIL101}(\text{Fe})\text{-TiO}_2\text{-rGO}$. **Chemical Engineering Journal**, v. 424, p. 130407–130407, 1 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130407>.

CHEN, W. *et al.* A flexible composite film electrode and supercapacitor based on combined effect between graphene oxide and graphene. **Materials Science And Engineering: B**, v. 297, p. 116724–116724, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116724>.

CHINNASAMY. C. *et al.* Recent advancements in MXene-based nanocomposites as photocatalysts for hazardous pollutant degradation - A review. **Environmental Research**, v. 233, p. 116459–116459, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116459>.

CEMATBIO-UFMA – Site CeMatBio. Disponível em: <<https://www.cematbio.ufma.br>>. Acesso em: 7 maio. 2025.

CORPORATION, H. **H.-T. Backnumber**. Disponível em: <https://www.hitachi-hightech.com/global/en/news/backnumber.html> . Acesso em: 1 dez. 2023.

DE, A. *et al.* Well-designed β - Ag_2MoO_4 crystals with photocatalytic and antibacterial activity. **Materials & Design**, v. 115, p. 73–81, 1 fev. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.032>.

DELLA ROCCA, D. G. *et al.* Peroxidation and photo-peroxidation of pantoprazole in aqueous solution using silver molybdate as catalyst. **Chemosphere**, v. 262, p. 127671, jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127671>.

DHANABAL, R.; VELMATHI, S.; BOSE, A. C. High-efficiency new visible light-driven Ag_2MoO_4 – Ag_3PO_4 composite photocatalyst towards degradation of industrial dyes. **Catalysis Science & Technology**, v. 6, n. 24, p. 8449–8463, 2016. <https://doi.org/10.1039/C6CY01342B>.

EL MASAUDI, H. *et al.* Enhanced visible light photocatalytic activity of Cu^{2+} -doped Ag_3PO_4 nanoparticles. **Chemical Physics**, v. 545, p. 111133, maio 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18195>.

EBRAHIMI, V. *et al.* Exposure assessment to BTEX in the air of nail salons in Tehran city, Iran. **Heliyon**, v. 9, n. 7, p. e18195–e18195, 1 jul. 2023.

EMMANUEL, S. S. *et al.* Emerging nanosemiconductors for photocatalytic degradation of mono-aromatic volatile organic compounds (BTEX): A pragmatic review. **Journal of Organometallic Chemistry**, v. 996, p. 122767–122767, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jorgchem.2023.122767>.

Espectrofotômetros FTIR. Disponível em: <https://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/espectroscopia-molecular/ftir/espectrofotometro-ftir/index.html> . Acesso em: 1 dez. 2023.

FABBRO, M. T.; *et al.* Synthesis, antifungal evaluation and optical properties of silver molybdate microcrystals in different solvents: a combined experimental and theoretical study. **Dalton Transactions**, v. 45, p. 10736–10743, 2016. <https://doi.org/10.1039/C6DT00343E>.

FAN, G. *et al.* Enhanced inactivation of *Microcystis aeruginosa* by heterogeneous interfacial $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{TACN}$ under visible light. **Journal of Water Process Engineering**, v. 56, p. 104333–104333, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104333>.

FENG, C. *et al.* The photocatalytic phenol degradation mechanism of Ag-modified ZnO nanorods. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 8, n. 9, p. 3000–3009, 1 jan. 2020. <https://doi.org/10.1039/C9TC05010H>.

FERRARI, A. C.; ROBERTSON, J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Phys. Rev. B*, v. 61, p. 14095–14107, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>.

FOGGI, C. C. *et al.* Unveiling the role of β - Ag_2MoO_4 microcrystals to the improvement of antibacterial activity. **Materials Science and Engineering: C**, v. 111, p. 110765–110765, 1 jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110765>.

FRAZÃO, R. H. N. *et al.* Plastic optical fibres applied on the photocatalytic degradation of phenol with Ag_2MoO_4 and $\beta\text{-Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ under visible light. **Environmental Technology**, v. 42, n. 8, p. 1271–1282, 16 set. 2019. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1663939>.

FUJISHIMA, A.; HONDA, K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. **Nature**, v. 238, n. 5358, p. 37–38, jul. 1972. <https://doi.org/10.1038/238037a0>.

GHOSH, B. *et al.* Study on spatiotemporal distribution and health risk assessment of BTEX in urban ambient air of Kolkata and Howrah, West Bengal, India: Evaluation of carcinogenic, non-carcinogenic and additional leukaemia cases. **Atmospheric Pollution Research**, v. 14, n. 10, p. 101878–101878, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101878>.

GUAN, X. *et al.* Graphene Interleaved SiO_x/C Spheres Via Molecular Polymerization as High-Stability Lithium-ion Battery Anodes. **Electrochimica Acta**, p. 143247–143247, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143247>.

HAN, Y.; XU, J.; ZHU, L. Predicting soil concentrations and remediation target values of BTEX by an off-gas based mass transfer model. **Science of The Total Environment**, v. 900, p. 165731–165731, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165731>.

HE, J.; LI, X. Hydrogen passivation accelerated conversion of cotton to graphene. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 38, p. e00736–e00736, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00736>.

HAMROUNI, A. *et al.* Enhanced Solar Light Photocatalytic Activity of Ag Doped $\text{TiO}_2\text{-Ag}_3\text{PO}_4$ Composites. **Nanomaterials**, v. 10, n. 4, p. 795, 21 abr. 2020. <https://doi.org/10.3390/nano10040795>.

HIND LAKHLIFI *et al.* Structural, morphological and optical properties of cobalt-substituted MgMoO_4 ceramics prepared by pyrolysis of citric acid precursors. **Surfaces and Interfaces**, v. 21, p. 100718–100718, 1 dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100718>.

HIRATA, T. In-situ observation of Mo-O stretching vibrations during the reduction of MoO_3 with hydrogen by diffuse reflectance FTIR spectroscopy. **Applied Surface Science**, v. 40, n. 1-2, p. 179–181, nov. 1989. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(89\)90174-8](https://doi.org/10.1016/0169-4332(89)90174-8).

HOÀI, T. *et al.* Removal of ethylene by synthesized Ag/TiO_2 photocatalyst under visible light irradiation. **Chemosphere**, v. 329, p. 138607–138607, 1 jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138607>.

HU, Z.; LIU, Z.; TIAN, J. Stacking of Exfoliated Two-Dimensional Materials: A Review. **Chinese Journal of Chemistry**, v. 38, n. 9, p. 981–995, 2 jun. 2020. <https://doi.org/10.1002/cjoc.202000092>.

HUSSAIN, S.; MAKTEDAR, S. S. Structural, Functional and Mechanical performance of Advanced Graphene-based Composite Hydrogels. **Results in Chemistry**, v. 6, p. 101029–101029, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101029>.

IBHADON, A.; FITZPATRICK, P. Heterogeneous Photocatalysis: Recent Advances and Applications. **Catalysts**, v. 3, n. 1, p. 189–218, 1 mar. 2013. <https://doi.org/10.3390/catal3010189>.

KAMANI, H. *et al.* Health risk assessment of BTEX compounds (benzene, toluene, ethylbenzene and xylene) in different indoor air using Monte Carlo simulation in zahedan city, Iran. **Heliyon**, v. 9, n. 9, p. e20294–e20294, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20294>.

KANE, A. *et al.* g-C₃N₄/TiO₂ S-scheme heterojunction photocatalyst with enhanced photocatalytic Carbamazepine degradation and mineralization. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 430, p. 113971–113971, 1 set. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.113971>.

KHATUN, M.; MITRA, P.; MUKHERJEE, S. Effect of band gap and particle size on photocatalytic degradation of NiSnO₃ nanopowder for some conventional organic dyes. **Hybrid advances**, v. 4, p. 100079–100079, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100079>.

KAUR, G. *et al.* Novel BTEX-degrading strains from subsurface soil: Isolation, identification and growth evaluation. **Environmental Pollution**, v. 335, p. 122303–122303, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122303>.

KIM, M. *et al.* Work function tuning of directly grown graphene via ultraviolet–ozone treatment for electrode application in organic photovoltaic devices. **Surfaces and Interfaces**, v. 41, p. 103228–103228, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103228>.

KOKILAVANI, S. *et al.* Facile synthesis of MgS/Ag₂MoO₄ nanohybrid heterojunction: Outstanding visible light harvesting for boosted photocatalytic degradation of MB and its anti-microbial applications. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 627, p. 127097–127097, 1 out. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127097>.

KUMAR, J. V. *et al.* Fabrication of potato-like silver molybdate microstructures for photocatalytic degradation of chronic toxicity ciprofloxacin and highly selective electrochemical detection of H₂O₂. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep34149>.

KUMAR, N. *et al.* Selective aerobic coupling of amines to imines using solar spectrum-responsive flower-like N-en-graphene quantum dots (GQDs) decorated with 2, 4-dinitrophenylhydrazine (PH) as a photocatalyst. **Chemosphere**, v. 341, p. 139697–139697, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139697>.

LI, N. *et al.* Nucleation and growth of graphene at different temperatures by plasma enhanced chemical vapor deposition. **Materials Today Communications**, v. 36, p. 106568–106568, 1 ago. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106568>.

LIU, H. S.; CHIN, T. S.; YUNG, S. W. FTIR and XPS studies of low-melting PbO-ZnO-P₂O₅ glasses. **Materials Chemistry and Physics**, v. 50, n. 1, p. 1–10, ago. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(97\)80175-7](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(97)80175-7).

LIAN, Y. *et al.* Visible light-driven photocatalytic and enzyme-like properties of novel AgBr/Ag₂MoO₄ for degradation of pollutants and improved antibacterial application. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 639, p. 128348–128348, 1 abr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128348>.

MA, W. *et al.* Three-dimensional nitrogen-doped graphene quantum dots/reduced graphene oxide composite hydrogels as binder-free electrodes for symmetric supercapacitors. **Materials Chemistry and Physics**, v. 310, p. 128365–128365, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128365>.

MA, L. *et al.* Acute and chronic risk assessment of BTEX in the return water of hydraulic fracturing operations in Marcellus Shale. **Science of The Total Environment**, v. 906, p. 167638–167638, 1 jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167638>.

MARMITT, S.; PIROTTA, L. V.; STÜLP, S. Aplicação de fotólise direta e UV/H₂O₂ a efluente sintético contendo diferentes corantes alimentícios. **Química Nova**, v. 33, n. 2, p. 384–388, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000200027>.

MANSOUR, E.; EL-DAMRAWI, G. Electrical properties and FTIR spectra of ZnO–PbO–P₂O₅ glasses. **Physica B: Condensed Matter**, v. 405, n. 8, p. 2137–2143, abr. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2010.01.121>.

MARQUES, F.; STUMBO, A. M.; CANELA, M. C. Estratégias e materiais utilizados em fotocatalise heterogênea para a geração de hidrogênio através da fotólise da água. **Química Nova**, 10 fev. 2017. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170015>.

MEKOUNG, P. M. *et al.* Spectroscopic properties (FT-IR, NMR and UV) and DFT studies of amodiaquine. **Heliyon**, v. 9, n. 12, p. e22187–e22187, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22187>.

MENG, N. *et al.* DFT study of n-modified graphene-loaded monometallic cobalt for acetylene hydrochlorination reaction. **Computational and Theoretical Chemistry**, v. 1230, p. 114359–114359, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2023.114359>.

MiniFlex | Rigaku Global Website. Disponível em: <https://www.rigaku.com/pt-br/products/xrd/miniflex>. Acesso em: 1 dez. 2023.

MOINUDDIN, A. A. *et al.* Morphologically and hierarchically controlled Ag/Ag₂MoO₄ microspheres for photocatalytic hydrogen generation. **Applied Surface Science**, v. 597, p. 153554–153554, 1 set. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153554>.

MORALES, M. M. *et al.* Babaçu (*Attalea Speciosa*) Residue Bio-Oil Repels Livestock Tick Larvae *Rhipicephalus (Boophilis) Microplus*. **Parasitologia**, v. 5, n. 1, p. 7, 7 fev. 2025. <https://doi.org/10.3390/parasitologia5010007>.

NAVARRO-PARDO, F. *et al.* Effects on the Thermo-Mechanical and Crystallinity Properties of Nylon 6,6 Electrospun Fibres Reinforced with One Dimensional (1D) and Two Dimensional (2D) Carbon. **Materials**, v. 6, n. 8, p. 3494–3513, 14 ago. 2013. <https://doi.org/10.3390/ma6083494>.

NG, B.; FAN, W. Y. Uncovering Metastable α -Ag₂MoO₄ Phase Under Ambient Conditions. Overcoming High Pressures by 2,3-Bis(2-pyridyl)pyrazine Doping. **Crystal Growth & Design**, v. 15, n. 6, p. 3032–3037, 7 maio 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5b00455>.

NASIRI, S. *et al.* Modified Scherrer equation to calculate crystal size by XRD with high accuracy, examples Fe₂O₃, TiO₂ and V₂O₅. **Nano Trends**, v. 3, p. 100015, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2023.100015>.

OLIVEIRA, L. P. *et al.* Increasing the photocatalytic and fungicide activities of Ag₃PO₄ microcrystals under visible-light irradiation. **Ceramics International**, v. 47, n. 16, p. 22604–22614, ago. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.272>.

PYSARENKO, S. *et al.* Photocatalytic destruction and adsorptive processes of methylene blue by potassium titanate. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 7754–7758, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.476>.

QIU, H. *et al.* Association between ambient BTEX mixture and neurological hospitalizations: A multicity time-series study in Taiwan. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 263, p. 115239–115239, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115239>.

RAMALINGAM, G. *et al.* A review of graphene-based semiconductors for photocatalytic degradation of pollutants in wastewater. **Chemosphere**, v. 300, p. 134391, ago. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134391>.

SAHA, J. K.; DUTTA, A. A Review of Graphene: Material Synthesis from Biomass Sources. **Waste and Biomass Valorization**, 17 set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01577-w>.

SINGH, R. P. *et al.* Zero-valent silver decorated Ag₂MoO₄ nanorods: An excellent visible light active photocatalyst for persulfate ion activation with intrinsic bactericidal activity. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 157, p. 111375–111375, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111375>.

SHIMAA ELBAKRY *et al.* Photocatalytic degradation of organic compounds by TFC membranes functionalized with Ag/rGO nanocomposites. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 430, p. 113957–113957, 1 set. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.113957>.

S. AUSTIN SUTHANTHIRARAJ; R. SARUMATHI. XRD and FTIR studies on a new solid electrolyte system containing Ag_3PO_4 and SbI_3 . **AIP conference proceedings**, 1 jan. 2012. <https://doi.org/10.1063/1.4710345>.

S. JAYASUBRAMANIYAN et al. Microwave hydrothermal synthesis of α - MnMoO_4 nanorods for high electrochemical performance supercapacitors. **RSC Advances**, v. 8, n. 40, p. 22559–22568, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.1039/C8RA02751J>.

SHAHNAZ TEIMOORI et al. Rapid extraction of BTEX in water and milk samples based on functionalized multi-walled carbon nanotubes by dispersive homogenized-micro-solid phase extraction. **Food Chemistry**, v. 421, p. 136229–136229, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136229>.

SOBCZYK, M. et al. Fly ash-based zeolitic materials of different surface chemistry and texture: insight into adsorption performance and mechanisms of aqueous BTEX removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, p. 111220–111220, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111220>.

SONG, J. et al. Ga-modified zeolites to convert mixed waste plastics to benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX)-enriched oil through a dielectric barrier discharge plasma-modified reactor. **Chemical Engineering Journal**, v. 476, p. 146501–146501, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146501>.

SEVERO, L. D. S. Síntese e caracterização de Grafeno produzido a partir da serragem de madeira, **Dissertação de mestrado** —UNIPAMPA, 2020, Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/5171> . Acesso em: 23 mar. 2022.

SAFARTOOBI, A.; MAZLOOM, J.; GHODSI, F. E. Silver/molybdenum metal-organic framework derived Ag_2MoO_4 nanoparticles as novel electrode for high-performance supercapacitor. **Journal of Energy Storage**, v. 68, p. 107818–107818, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107818>.

SU, J. et al. Co-hydropyrolysis of pine and HDPE over bimetallic catalysts: Efficient BTEX production and process mechanism analysis. **Fuel Processing Technology**, v. 249, p. 107845–107845, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107845>.

SYED, A.; ELGORBAN, A. M.; BAHKALI, A. H. Improved visible-light driven photocatalysis of a novel heterostructure by the decoration of CuS on Ag_2MoO_4 nanorod: Synthesis, characterization, elucidation of photocatalytic mechanism and anti-microbial application. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 629, p. 127371–127371, 1 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127371>.

TASISA, E. Y. et al. Band gap engineering of titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles prepared via green route and its visible light driven for environmental remediation. **Results in Chemistry**, v. 11, p. 101850, out. 2024.

TAN, Q. *et al.* Ag₃PO₄/MXene- TiO₂-T: As an all-solid Z-type photocatalytic system with stable and enhanced photocatalytic performance. **Optical Materials**, v. 131, p. 112685–112685, 1 set. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112685>.

TAN, S. *et al.* Preparation and characterisation of some new Mo/O/XR (X = P or As) heteropoly blue complexes. **Journal of Materials Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 1180–1185, 11 mar. 2003. <https://doi.org/10.1039/B212180H>.

TANG, H. *et al.* Construction of Ag₃PO₄/Ag₂MoO₄ Z-scheme heterogeneous photocatalyst for the remediation of organic pollutants. **Chinese Journal of Catalysis**, v. 38, n. 2, p. 337–347, 1 fev. 2017. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(16\)62570-6](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(16)62570-6).

TANG, X. *et al.* P123-assisted hydrothermal synthesis of Ag₂MoO₄ with enhanced photocatalytic performance. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 141, p. 109613–109613, 1 jul. 2022. [10.1016/j.inoche.2022.109613](https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109613).

TEODORO, V. *et al.* Connecting morphology and photoluminescence emissions in β-Ag₂MoO₄ microcrystals. **Ceramics International**, v. 48, n. 3, p. 3740–3750, 1 fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.156>.

TSILOMELEKIS, G.; BOGHOSIAN, S. Structural and vibrational properties of molybdena catalysts supported on alumina and zirconia studied by in situ Raman and FTIR spectroscopies combined with 18O/16O isotopic substitution. **Catalysis Today**, v. 158, n. 1-2, p. 146–155, 1 dez. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.06.026>.

TUINSTRA, F.; KOENIG, J. L. Raman spectrum of graphite. *J. Chem. Phys.*, v. 53, n. 3, p. 1126–1130, 1970. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1674108>.

UYI SULAEMAN *et al.* Surface modification of Ag₃PO₄ using the alginate for highly active photocatalyst under visible light irradiation. **Surfaces and Interfaces**, v. 28, p. 101672–101672, 1 fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101672>.

UTAMI, R. W.; RAFSANJANI, R. A.; D TRIYONO. Optical properties of La_{0.9}Sr_{0.1}Fe_{1-x}MoxO₃ (x = 0.1, 0.2, and 0.3) perovskite material prepared by sol-gel method. **Journal of Physics Conference Series**, v. 1153, p. 012072–012072, 1 fev. 2019. [10.1088/1742-6596/1153/1/012072](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012072).

VAIANO V., M. Matarangolo, J. J. Murcia, H. Rojas, J. A. Navío and M. C. Hidalgo, *Appl. Catal., B*, 2018, 225, 197–206. Enhanced photocatalytic removal of phenol from aqueous solutions using ZnO modified with Ag. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.075>.

VINOSHMUTHUKUMAR, P.; GOPALAKRISHNAN, B.; B. BHARATHIRAJA. Process optimization of BTEX degradation from petrochemical effluent using integrated advanced oxidation. **Waste Management Bulletin**, v. 1, n. 1, p. 19–28, 1 jun. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.03.001>.

XPS-OMICRON – Central IFSC-USP Multiusuários. Disponível em: <https://www.ifsc.usp.br/multiusuarios/xps-omicron/>. Acesso em: 1 dez. 2023.

XU, Z.; ZHONG, J.; LI, M. Ionic liquid-assisted construction of Z-scheme Ag/Ag₃PO₄/Ag₂MoO₄ heterojunctions with enhanced photocatalytic performance. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 152, p. 110734–110734, 1 jun. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110734>.

WANG, Z. *et al.* Facile synthesis of novel butterfly-like Ag₂MoO₄ nanosheets for visible-light driven photocatalysis. **Materials Letters**, v. 196, p. 373–376, jun. 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.03.078>.

WANG, Z. *et al.* Facile preparation of two-dimensional Bi₂MoO₆@Ag₂MoO₄ core-shell composite with enhanced visible light photocatalytic activity. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 729, p. 100–108, 1 dez. 2017b. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.152>.

WANG, T. *et al.* Enhanced photocatalytic activity for degrading phenol in seawater by TiO₂-based catalysts under weak light irradiation. **RSC Advances**, v. 7, n. 51, p. 31921–31929, 1 jan. 2017c. <https://doi.org/10.1039/C7RA04732K>.

YAN, X. *et al.* Morphology-controlled synthesis of Ag₃PO₄ microcubes with enhanced visible-light-driven photocatalytic activity. **Ceramics International**, v. 39, n. 8, p. 9715–9720, 1 dez. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.04.044>.

YANG, J. *et al.* A novel p-LaFeO₃/n-Ag₃PO₄ heterojunction photocatalyst for phenol degradation under visible light irradiation. **Chemical Communications**, v. 52, n. 12, p. 2620–2623, 1 jan. 2016. <https://doi.org/10.1039/C5CC09222A>.

YANG, R. *et al.* Understanding the origin of synergistic catalytic activities for ZnO based sonophotocatalytic degradation of methyl orange. **Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 119, p. 128–135, 1 fev. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.01.028>.

YU, Y. *et al.* Graphene coated lithium foil anode enables long cycle life Li metal pouch cells. **Carbon**, v. 215, p. 118498–118498, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118498>.

ZHANG, Y. *et al.* Graphene-based photocatalysts for degradation of organic pollution. **Chemosphere**, v. 341, p. 140038–140038, 1 nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140038>.

ZHANG, C. *et al.* Extended construction strategies of Ag₃PO₄-based heterojunction photocatalysts for robust environmental applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 5, p. 110705–110705, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110705>.

ZHUANG, H. *et al.* State-of-the-art progress in Ag₃PO₄-based photocatalysts: Rational design, regulation and perspective. **Applied Materials Today**, v. 31, p. 101742–101742, 1 abr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101742>.

APENDICE 1 – CINÉTICA DE ADSORÇÃO DE XILENO E ETILBENZENO

Tabela A.1.1 – Cinética de adsorção de xileno sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

abs1	C-1.	qe (mg/g)	abs2	C-2.	qe (mg/g)	abs3	C-3	qe (mg/g)	M.C	t (min)	M-C/C ₀	D.P	Erro
0,0988	50,2308	0,0000	0,1005	51,5538	0,0000	0,1000	51,1538	0,0000	50,9795	0	1,0000	0,00	0,00
0,0954	47,6154	6,5385	0,0976	49,3077	5,6154	0,0989	50,2769	2,1923	49,0667	10	0,9625	2,29	1,14
0,0932	45,9231	10,7692	0,0954	47,6154	9,8462	0,0967	48,5769	6,4423	47,3718	20	0,9292	2,28	1,14
0,0922	45,1538	12,6923	0,0924	45,3077	15,6154	0,0945	46,9231	10,5769	45,7949	30	0,8983	2,53	1,26
0,0910	44,2308	15,0000	0,0915	44,6154	17,3462	0,0930	45,7692	13,4615	44,8718	40	0,8802	1,96	0,98
0,0909	44,1538	15,1923	0,0906	43,9231	19,0769	0,0923	45,2308	14,8077	44,4359	50	0,8716	2,36	1,18
0,0899	43,3846	17,1154	0,0899	43,3846	20,4231	0,0912	44,3846	16,9231	43,7179	60	0,8576	1,97	0,98
0,0888	42,5385	19,2308	0,0895	43,0769	21,1923	0,0886	42,3846	21,9231	42,6667	70	0,8369	1,39	0,70
0,0864	40,6923	23,8462	0,0872	41,3077	25,6154	0,0869	41,0769	25,1923	41,0256	80	0,8047	0,92	0,46
0,0862	40,5385	24,2308	0,0865	40,7692	26,9615	0,0870	41,1538	25,0000	40,8205	100	0,8007	1,41	0,70
0,0860	40,3846	24,6154	0,0867	40,9231	26,5769	0,0867	40,9231	25,5769	40,7436	120	0,7992	0,98	0,49

Abs = absorvância; C = concentração em mg/L; qe = quantidade adsorvida no equilíbrio; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.1.2 – Cinética de adsorção de etilbenzeno sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

abs1	C-1.	qe (mg/g)	abs2	C-2.	qe (mg/g)	abs3	C-3	qe (mg/g)	M.C	t (min)	M-C/C ₀	D.P	Erro
0,0989	50,7385	0,0000	0,0996	51,3077	0,0000	0,0982	50,2308	0,0000	50,7590	0	0,996	0,0000	0,0000
0,0978	49,9231	2,0385	0,0956	48,2308	7,6923	0,0959	48,4615	4,4231	48,8718	10	0,959	8,6153	4,3076
0,0946	47,4615	8,1923	0,0943	47,2308	10,1923	0,0952	47,9231	5,7692	47,5385	20	0,933	5,9018	2,9509
0,0928	46,0769	11,6538	0,0927	46,0000	13,2692	0,0941	47,0769	7,8846	46,3846	30	0,910	2,4068	1,2034
0,0920	45,4615	13,1923	0,0919	45,3846	14,8077	0,0922	45,6154	11,5385	45,4872	40	0,892	8,7659	4,3829
0,0911	44,7692	14,9231	0,0913	44,9231	15,9615	0,0915	45,0769	12,8846	44,9231	50	0,881	4,1746	2,0873
0,0886	42,8462	19,7308	0,0899	43,8462	18,6538	0,0901	44,0000	15,5769	43,5641	60	0,855	12,0909	6,0455
0,0876	42,0769	21,6538	0,0891	43,2308	20,1923	0,0896	43,6154	16,5385	42,9744	70	0,843	7,8213	3,9106
0,0865	41,2308	23,7692	0,0869	41,5385	24,4231	0,0866	41,3077	22,3077	41,3590	80	0,811	4,4911	2,2456
0,0871	41,6923	22,6154	0,0867	41,3846	24,8077	0,0856	40,5385	24,2308	41,2051	100	0,808	9,4643	4,7321
0,0859	40,7692	24,9231	0,0865	41,2308	25,1923	0,0869	41,5385	21,7308	41,1795	120	0,808	6,4395	3,2198

Abs = absorvância; C = concentração em mg/L; qe = quantidade adsorvida no equilíbrio; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.1.3 – Cinética de adsorção de tolueno sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

abs1	C-1.	qe (mg/g)	abs2	C-2.	qe (mg/g)	abs3	C-3	qe (mg/g)	M.C	t (min)	M-C/C ₀	D.P	Erro
0,0998	49,9286	0,0000	0,0996	49,7857	0,0000	0,0982	48,7857	0,0000	49,5000	0	0,971	0,0000	0,0000
0,0978	48,5000	3,5714	0,0956	46,9286	7,1429	0,0959	47,1429	4,1071	47,5238	10	0,932	8,6153	4,3076
0,0946	46,2143	9,2857	0,0935	45,4286	10,8929	0,0944	46,0714	6,7857	45,9048	20	0,900	5,9018	2,9509
0,0932	45,2143	11,7857	0,0922	44,5000	13,2143	0,0936	45,5000	8,2143	45,0714	30	0,884	2,4068	1,2034
0,0920	44,3571	13,9286	0,0913	43,8571	14,8214	0,0925	44,7143	10,1786	44,3095	40	0,869	8,7659	4,3829
0,0905	43,2857	16,6071	0,0905	43,2857	16,2500	0,0915	44,0000	11,9643	43,5238	50	0,854	4,1746	2,0873
0,0889	42,1429	19,4643	0,0890	42,2143	18,9286	0,0900	42,9286	14,6429	42,4286	60	0,832	12,0909	6,0455
0,0876	41,2143	21,7857	0,0886	41,9286	19,6429	0,0890	42,2143	16,4286	41,7857	70	0,820	7,8213	3,9106
0,0865	40,4286	23,7500	0,0869	40,7143	22,6786	0,0866	40,5000	20,7143	40,5476	80	0,795	4,4911	2,2456
0,0872	40,9286	22,5000	0,0867	40,5714	23,0357	0,0856	39,7857	22,5000	40,4286	100	0,793	9,4643	4,7321
0,0858	39,9286	25,0000	0,0866	40,5000	23,2143	0,0865	40,4286	20,8929	40,2857	120	0,790	6,4395	3,2198

Abs = absorvância; C = concentração em mg/L; qe = quantidade adsorvida no equilíbrio; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.1.3 – Cinética de adsorção de benzeno sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

abs1	C-1.	qe (mg/g)	abs2	C-2.	qe (mg/g)	abs3	C-3	qe (mg/g)	M.C	t (min)	M-C/C ₀	D.P	Erro
0,0692	50,0000	0,0000	0,0691	49,8571	0,0000	0,0698	50,8571	0,0000	50,2381	0	0,985	0,0000	0,0000
0,0680	48,2857	4,2857	0,0678	48,0000	4,6429	0,0695	50,4286	1,0714	48,9048	10	0,959	8,6153	4,3076
0,0670	46,8571	7,8571	0,0672	47,1429	6,7857	0,0683	48,7143	5,3571	47,5714	20	0,933	5,9018	2,9509
0,0659	45,2857	11,7857	0,0665	46,1429	9,2857	0,0672	47,1429	9,2857	46,1905	30	0,906	2,4068	1,2034
0,0650	44,0000	15,0000	0,0648	43,7143	15,3571	0,0665	46,1429	11,7857	44,6190	40	0,875	8,7659	4,3829
0,0640	42,5714	18,5714	0,0644	43,1429	16,7857	0,0660	45,4286	13,5714	43,7143	50	0,857	4,1746	2,0873
0,0638	42,2857	19,2857	0,0643	43,0000	17,1429	0,0650	44,0000	17,1429	43,0952	60	0,845	12,0909	6,0455
0,0636	42,0000	20,0000	0,0640	42,5714	18,2143	0,0642	42,8571	20,0000	42,4762	70	0,833	7,8213	3,9106
0,0622	40,0000	25,0000	0,0627	40,7143	22,8571	0,0633	41,5714	23,2143	40,7619	80	0,800	4,4911	2,2456
0,0627	40,7143	23,2143	0,0625	40,4286	23,5714	0,0621	39,9143	27,3571	40,3524	100	0,792	9,4643	4,7321
0,0625	40,4286	23,9286	0,0627	40,7143	22,8571	0,0623	40,1429	26,7857	40,4286	120	0,793	6,4395	3,2198

Abs = absorvância; C = concentração em mg/L; qe = quantidade adsorvida no equilíbrio; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

APENDICE 2 – FOTÓLISE UV/VIS SOBRE XILENO E ETILBENZENO

Tabela A.2.1 – Fotólise do xileno sob luz ultravioleta.

C-1	C-1/C ₀	C-2	C-2/C ₀	C-3	C-3/C ₀	M-C	t (min)	M-C/C ₀	D.P.(C/C ₀)	Erro
51,2000	1,0000	50,2000	1,0000	50,7000	1,0000	50,7000	0	1,0000	0,0000	0,0000
48,3000	0,9434	49,4000	0,9841	49,2000	0,9704	48,9667	5	0,9658	0,0207	0,0120
47,6000	0,9297	48,2000	0,9602	48,6000	0,9586	48,1333	10	0,9494	0,0172	0,0099
46,7000	0,9121	46,2000	0,9203	47,3000	0,9329	46,7333	15	0,9218	0,0105	0,0061
46,9000	0,9160	45,1000	0,8984	46,1000	0,9093	46,0333	20	0,9080	0,0089	0,0051
45,3000	0,8848	44,1000	0,8785	45,1000	0,8895	44,8333	25	0,8843	0,0055	0,0032
42,9000	0,8379	43,9000	0,8745	44,9000	0,8856	43,9000	30	0,8659	0,0250	0,0144
41,3000	0,8066	42,9000	0,8546	44,8000	0,8836	43,0000	35	0,8481	0,0389	0,0224
41,2000	0,8047	42,3000	0,8426	42,1000	0,8304	41,8667	40	0,8258	0,0194	0,0112
41,0000	0,8008	42,1000	0,8386	38,7000	0,7633	40,6000	50	0,8008	0,0377	0,0217
40,9000	0,7988	41,9000	0,8347	37,9000	0,7475	40,2333	60	0,7936	0,0438	0,0253

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.2.2 – Fotólise do etilbenzeno sob luz ultravioleta.

C-1	C-1/C ₀	C-2	C-2/C ₀	C-3	C-3/C ₀	M-C	t (min)	M-C/C ₀	D.P.(C/C ₀)	Erro
50,2000	0,9805	50,6000	1,0080	50,9000	1,0039	50,5667	0	1,0000	0,0149	0,0086
49,6000	0,9688	48,9000	0,9741	48,6000	0,9586	49,0333	5	0,9697	0,0079	0,0046
48,2000	0,9414	48,5000	0,9661	48,4000	0,9546	48,3667	10	0,9565	0,0124	0,0071
47,6000	0,9297	47,2000	0,9402	48,3000	0,9527	47,7000	15	0,9433	0,0115	0,0066
46,9000	0,9160	46,1000	0,9183	47,9000	0,9448	46,9667	20	0,9288	0,0160	0,0092
45,2000	0,8828	45,4000	0,9044	47,4000	0,9349	46,0000	25	0,9097	0,0262	0,0151
44,3000	0,8652	44,2000	0,8805	47,3000	0,9329	45,2667	30	0,8952	0,0355	0,0205
43,8000	0,8555	43,6000	0,8685	45,9000	0,9053	44,4333	35	0,8787	0,0259	0,0149
42,1000	0,8223	43,1000	0,8586	44,2000	0,8718	43,1333	40	0,8530	0,0256	0,0148
41,3000	0,8066	44,1000	0,8785	43,8000	0,8639	43,0667	50	0,8517	0,0380	0,0219
41,0000	0,8008	43,9000	0,8745	41,2000	0,8126	42,0333	60	0,8312	0,0396	0,0229

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.2.3 – Fotólise do tolueno sob luz ultravioleta.

C-1	C-1/C ₀	C-2	C-2/C ₀	C-3	C-3/C ₀	M-C	t (min)	M-C/C ₀	D.P.(C/C ₀)	Erro
50,6000	0,9883	50,2000	1,0000	51,3000	1,0118	50,7000	0	1,0000	0,0118	0,0068
49,6000	0,9688	49,6000	0,9880	49,6000	0,9783	49,6000	5	0,9783	0,0096	0,0056
48,9000	0,9551	49,5000	0,9861	49,3000	0,9724	49,2333	10	0,9711	0,0155	0,0090
47,6000	0,9297	49,2000	0,9801	48,6000	0,9586	48,4667	15	0,9560	0,0253	0,0146
47,5000	0,9277	47,9000	0,9542	48,1000	0,9487	47,8333	20	0,9435	0,0140	0,0081
46,8000	0,9141	46,9000	0,9343	48,0000	0,9467	47,2333	25	0,9316	0,0165	0,0095
46,2000	0,9023	46,0000	0,9163	46,2000	0,9112	46,1333	30	0,9099	0,0071	0,0041
45,3000	0,8848	46,1000	0,9183	45,3000	0,8935	45,5667	35	0,8988	0,0174	0,0101
45,3000	0,8848	45,6000	0,9084	44,5000	0,8777	45,1333	40	0,8902	0,0161	0,0093
45,1000	0,8809	44,3000	0,8825	44,2000	0,8718	44,5333	50	0,8784	0,0058	0,0033
43,2000	0,8438	44,1000	0,8785	42,9000	0,8462	43,4000	60	0,8560	0,0194	0,0112

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.2.4 – Fotólise do benzeno sob luz ultravioleta.

C-1	C-1/C ₀	C-2	C-2/C ₀	C-3	C-3/C ₀	M-C	t (min)	M-C/C ₀	D.P.(C/C ₀)	Erro
51,3000	1,0020	50,7000	1,0100	49,9000	0,9842	50,6333	0	1,0000	0,0132	0,0076
49,7000	0,9707	49,5000	0,9861	49,6000	0,9783	49,6000	5	0,9796	0,0077	0,0044
49,6000	0,9688	49,3000	0,9821	49,5000	0,9763	49,4667	10	0,9770	0,0067	0,0039
49,5000	0,9668	49,3000	0,9821	48,6000	0,9586	49,1333	15	0,9704	0,0119	0,0069
49,3000	0,9629	48,6000	0,9681	48,3000	0,9527	48,7333	20	0,9625	0,0079	0,0045
48,3000	0,9434	47,3000	0,9422	47,5000	0,9369	47,7000	25	0,9421	0,0035	0,0020
47,1000	0,9199	47,1000	0,9382	46,1000	0,9093	46,7667	30	0,9236	0,0147	0,0085
46,1000	0,9004	46,8000	0,9323	46,2000	0,9112	46,3667	35	0,9157	0,0162	0,0094
46,0000	0,8984	46,2000	0,9203	45,3000	0,8935	45,8333	40	0,9052	0,0143	0,0082
45,9000	0,8965	45,9000	0,9143	45,1000	0,8895	45,6333	50	0,9013	0,0128	0,0074
45,3000	0,8848	45,6000	0,9084	44,9000	0,8856	45,2667	60	0,8940	0,0134	0,0077

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.2.5 – Fotólise do xileno sob luz visível.

C-1	C-1/C ₀	C-2	C-2/C ₀	C-3	C-3/C ₀	M-C	t (min)	M-C/C ₀	D.P.(C/C ₀)	Erro
50,3000	0,9824	50,4000	1,0040	50,9000	1,0039	50,5333	0	1,0000	0,0124	0,0072
48,9000	0,9551	48,6000	0,9681	47,6000	0,9389	48,3667	5	0,9571	0,0147	0,0085
46,3000	0,9043	45,6000	0,9084	46,2000	0,9112	46,0333	10	0,9109	0,0035	0,0020
45,3000	0,8848	44,2000	0,8805	45,1000	0,8895	44,8667	15	0,8879	0,0045	0,0026
43,2000	0,8438	42,1000	0,8386	43,6000	0,8600	42,9667	20	0,8503	0,0111	0,0064
42,1000	0,8223	41,9000	0,8347	40,8000	0,8047	41,6000	25	0,8232	0,0150	0,0087
40,5000	0,7910	39,4000	0,7849	38,9000	0,7673	39,6000	30	0,7836	0,0123	0,0071
38,9000	0,7598	37,5000	0,7470	37,8000	0,7456	38,0667	35	0,7533	0,0078	0,0045
37,1000	0,7246	35,4000	0,7052	35,4000	0,6982	35,9667	40	0,7117	0,0137	0,0079
35,9000	0,7012	35,1000	0,6992	33,9000	0,6686	34,9667	50	0,6920	0,0182	0,0105
33,4000	0,6523	32,9000	0,6554	32,1000	0,6331	32,8000	60	0,6491	0,0121	0,0070

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.2.6 – Fotólise do etilbenzeno sob luz visível.

C-1	C-1/C ₀	C-2	C-2/C ₀	C-3	C-3/C ₀	M-C	t (min)	M-C/C ₀	D.P.(C/C ₀)	Erro
50,9000	0,9941	50,6000	1,0080	51,9000	1,0237	51,1333	0	1,0000	0,0148	0,0085
47,9000	0,9355	48,2000	0,9602	48,3000	0,9527	48,1333	5	0,9413	0,0126	0,0073
46,2000	0,9023	45,9000	0,9143	46,9000	0,9250	46,3333	10	0,9061	0,0114	0,0066
45,6000	0,8906	45,3000	0,9024	45,2000	0,8915	45,3667	15	0,8872	0,0066	0,0038
43,9000	0,8574	43,1000	0,8586	43,9000	0,8659	43,6333	20	0,8533	0,0046	0,0026
43,2000	0,8438	42,1000	0,8386	42,6000	0,8402	42,6333	25	0,8338	0,0026	0,0015
41,2000	0,8047	40,5000	0,8068	40,0000	0,7890	40,5667	30	0,7934	0,0097	0,0056
39,9000	0,7793	39,1000	0,7789	39,2000	0,7732	39,4000	35	0,7705	0,0034	0,0020
38,4000	0,7500	38,4000	0,7649	37,8000	0,7456	38,2000	40	0,7471	0,0102	0,0059
36,9000	0,7207	37,4000	0,7450	36,1000	0,7120	36,8000	50	0,7197	0,0171	0,0099
36,8000	0,7188	35,1000	0,6992	35,1000	0,6923	35,6667	60	0,6975	0,0137	0,0079

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.2.7 – Fotólise do tolueno sob luz visível.

C-1	C-1/C ₀	C-2	C-2/C ₀	C-3	C-3/C ₀	M-C	t (min)	M-C/C ₀	D.P.(C/C ₀)	Erro
50,4000	0,9844	50,1000	0,9980	51,6000	1,0178	50,7000	0	1,0000	0,0168	0,0097
48,6000	0,9492	47,6000	0,9482	47,2000	0,9310	47,8000	5	0,9428	0,0103	0,0059
46,9000	0,9160	46,3000	0,9223	46,2000	0,9112	46,4667	10	0,9165	0,0056	0,0032
46,2000	0,9023	45,6000	0,9084	45,9000	0,9053	45,9000	15	0,9053	0,0030	0,0017
44,6000	0,8711	44,2000	0,8805	44,2000	0,8718	44,3333	20	0,8744	0,0052	0,0030
44,1000	0,8613	43,6000	0,8685	43,6000	0,8600	43,7667	25	0,8632	0,0046	0,0027
42,8000	0,8359	41,2000	0,8207	42,7000	0,8422	42,2333	30	0,8330	0,0111	0,0064
41,2000	0,8047	40,5000	0,8068	41,8000	0,8245	41,1667	35	0,8120	0,0109	0,0063
40,2000	0,7852	39,6000	0,7888	40,2000	0,7929	40,0000	40	0,7890	0,0039	0,0022
39,4000	0,7695	39,5000	0,7869	38,5000	0,7594	39,1333	50	0,7719	0,0139	0,0080
37,2000	0,7266	38,7000	0,7709	37,4000	0,7377	37,7667	60	0,7449	0,0231	0,0133

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.2.8 – Fotólise do benzeno sob luz visível.

C-1	C-1/C ₀	C-2	C-2/C ₀	C-3	C-3/C ₀	M-C	t (min)	M-C/C ₀	D.P.(C/C ₀)	Erro
50,4000	0,9844	50,1000	0,9980	51,6000	1,0178	50,7000	0	1,0000	0,0168	0,0097
48,6000	0,9492	47,6000	0,9482	47,2000	0,9310	47,8000	5	0,9428	0,0103	0,0059
46,9000	0,9160	46,3000	0,9223	46,2000	0,9112	46,4667	10	0,9165	0,0056	0,0032
46,2000	0,9023	45,6000	0,9084	45,9000	0,9053	45,9000	15	0,9053	0,0030	0,0017
44,6000	0,8711	44,2000	0,8805	44,2000	0,8718	44,3333	20	0,8744	0,0052	0,0030
44,1000	0,8613	43,6000	0,8685	43,6000	0,8600	43,7667	25	0,8632	0,0046	0,0027
42,8000	0,8359	41,2000	0,8207	42,7000	0,8422	42,2333	30	0,8330	0,0111	0,0064
41,2000	0,8047	40,5000	0,8068	41,8000	0,8245	41,1667	35	0,8120	0,0109	0,0063
40,2000	0,7852	39,6000	0,7888	40,2000	0,7929	40,0000	40	0,7890	0,0039	0,0022
39,4000	0,7695	39,5000	0,7869	38,5000	0,7594	39,1333	50	0,7719	0,0139	0,0080
37,2000	0,7266	38,7000	0,7709	37,4000	0,7377	37,7667	60	0,7449	0,0231	0,0133

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

APENDICE 3 – FOTODEGRADAÇÃO UV/VIS SOBRE BTEX COM $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

Tabela A.3.1 - Fotodegradação do xileno sob luz ultravioleta com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,6000	1,0000	50,6000	1,0000	50,4000	1,0000	50,5333	1,0000	0,0000	0,0000
30	41,2000	0,8142	39,4000	0,7787	40,1000	0,7956	40,2333	0,7962	0,0178	0,0103
32	39,4000	0,7787	38,6000	0,7628	38,6000	0,7659	38,8667	0,7691	0,0084	0,0048
34	37,4000	0,7391	37,2000	0,7352	37,4000	0,7421	37,3333	0,7388	0,0035	0,0020
36	36,1000	0,7134	35,4000	0,6996	36,9000	0,7321	36,1333	0,7150	0,0163	0,0094
38	35,2000	0,6957	33,1000	0,6542	32,6000	0,6468	33,6333	0,6656	0,0263	0,0152
40	33,1000	0,6542	32,8000	0,6482	31,5000	0,6250	32,4667	0,6425	0,0154	0,0089
45	32,9000	0,6502	29,4000	0,5810	28,4000	0,5635	30,2333	0,5983	0,0458	0,0265
50	28,4000	0,5613	25,3000	0,5000	26,1000	0,5179	26,6000	0,5264	0,0315	0,0182
60	20,7000	0,4091	18,2000	0,3597	21,7000	0,4306	20,2000	0,3997	0,0363	0,0210

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.3.2 - Fotodegradação do etilbenzeno sob luz ultravioleta com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,4000	1,0000	50,2000	1,0000	50,7000	1,0000	50,4333	1,0000	0,0000	0,0000
30	40,9000	0,8115	41,3000	0,8227	39,2000	0,7732	40,4667	0,8024	0,0260	0,0150
32	38,6000	0,7659	37,6000	0,7490	37,6000	0,7416	37,9333	0,7521	0,0124	0,0072
34	35,4000	0,7024	36,4000	0,7251	36,1000	0,7120	35,9667	0,7132	0,0114	0,0066
36	34,1000	0,6766	33,4000	0,6653	35,6000	0,7022	34,3667	0,6814	0,0189	0,0109
38	33,6000	0,6667	32,4000	0,6454	32,1000	0,6331	32,7000	0,6484	0,0170	0,0098
40	32,4000	0,6429	31,4000	0,6255	31,8000	0,6272	31,8667	0,6319	0,0096	0,0055
45	25,4000	0,5040	22,6000	0,4502	28,4000	0,5602	25,4667	0,5050	0,0550	0,0317
50	22,3000	0,4425	18,6000	0,3705	23,1000	0,4556	21,3333	0,4230	0,0458	0,0264
60	15,9000	0,3155	13,4000	0,2669	19,7000	0,3886	16,3333	0,3239	0,0612	0,0353

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.3.3 - Fotodegradação do tolueno sob luz ultravioleta com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,1000	1,0000	49,8000	1,0000	50,6000	1,0000	50,1667	1,0000	0,0000	0,0000
30	42,6000	0,8503	40,2000	0,8072	40,9000	0,8083	41,2333	0,8219	0,0246	0,0142
32	39,6000	0,7904	37,3000	0,7490	38,4000	0,7589	38,4333	0,7661	0,0216	0,0125
34	36,3000	0,7246	35,4000	0,7108	37,2000	0,7352	36,3000	0,7236	0,0122	0,0070
36	34,9000	0,6966	33,7000	0,6767	33,1000	0,6542	33,9000	0,6757	0,0212	0,0123
38	33,1000	0,6607	32,9000	0,6606	31,5000	0,6225	32,5000	0,6478	0,0220	0,0127
40	30,1000	0,6008	29,3000	0,5884	28,9000	0,5711	29,4333	0,5867	0,0149	0,0086
45	26,1000	0,5210	24,1000	0,4839	22,3000	0,4407	24,1667	0,4817	0,0402	0,0232
50	21,9000	0,4371	19,6000	0,3936	18,6000	0,3676	20,0333	0,3993	0,0351	0,0203
60	18,4000	0,3673	15,2000	0,3052	14,7000	0,2905	16,1000	0,3209	0,0407	0,0235

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.3.4 - Fotodegradação do benzeno sob luz ultravioleta com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,3000	1,0040	50,6000	1,0161	50,4000	0,9960	50,4333	1,0000	0,0101	0,0058
30	41,2000	0,8224	39,6000	0,7952	40,5000	0,8004	40,4333	0,8017	0,0144	0,0083
32	40,3000	0,8044	38,5000	0,7731	39,6000	0,7826	39,4667	0,7826	0,0160	0,0093
34	38,9000	0,7764	36,4000	0,7309	37,4000	0,7391	37,5667	0,7449	0,0243	0,0140
36	36,3000	0,7246	35,2000	0,7068	35,1000	0,6937	35,5333	0,7046	0,0155	0,0089
38	35,4000	0,7066	30,2000	0,6064	33,4000	0,6601	33,0000	0,6543	0,0501	0,0289
40	32,6000	0,6507	29,4000	0,5904	31,4000	0,6206	31,1333	0,6173	0,0302	0,0174
45	30,4000	0,6068	25,6000	0,5141	28,6000	0,5652	28,2000	0,5592	0,0464	0,0268
50	25,6000	0,5110	20,4000	0,4096	24,1000	0,4763	23,3667	0,4633	0,0515	0,0297
60	20,6000	0,4112	18,6000	0,3735	19,4000	0,3834	19,5333	0,3873	0,0195	0,0113

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

APENDICE 4 – ISOTERMA DE ADSORÇÃO DE BTEX

Tabela A.3.1 – Isoterma de adsorção de xileno sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

Concentração final(mg/L)	Quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g)
39,3667	26,5833
29,4333	26,4167
20,5333	23,6667
12,4000	19,0000
6,0000	10,0000
3,0000	5,0000

Tabela A.3.2 – Isoterma de adsorção de etilbenzeno sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

Concentração final(mg/L)	Quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g)
39,1000	27,2500
29,7000	25,7500
20,3667	24,0833
12,0667	19,8333
5,2333	11,9167
2,8000	5,5000

Tabela A.3.2 – Isoterma de adsorção de tolueno sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

Concentração final(mg/L)	Quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g)
40,03	24,9167
30,30	24,2500
21,47	21,3333
13,40	16,5000
5,03	12,4167
2,07	7,3333

Tabela A.3.2 – Isoterma de adsorção de benzeno sobre $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4(\text{s})$.

Concentração final(mg/L)	Quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g)
39,60	24,7500
31,10	23,3333
20,90	19,6667
13,80	17,5833
5,90	13,4167
2,40	7,2500

APENDICE 5 – FOTOCATÁLISE UV/VIS SOBRE BTEX Ag₂MoO₄/Ag₃PO₄/Grafeno

Tabela A.5.1 – Fotocatálise do xileno sob luz ultravioleta com Ag₂MoO₄/Ag₃PO₄/Grafeno

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,3000	1,0000	51,1000	1,0000	50,2000	1,0000	50,5333	1,0000	0,0000	0,0000
30	41,2000	0,8191	42,1000	0,8239	40,2000	0,8008	41,1667	0,8146	0,0122	0,0070
32	40,2000	0,7992	40,3000	0,7886	39,4000	0,7849	39,9667	0,7909	0,0074	0,0043
34	35,9000	0,7137	34,1000	0,6673	36,8000	0,7331	35,6000	0,7045	0,0338	0,0195
36	30,4000	0,6044	29,4000	0,5753	27,6000	0,5498	29,1333	0,5765	0,0273	0,0158
38	24,3000	0,4831	22,1000	0,4325	25,1000	0,5000	23,8333	0,4716	0,0351	0,0203
40	22,1000	0,4394	20,5000	0,4012	21,9000	0,4363	21,5000	0,4255	0,0212	0,0122
45	15,4000	0,3062	13,9000	0,2720	14,9000	0,2968	14,7333	0,2916	0,0176	0,0102
50	13,1000	0,2604	11,8000	0,2309	12,3000	0,2450	12,4000	0,2454	0,0148	0,0085
60	10,8000	0,2147	8,6000	0,1683	7,6000	0,1514	9,0000	0,1781	0,0328	0,0189

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.5.2 – Fotodegradação do etil benzeno sob luz ultravioleta com Ag₂MoO₄/Ag₃PO₄/Grafeno

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,6000	1,0000	50,1000	1,0000	50,7000	1,0000	50,4667	1,0000	0,0000	0,0000
30	41,8000	0,8261	40,2000	0,8024	40,9000	0,8067	40,9667	0,8118	0,0126	0,0073
32	42,1000	0,8320	39,9000	0,7964	39,1000	0,7712	40,3667	0,7999	0,0306	0,0176
34	41,2000	0,8142	38,4000	0,7665	37,8000	0,7456	39,1333	0,7754	0,0352	0,0203
36	33,2000	0,6561	32,4000	0,6467	34,7000	0,6844	33,4333	0,6625	0,0196	0,0113
38	27,4000	0,5415	28,4000	0,5669	29,4000	0,5799	28,4000	0,5627	0,0195	0,0113
40	23,8000	0,4704	22,1000	0,4411	25,1000	0,4951	23,6667	0,4690	0,0270	0,0156
45	19,4000	0,3834	15,2000	0,3034	17,5000	0,3452	17,3667	0,3441	0,0400	0,0231
50	13,4000	0,2648	10,2000	0,2036	12,4000	0,2446	12,0000	0,2378	0,0312	0,0180
60	7,2000	0,1423	8,6000	0,1717	9,6000	0,1893	8,4667	0,1678	0,0238	0,0137

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.5.3 – Fotodegradação do tolueno sob luz ultravioleta com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	51,2000	1,0000	50,9000	1,0000	51,2000	1,0000	51,1000	1,0000	0,0000	0,0000
30	41,2000	0,8047	40,2000	0,7898	40,9000	0,7988	40,7667	0,7978	0,0075	0,0043
32	38,9000	0,7598	39,1000	0,7682	39,6000	0,7734	39,2000	0,7671	0,0069	0,0040
34	35,1000	0,6855	38,6000	0,7583	36,1000	0,7051	36,6000	0,7162	0,0377	0,0218
36	30,1000	0,5879	33,4000	0,6562	32,6000	0,6367	32,0333	0,6269	0,0352	0,0203
38	28,4000	0,5547	30,3000	0,5953	29,3000	0,5723	29,3333	0,5740	0,0204	0,0118
40	25,1000	0,4902	28,3000	0,5560	24,3000	0,4746	25,9000	0,5068	0,0432	0,0249
45	18,6000	0,3633	20,4000	0,4008	20,3000	0,3965	19,7667	0,3868	0,0205	0,0118
50	12,3000	0,2402	15,6000	0,3065	15,3000	0,2988	14,4000	0,2818	0,0362	0,0209
60	10,9000	0,2129	12,6000	0,2475	12,6000	0,2461	12,0333	0,2355	0,0196	0,0113

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.5.4 – Fotodegradação do benzeno sob luz ultravioleta com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,4000	1,0000	50,7000	1,0000	50,5000	1,0000	50,5333	1,0000	0,0000	0,0000
30	40,6000	0,8056	41,8000	0,8245	39,7000	0,7861	40,7000	0,8054	0,0192	0,0111
32	36,1000	0,7163	37,4000	0,7377	35,8000	0,7089	36,4333	0,7210	0,0149	0,0086
34	33,6000	0,6667	35,6000	0,7022	32,4000	0,6416	33,8667	0,6702	0,0304	0,0176
36	28,4000	0,5635	25,7000	0,5069	27,8000	0,5505	27,3000	0,5402	0,0296	0,0171
38	23,1000	0,4583	22,6000	0,4458	23,7000	0,4693	23,1333	0,4578	0,0118	0,0068
40	18,6000	0,3690	15,8000	0,3116	19,8000	0,3921	18,0667	0,3575	0,0414	0,0239
45	12,3000	0,2440	10,4000	0,2051	15,9000	0,3149	12,8667	0,2546	0,0556	0,0321
50	10,2000	0,2024	9,4000	0,1854	13,4000	0,2653	11,0000	0,2177	0,0421	0,0243
60	8,1000	0,1607	7,3000	0,1440	10,3000	0,2040	8,5667	0,1695	0,0309	0,0179

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.5.5 – Fotodegradação do xileno sob luz visível com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,3000	1,0000	50,1000	1,0000	49,9000	1,0000	50,1000	1,0000	0,0000	0,0000
30	40,2000	0,7992	41,3000	0,8244	39,6000	0,7936	40,3667	0,8057	0,0164	0,0095
32	30,1000	0,5984	32,5000	0,6487	29,6000	0,5932	30,7333	0,6134	0,0307	0,0177
34	22,1000	0,4394	23,9000	0,4770	20,3000	0,4068	22,1000	0,4411	0,0351	0,0203
36	18,6000	0,3698	17,6000	0,3513	15,6000	0,3126	17,2667	0,3446	0,0292	0,0168
38	12,6000	0,2505	11,2000	0,2236	10,2000	0,2044	11,3333	0,2262	0,0232	0,0134
40	5,3000	0,1054	4,5000	0,0898	4,1000	0,0822	4,6333	0,0925	0,0118	0,0068
45	1,2000	0,0239	1,1000	0,0220	0,9000	0,0180	1,0667	0,0213	0,0030	0,0017
50	0,0200	0,0004	0,0100	0,0002	0,0300	0,0006	0,0200	0,0004	0,0002	0,0001
60	0,0300	0,0006	0,0200	0,0004	0,0100	0,0002	0,0200	0,0004	0,0002	0,0001

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.5.6 – Fotodegradação do etil benzeno sob luz visível com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,2000	1,0000	50,9000	1,0000	49,8000	1,0000	50,3000	1,0000	0,0000	0,0000
30	41,2000	0,8207	40,2000	0,7898	40,8000	0,8193	40,7333	0,8098	0,0175	0,0101
32	32,5000	0,6474	30,2000	0,5933	31,2000	0,6265	31,3000	0,6223	0,0273	0,0157
34	25,3000	0,5040	26,3000	0,5167	23,6000	0,4739	25,0667	0,4983	0,0220	0,0127
36	15,6000	0,3108	17,5000	0,3438	16,4000	0,3293	16,5000	0,3280	0,0166	0,0096
38	10,3000	0,2052	12,5000	0,2456	11,4000	0,2289	11,4000	0,2266	0,0203	0,0117
40	4,3000	0,0857	4,1000	0,0806	5,3000	0,1064	4,5667	0,0908	0,0137	0,0079
45	1,1000	0,0219	0,9000	0,0177	0,8000	0,0161	0,9333	0,0186	0,0030	0,0017
50	0,0400	0,0008	0,0200	0,0004	0,0200	0,0004	0,0267	0,0005	0,0002	0,0001
60	0,0200	0,0004	0,0100	0,0002	0,0100	0,0002	0,0133	0,0003	0,0001	0,0001

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.5.7 – Fotodegradação do tolueno sob luz visível com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,3000	1,0000	50,7000	1,0000	50,3000	1,0000	50,4333	1,0000	0,0000	0,0000
30	41,2000	0,8191	39,7000	0,7830	40,3000	0,8012	40,4000	0,8011	0,0180	0,0104
32	28,9000	0,5746	25,3000	0,4990	26,9000	0,5348	27,0333	0,5360	0,0378	0,0218
34	20,4000	0,4056	19,6000	0,3866	21,3000	0,4235	20,4333	0,4052	0,0184	0,0106
36	14,6000	0,2903	12,5000	0,2465	13,6000	0,2704	13,5667	0,2690	0,0219	0,0126
38	9,6000	0,1909	8,3000	0,1637	8,4000	0,1670	8,7667	0,1738	0,0148	0,0086
40	3,5000	0,0696	2,5000	0,0493	2,4000	0,0477	2,8000	0,0555	0,0122	0,0070
45	1,1000	0,0219	0,7000	0,0138	0,9000	0,0179	0,9000	0,0178	0,0040	0,0023
50	0,0200	0,0004	0,0100	0,0002	0,0200	0,0004	0,0167	0,0003	0,0001	0,0001
60	0,0100	0,0002	0,0200	0,0004	0,0300	0,0006	0,0200	0,0004	0,0002	0,0001

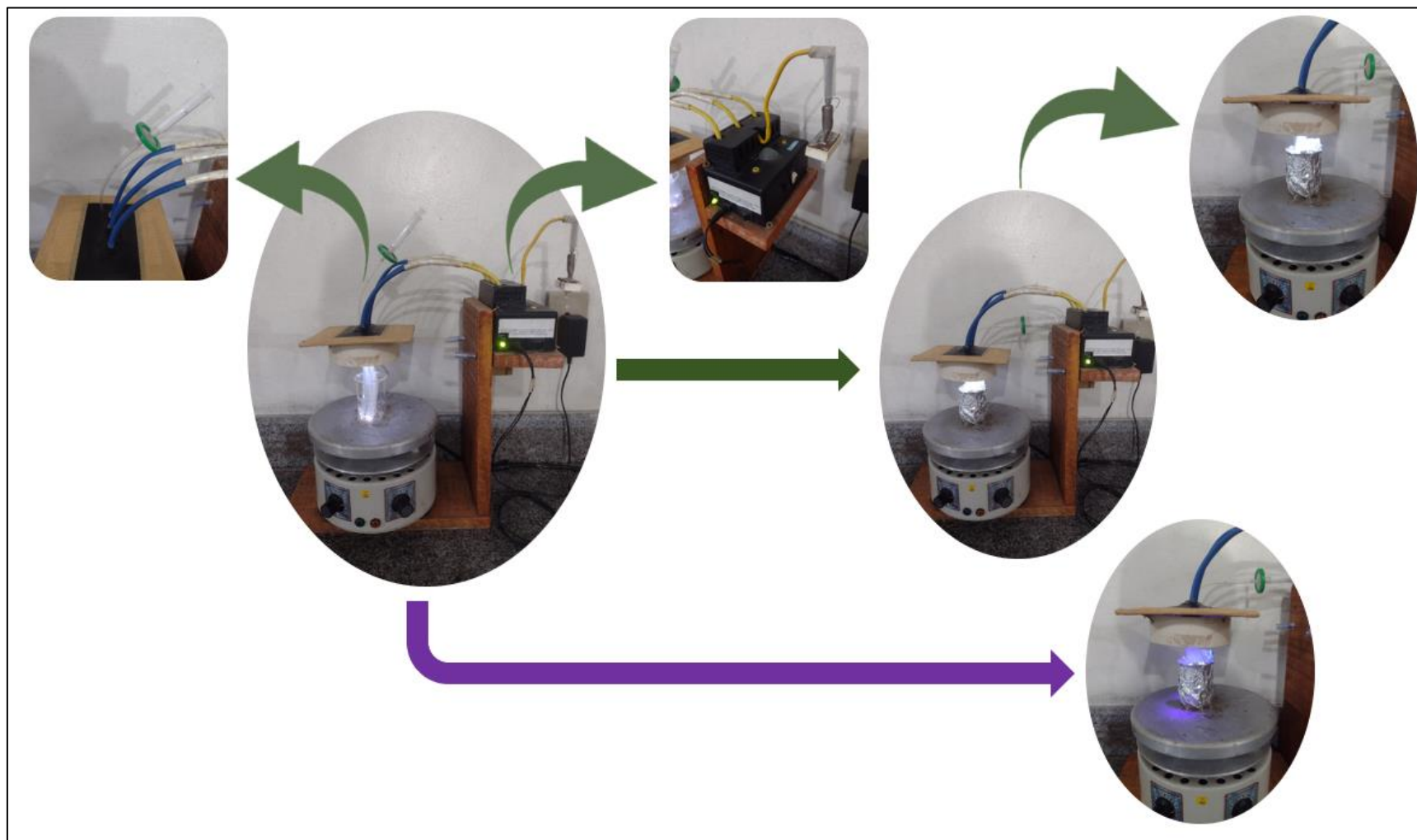
C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

Tabela A.5.7 – Fotodegradação do benzeno sob luz visível com $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Grafeno}$

tempo (min)	Co	C/C0	Co	C/C0	Co	C/C0	M.C	M-C/C ₀	D.P	Erro
0	50,1000	1,0000	50,2000	1,0000	50,8000	1,0000	50,3667	1,0000	0,0000	0,0000
30	40,2000	0,8024	38,9000	0,7749	40,5000	0,7972	39,8667	0,7915	0,0146	0,0084
32	25,6000	0,5110	26,3000	0,5239	25,6000	0,5039	25,8333	0,5129	0,0101	0,0058
34	19,6000	0,3912	17,9000	0,3566	18,5000	0,3642	18,6667	0,3706	0,0182	0,0105
36	13,4000	0,2675	12,4000	0,2470	14,6000	0,2874	13,4667	0,2674	0,0202	0,0117
38	7,5000	0,1497	5,6000	0,1116	6,5000	0,1280	6,5333	0,1297	0,0191	0,0110
40	2,2000	0,0439	3,2000	0,0637	1,2000	0,0236	2,2000	0,0437	0,0201	0,0116
45	0,6000	0,0120	0,5000	0,0100	0,4000	0,0079	0,5000	0,0099	0,0021	0,0012
50	0,0200	0,0004	0,0200	0,0004	0,0100	0,0002	0,0167	0,0003	0,0001	0,0001
60	0,0100	0,0002	0,0100	0,0002	0,0100	0,0002	0,0100	0,0002	0,0000	0,0000

C = concentração; M.C = média das concentrações; M-C/C₀ = média da concentração final pela inicial; D.P = desvio padrão, Erro = erro médio calculado.

APENDICE 6 – REATOR FOTOCATALÍTICO.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.