

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE

LIDIENE DA PENHA SOUSA

Tecnologia Sustentável e Educação Ambiental: Fotocatálise heterogênea com semicondutor PANI/(TiO₂)

Goiânia, 2025.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☒ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☐ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Lidiene da Penha Sousa

Matrícula: 2023.2011.280.301

Título do Trabalho: Tecnologia Sustentável e Educação Ambiental: Fotocatálise heterogênea com semicondutor PANI/(TiO₂)

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 14/ 03/2026.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE

LIDIENE DA PENHA SOUSA

Tecnologia Sustentável e Educação Ambiental: Fotocatálise heterogênea com semicondutor PANI/(TiO₂)

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia e gerenciamento de resíduos.

Orientadora: Profa. Dr^a. Lidiaine Maria dos Santos

Coorientadores: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira e Profa. Dr^a. Ana Clara de Oliveira Ferraz Barbosa

Goiânia, 2025.

S725t Sousa, Lidiene da Penha.

Tecnologia sustentável e educação ambiental: fotocatalise heterogênea com semicondutor PANI/(TiO₂) / Lidiene da Penha Sousa – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2025.
109 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira.

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Clara de Oliveira Ferraz Barbosa.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Fotocatálise heterogênea. 2. Tratamento de efluentes industriais. 3. Polianilina (PANI). 4. Dióxido de titânio (TiO₂). I. Santos, Lidiaine Maria dos (orientadora). II. Oliveira, Sérgio Botelho de (coorientador). III. Barbosa, Ana Clara de Oliveira Ferraz (coorientadora). IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. V. Título.

CDD 628.168

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 39/2025 - GYN-CMTGS/GYN-GPPEX/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE**

LIDIENE DA PENHA SOUSA

**TECNOLOGIA SUSTENTÁVEL E EDUCAÇÃO AMBIENTAL: FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA COM
SEMICONDUTOR PANI/(TiO₂)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia,
Gestão e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.
Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa.
Linha de Pesquisa: Tecnologia e Gerenciamento de Resíduos

Aprovação em 05 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Presidente e orientadora: Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos - PPGTGS IFG
Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira - PPGTGS IFG
Coorientadora: Profa. Dra. Ana Clara de Oliveira Ferraz Barbosa - IFG-Câmpus Goiânia
Avaliador: Prof. Dr. Thiago Eduardo Pereira Alves - PPGTGS IFG
Avaliadora: Profa. Dra. Maria Rita de Cássia Santos - UFCat, Catalão - GO

Documento assinado eletronicamente por:

- **Maria Rita de Cássia Santos**, Maria Rita de Cássia Santos - Docente - Universidade Federal de Catalão (35834377000120), em 05/02/2026 16:00:42.
- **Ana Clara de Oliveira Ferraz Barbosa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/12/2025 10:52:53.
- **Sergio Botelho de Oliveira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/12/2025 15:36:33.
- **Thiago Eduardo Pereira Alves**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/12/2025 13:26:04.
- **Lidiaine Maria dos Santos**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/12/2025 18:46:06.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/12/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 723825

Código de Autenticação: bf099d5a2b



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
Sem Telefones cadastrados

Dedicatória

Dedico este trabalho àqueles que, com amor, paciência e compreensão, estiveram ao meu lado em cada passo desta jornada.

À minha família, por seu apoio incondicional e incentivo constante, que foram fundamentais para a realização deste sonho.

Aos amigos, que compartilharam comigo momentos de alegria e desafios, e aos professores e colegas, cuja sabedoria e colaboração enriqueceram minha caminhada acadêmica.

Esta conquista é, em parte, reflexo do carinho e da força que recebi de todos vocês.

Agradecimentos

A Deus, pela força, inspiração e bênçãos concedidas ao longo desta jornada, iluminando meu caminho nos momentos desafiadores e guiando minhas decisões.

À minha orientadora, Dra. Lidiaine Maria dos Santos, pela paciência, dedicação e pela orientação precisa, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e por não ter medido esforços em todo o processo.

Aos coorientadores, Dr. Sérgio Botelho de Oliveira e Dra. Ana Clara de Oliveira Ferraz Barbosa, pelas valiosas contribuições, ensinamentos e suporte técnico e científico que enriqueceram essa pesquisa.

Agradeço à professora Dra. Fabiana Gomes pelas contribuições e pelo auxílio, especialmente na parte da Taxonomia de Bloom.

Agradeço à professora Dra. Fernanda Melo Carneiro (UEG) pela valorosa contribuição para os experimentos durante a pesquisa.

Agradeço à banca examinadora pela participação e pelas significativas contribuições para o meu aprendizado.

Sou grata à coordenação e aos professores do programa por criarem um ambiente inspirador e enriquecedor, focado no aprendizado e no desenvolvimento constante. Estendo o meu agradecimento ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade (Mestrado Profissional) pela oportunidade de desenvolver este estudo.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro, essencial para a realização das atividades e para os resultados alcançados.

À minha mãe, Maria, e aos demais familiares pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pelas palavras de encorajamento que me impulsionaram a continuar. Vocês são minha base e razão para seguir em frente.

Ao meu amado, Markos Vinícius, pelo apoio, pelas incontáveis colaborações e por ter sido minha inspiração e força.

Aos colegas de laboratório: Mateus, Isadora, Paulo, Aline e Amábile, pela parceria e colaboração nas práticas laboratoriais.

A todos, minha mais sincera gratidão!

"Se vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes."

Isaac Newton,
Newton, I. Carta a Robert Hooke, 1675.

Resumo

Título: Tecnologia Sustentável e Educação Ambiental: Fotocatálise heterogênea com semicondutor PANI/(TiO₂)

Autor: Lidiene da Penha Sousa

Orientadora: Dr^a. Lidiaine Maria dos Santos

Coorientadores: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira e Profa. Dr^a. Ana Clara de Oliveira Ferraz Barbosa

A crescente preocupação com os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado de efluentes industriais tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o tratamento de águas residuais. Entre essas tecnologias, destaca-se a fotocatálise heterogênea, um processo avançado de oxidação baseado na ativação de semicondutores sob irradiação UV-Vis, capaz de promover a degradação de compostos orgânicos recalcitrantes. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar compósitos de polianilina (PANI) e dióxido de titânio (TiO₂), visando à aplicação na fotodegradação do corante sintético Ponceau 4R, frequentemente presente em efluentes das indústrias têxtil, alimentícia e cosmética. Adicionalmente, foi elaborada uma proposta pedagógica alinhada à BNCC e à Taxonomia de Bloom, fundamentada em experimentação guiada, problematização e produção de recursos didáticos, de modo a favorecer a compreensão de conceitos científicos e a sensibilização para temáticas socioambientais. No âmbito do tratamento de efluentes, o semicondutor TiO₂ é amplamente estudado por sua estabilidade química e baixo custo. Embora frequentemente empregado em aplicações fotocatalíticas, o TiO₂ apresenta limitações relacionadas à baixa resposta sob radiação visível e à elevada taxa de recombinação dos pares elétron-buraco fotogerados. Essas restrições podem ser mitigadas por modificações no material, incluindo sua associação com outros componentes e o ajuste da composição de fases cristalinas, como a introdução de uma fração controlada de rutilo em uma matriz predominantemente anatásica, o que pode favorecer a separação e a migração de cargas. Nessa perspectiva, propôs-se a obtenção do compósito TiO₂/PANI, no qual a PANI, por apresentar caráter semicondutor e condutivo, amplia a absorção na região do visível e atua como meio de transporte de carga, contribuindo para reduzir a recombinação e aumentar a eficiência fotocatalítica. Foram obtidos compósitos

PANI/TiO₂ nas proporções 1:1, 2:1 e 1:2, os quais foram caracterizados por FTIR, DRX, DRS/UV-Vis (curvas de Tauc), TG/DSC, MET e Raman. A análise TG/DSC indicou intensa perda de massa inicial atribuída à desidratação e à remoção de resíduos da síntese, com evento de cristalização em torno de 270 °C (anatase) e indício discreto de transformação anatase→rutilo próximo de 450 °C (~ 3%), o que pode estar associado ao desempenho de fotodegradação e ao melhor resultado observado na proporção (PANI:TiO₂ 2:1), que se destacou tanto nas caracterizações quanto nos ensaios fotocatalíticos. As análises estruturais (DRX) indicaram TiO₂ predominantemente na fase anatase e, nos compósitos, evidenciaram alterações na cristalinidade e no tamanho de cristalito compatíveis com a incorporação da PANI. A espectroscopia Raman corroborou a presença de anatase e indicou interação interfacial com a PANI. As medidas ópticas (DRS/Tauc) demonstraram redução do *band gap* nos compósitos em relação ao TiO₂ puro. As micrografias de MET revelaram morfologias distintas, próximas de esféricas, com boa dispersão e homogeneidade, e diâmetros médios sub-10 nm. O conjunto das caracterizações (DRX, MET, FTIR e Raman) evidenciou características mais favoráveis ao desempenho fotocatalítico na proporção 2:1 (PANI:TiO₂). Nos ensaios de adsorção e fotocátalise com Ponceau 4R, essa mesma proporção apresentou a maior eficiência de degradação (99,73%) e a maior constante aparente de velocidade ($k = 0,05180 \text{ min}^{-1}$). As proporções 1:1 e 1:2 exibiram eficiências semelhantes (98,30% e 98,35%, respectivamente), sendo que 1:2 apresentou melhor ajuste ao modelo de pseudo-primeira ordem ($R_{\text{ajustado}}^2 = 0,9923$). Como controle, a fotólise direta mostrou-se pouco eficaz, confirmando a necessidade do fotocatalisador para a remoção eficiente do corante. Conclui-se que a associação de TiO₂ com PANI constitui uma estratégia promissora para a obtenção de fotocatalisadores eficientes e sustentáveis, contribuindo para o avanço de tecnologias limpas e, simultaneamente, oferecendo suporte a uma abordagem formativa voltada à educação e à sustentabilidade, com ênfase em atividades investigativas, reflexão crítica e desenvolvimento de materiais de apoio didático.

Palavras-chave

Fotocatálise heterogênea, Tratamento de efluentes; Materiais híbridos; Educação Científica Interdisciplinar.

Abstract

Title: Sustainable Technology and Environmental Education: Heterogeneous photocatalysis with semiconductor PANI/(TiO₂)

Author: Lidiene da Penha Sousa

Advisor: Dr^a. Lidiaine Maria dos Santos

Coadvisors: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira and Prof. Dr^a. Ana Clara de Oliveira Ferraz Barbosa

Growing concern about the environmental impacts resulting from the improper disposal of industrial effluents has driven the development of sustainable technologies for wastewater treatment. Among these technologies, heterogeneous photocatalysis stands out as an advanced oxidation process based on the activation of semiconductors under UV–Vis irradiation, enabling the degradation of recalcitrant organic compounds. In this context, this study aimed to develop and evaluate polyaniline (PANI) and titanium dioxide (TiO₂) composites for application in the photodegradation of the synthetic dye Ponceau 4R, which is frequently present in effluents from the textile, food, and cosmetic industries. In addition, a pedagogical proposal aligned with the Brazilian National Common Core Curriculum (BNCC) and Bloom's Taxonomy was developed, grounded in guided experimentation, problematization, and the production of educational resources, in order to foster the understanding of scientific concepts and raise awareness of socio-environmental issues. Within the scope of effluent treatment, the TiO₂ semiconductor has been widely studied due to its chemical stability and low cost. Although frequently employed in photocatalytic applications, TiO₂ presents limitations related to its low response under visible radiation and the high recombination rate of photogenerated electron–hole pairs. These restrictions can be mitigated through material modifications, including coupling with other components and adjusting the crystalline phase composition, such as introducing a controlled rutile fraction into a predominantly anatase matrix, which may favor charge separation and migration. From this perspective, the TiO₂/PANI composite was proposed, in which PANI, owing to its semiconducting and conductive character, broadens absorption in the visible region and acts as a charge-transport medium, contributing to reduced recombination and enhanced photocatalytic efficiency. PANI/TiO₂ composites were obtained at 1:1, 2:1, and

1:2 ratios and characterized by FTIR, XRD, UV–Vis DRS (Tauc plots), TG/DSC, TEM, and Raman. TG/DSC analysis indicated an intense initial mass loss attributed to dehydration and removal of synthesis residues, with a crystallization event around 270 °C (anatase) and a subtle indication of anatase→rutile transformation near 450 °C ($\sim 3\%$), which may be associated with the photodegradation performance and with the best result observed for the 2:1 (PANI:TiO₂) ratio, which stood out in both characterizations and photocatalytic tests. Structural analyses (XRD) indicated TiO₂ predominantly in the anatase phase and, in the composites, revealed changes in crystallinity and crystallite size consistent with PANI incorporation. Raman spectroscopy corroborated the presence of anatase and indicated interfacial interaction with PANI. Optical measurements (DRS/Tauc) showed a reduction in the *band gap* in the composites relative to pristine TiO₂. TEM micrographs revealed distinct, near-spherical morphologies with good dispersion and homogeneity, and sub-10 nm average diameters. The set of characterizations (XRD, TEM, FTIR, and Raman) evidenced features more favorable to photocatalytic performance for the 2:1 (PANI:TiO₂) ratio. In adsorption and photocatalysis assays with Ponceau 4R, this same ratio achieved the highest degradation efficiency (99.73%) and the highest apparent rate constant ($k = 0.05180 \text{ min}^{-1}$). The 1:1 and 1:2 ratios exhibited similar efficiencies (98.30% and 98.35%, respectively), whereas 1:2 provided the best fit to the pseudo-first-order model (adjusted $R^2 = 0.9923$). As a control, direct photolysis proved poorly effective, confirming the need for the photocatalyst for efficient dye removal. It is concluded that coupling TiO₂ with PANI is a promising strategy for producing efficient and sustainable photocatalysts, contributing to the advancement of clean technologies and, simultaneously, supporting an educational approach focused on education and sustainability, with an emphasis on investigative activities, critical reflection, and the development of didactic support materials.

Keywords

Heterogeneous photocatalysis; Effluent treatment; Hybrid materials; Interdisciplinary science education.

Lista de Figuras

Figura 1	– Estruturas cristalinas do TiO_2	29
Figura 2	– Três formas de oxidação da PANI.....	32
Figura 3	– Estrutura química do Ponceau 4R	34
Figura 4	– Componentes do sistema de tratamento térmico hidrotérmico	38
Figura 5	– Esquema ilustrativo do sistema de fotocatálise	48
Figura 6	– Análise termogravimétrica do TiO_2 puro.	52
Figura 7	– Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) – TiO_2 puro .	54
Figura 8	– Microscopia Eletrônica de Transmissão – PANI/ TiO_2 (2:1) ..	54
Figura 9	– Histograma MET (TiO_2) puro	55
Figura 10	– Histograma MET compósito PANI/ TiO_2 (2:1).....	55
Figura 11	– Microscopia Eletrônica de Transmissão – TiO_2 puro	57
Figura 12	– Microscopia Eletrônica de Transmissão – PANI/ TiO_2 (2:1)..	57
Figura 13	– Difratogramas de raios X dos materiais sintetizados	58
Figura 14	– Espectros de infravermelho obtidos	63
Figura 15	– Espectros Raman.....	65
Figura 16	– Reflectância Difusa – TiO_2 puro	68
Figura 17	– Reflectância Difusa – PANI	68
Figura 18	– Reflectância Difusa – PANI/ TiO_2 (2:1).....	69
Figura 19	– Absorbância normalizada em função do tempo	71
Figura 20	– Avaliação da adsorção dos fotocatalisadores sintetizados.....	73
Figura 21	– Ajuste linear dos dados experimentais.....	76
Figura 22	– Ficha cristalográfica JCPDS para o polimorfo anatase.	108
Figura 23	– Ficha cristalográfica JCPDS para o polimorfo rutilo.....	109

Lista de Tabelas

Tabela 1	– Ácidos prótônicos e agentes oxidantes – (PANI).....	33
Tabela 2	– Comparação (TiO ₂) – comercial X sintetizado	37
Tabela 3	– Parâmetros experimentais análise óptica (UEG)	46
Tabela 4	– Análise dos difratogramas de raios X (DRX)	59
Tabela 5	– Tamanhos de cristalitos	60
Tabela 6	– Resumo das principais bandas	64
Tabela 7	– Resumo dos valores obtidos de <i>band gap</i>	67
Tabela 8	– Cronograma geral de atividades	87

Lista de Quadros

Quadro 1	–	Reagentes e materiais utilizados na síntese do TiO_2	39
Quadro 2	–	Condições experimentais para síntese do PANI/ TiO_2	42
Quadro 3	–	Comparação da eficiência de degradação e cinética	75

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivo Geral	21
1.3	Objetivos Específicos.....	21
2	Referencial Teórico	23
2.1	Efluentes	23
2.2	Fotocatálise heterogênea	27
2.3	Dióxido de Titânio	28
2.4	Síntese hidrotermal do dióxido de titânio	30
2.5	Polianilina (PANI)	31
2.6	Corante – Ponceau 4R	33
3	Metodologia	36
3.1	Metodologia dióxido de titânio.....	36
3.2	Metodologia da síntese da Polianilina/PANI.....	40
3.3	Adsorção de TiO ₂ com PANI	41
3.4	Caracterização do Material	42
3.4.1	Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica (DTA/DSC).....	43
3.4.2	Difração de Raios X (DRX).....	43
3.4.3	Espectroscopia no IV por Transformada de Fourier (FTIR).....	44
3.4.4	Metodologia para análise por Espectroscopia Raman	44
3.4.5	Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET).....	45
3.4.6	Análise óptica por Reflectância Difusa (UV-Vis/DRS) e determinação do <i>band gap</i>	46
3.5	Ensaio Fotocatalíticos	47
3.6	Ensaio de Adsorção	48
3.7	Metodologia para aplicação da Taxonomia de Bloom	49
4	Resultados e Discussão	51
4.1	Análise térmica	51
4.2	Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)	53
4.3	Análise por difração de raios X (DRX)	58
4.4	Análise por Espectroscopia no IV com Transformada de Fourier (FTIR) ..	61
4.5	Análise por Espectroscopia Raman	64
4.6	Reflectância Difusa (DRS)	66
4.7	Ensaio de fotodegradação do corante Ponceau 4R	69
4.7.1	Avaliação da influência da radiação fornecida	70

4.8	Avaliação da Adsorção dos fotocatalisadores	72
4.9	Análise dos Resultados de degradação e cinética	74
5	Aplicação da Taxonomia de Bloom no Ensino Interdisciplinar	78
5.1	Fundamentação Teórica e Taxonomia de Bloom	79
5.2	Objetivo Geral	82
5.2.1	Objetivos Específicos	82
5.3	Justificativa	83
5.4	Roteiro Metodológico Geral	83
5.4.1	Etapa 1: Sensibilização e Contexto (Todos os níveis)	84
5.4.2	Etapa 2: Introdução à Fotocatálise e Corante Ponceau 4R	84
5.4.3	Etapa 3: Modelagem e Impressão 3D (Níveis Diferenciados)	84
5.4.4	Etapa 4: Execução do Experimento Fotocatalítico	85
5.4.5	Etapa 5: Análise e Discussão dos Resultados (por nível)	85
5.4.6	Etapa 6: Apresentação de Resultados e Avaliação	86
5.5	Cronograma geral sugerido	87
5.6	Materiais e Recursos	87
5.7	Adequações e Extensões	88
5.8	Resultados Esperados	88
5.9	Considerações finais para a aplicação da Taxonomia de Bloom no ensino interdisciplinar	89
6	Conclusões	90
	Referências	92
	Anexo A – Fichas Cristalográficas	108

Introdução

A crescente demanda por recursos hídricos em um cenário de urbanização acelerada e industrialização resultou na intensificação da poluição de corpos d'água, especialmente por compostos orgânicos complexos, como corantes sintéticos. Esses poluentes, amplamente utilizados nas indústrias têxtil, alimentícia e cosmética, apresentam alta toxicidade e resistência à degradação, representando um desafio significativo para os métodos convencionais de tratamento de efluentes (Araújo *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias avançadas, como a fotocatalise heterogênea, surge como uma solução promissora, pois combina eficiência no tratamento com baixo impacto ambiental. Materiais semicondutores, como o dióxido de titânio (TiO_2), têm sido amplamente explorados devido à sua versatilidade e capacidade de degradar compostos orgânicos sob radiação ultravioleta (Araújo *et al.*, 2016). No entanto, a necessidade de superar limitações como a baixa absorção de luz visível e a rápida recombinação de cargas elétricas tem exigido o avanço de estratégias como a dopagem com elementos químicos e a incorporação com polímeros condutores. Tais abordagens abrem novas perspectivas para a fotocatalise no tratamento sustentável de águas residuais (Batista *et al.*, 2022).

A constante preocupação com os impactos ambientais e a preservação dos recursos hídricos tem demandado o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis para o tratamento de efluentes (Vargas *et al.*, 2018). Assim, o presente estudo, intitulado *Tecnologia sustentável e Educação Ambiental: Fotocatalise heterogênea com semicondutor PANI/TiO₂*, busca explorar a aplicação de materiais híbridos avançados no aprimoramento da eficiência de processos fotocatalíticos e contribuir com a educação ambiental ao estruturar práticas pedagógicas interdisciplinares baseadas na Taxonomia de Bloom, que podem possibilitar aos estudantes um avanço progressivo por diferentes níveis cognitivos.

Para superar limitações associadas à baixa absorção de luz visível do TiO_2 , investigou-se sua associação com a polianilina (PANI), um polímero condutor pertencente à classe dos Polímeros Intrinsecamente Condutores (PICs), que apresenta

propriedades únicas de transporte de cargas e estabilidade química. A combinação dessas estratégias visou desenvolver fotocatalisadores com maior eficiência na degradação do corante Ponceau 4R, atendendo às demandas por tecnologias mais eficazes e ambientalmente responsáveis.

A poluição por corantes sintéticos, como o Ponceau 4R, é um problema significativo devido à toxicidade, persistência e dificuldade de degradação desses compostos em ambientes aquáticos (Neto; Souza; Almeida, 2020).

Os resultados deste trabalho são baseados em análises estruturais e catalíticas. Essas características estruturais, combinadas, resultaram em uma sinergia que aprimorou a eficiência dos processos fotocatalíticos, oferecendo perspectivas promissoras para a aplicação desses materiais no tratamento de efluentes. Estratégia semelhante também foi desenvolvida por Vargas *et al.* (2018) em seu trabalho.

O presente trabalho se dedica à síntese e caracterização de materiais híbridos contendo polianilina e dióxido de titânio, utilizando ácido clorídrico (HCl) e persulfato de amônia $((\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8)$ para obter o compósito. O objetivo central é avaliar a eficácia fotocatalítica desses materiais na degradação do corante Ponceau 4R, buscando assim viabilizar técnicas alternativas e de baixo custo para a remoção de cor em efluentes industriais. A pesquisa apresenta uma análise detalhada dos dados obtidos, abrangendo tanto os parâmetros estruturais dos fotocatalisadores sintetizados quanto sua performance na degradação do corante, de modo a evidenciar o potencial desses resultados para o avanço de práticas de educação ambiental e para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis voltadas ao tratamento de efluentes industriais.

1.1 Justificativa

O descarte inadequado de efluentes contendo corantes sintéticos representa uma séria ameaça aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana, uma vez que tais compostos são recalcitrantes, tóxicos e resistentes à degradação por métodos convencionais. Diante disso, torna-se essencial o investimento em tecnologias sustentáveis e de alta eficiência, capazes de promover a remoção desses poluentes de forma ambientalmente responsável e compatível com as exigências dos sistemas naturais (Souza, 2023).

Vieira *et al.* (2016) demonstram que o corante Ponceau 4R, amplamente utilizado nas indústrias têxtil, alimentícia e cosmética, destaca-se como um poluente de alta estabilidade química, cuja remoção por processos físicos e biológicos apresenta baixa eficiência. Nesse cenário, a fotocatalise heterogênea se apresenta como alternativa tecnicamente eficiente e ambientalmente sustentável.

Apesar de amplamente utilizados, os métodos convencionais de tratamento de efluentes, como adsorção, troca iônica e filtração por carvão ativado, apresentam limitações significativas. Esses processos, em geral, apenas transferem os contaminantes para outra fase ou geram subprodutos tóxicos, exigindo etapas adicionais de tratamento (Heck *et al.*, 2019).

Além disso, são pouco eficazes na remoção de poluentes orgânicos recalcitrantes — como corantes sintéticos, fenóis e compostos halogenados — devido à baixa taxa de degradação e à limitada seletividade em sistemas complexos. Isso evidencia a necessidade de tecnologias que não apenas removam, mas convertam esses compostos tóxicos em subprodutos inofensivos de forma mais eficiente, sustentável e economicamente viável (Baloyi; Ntho; Moma, 2018; Parvulescu *et al.*, 2021).

Vale ressaltar que catalisadores convencionais utilizados no tratamento de efluentes, como óxidos metálicos simples ou metais suportados, frequentemente apresentam limitações estruturais e eletrônicas que comprometem sua eficiência em processos de degradação de poluentes orgânicos. Tais materiais, em geral, possuem baixa área superficial, distribuição irregular de fases ativas e mobilidade eletrônica reduzida, o que favorece a rápida recombinação dos pares elétron-buraco gerados durante reações fotoinduzidas, reduzindo significativamente a eficiência quântica do processo (Rodrigues *et al.*, 2019; Parvulescu *et al.*, 2021).

Além disso, suas estruturas cristalinas pouco ordenadas e bandas de energia mal ajustadas dificultam a ativação por luz visível, tornando-os ineficazes na degradação de compostos recalcitrantes, como fenóis, corantes sintéticos e pesticidas. Diante desses desafios, materiais semicondutores como o dióxido de titânio (TiO_2), especialmente na fase anatase, vêm sendo amplamente investigados devido à sua estabilidade, não toxicidade e estrutura cristalina favorável (Turkten *et al.*, 2023).

No entanto, a limitação do (TiO_2) quanto à absorção de luz visível pode ser superada por meio da associação com polímeros condutores, como a polianilina (PANI), que atua como mediador no transporte de cargas e amplia a faixa de absorção na luz visível. Essa combinação resulta em sistemas híbridos mais eficientes, sustentáveis e seletivos, como demonstrado por Baloyi, Ntho e Moma (2018), que observaram significativa melhoria na degradação de fenóis com o uso do compósito TiO_2 /PANI.

Além do avanço tecnológico promovido pela associação entre TiO_2 e polianilina (PANI), no tratamento de efluentes com corante Ponceau 4R, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável propostos pela ONU (2015), em especial o ODS 6 — Água Potável e Saneamento — e o ODS 12 — Consumo e Produção Sustentáveis, destaca-se também sua contribuição para a educação ambiental.

Essa abordagem atua como eixo estruturador de práticas pedagógicas inter-

disciplinares fundamentadas na Taxonomia de Bloom, ao permitir que os estudantes transitem por diferentes níveis cognitivos: desde a lembrança e compreensão dos impactos causados pelos poluentes (níveis lembrar e entender), até a aplicação prática do conhecimento científico, análise de dados experimentais, avaliação crítica de soluções sustentáveis e criação de propostas contextualizadas para o tratamento de efluentes. Com isso, fomenta-se uma aprendizagem significativa, crítica e voltada à formação de cidadãos conscientes e engajados com os desafios socioambientais contemporâneos (Conceição *et al.*, 2024).

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver uma tecnologia sustentável para tratar efluentes via fotocatalise heterogênea, utilizando um material híbrido à base de polianilina (PANI) e dióxido de titânio (TiO_2). Além de otimizar a degradação do corante Ponceau 4R, busca-se reduzir o impacto ambiental e promover a educação ambiental, estimulando a compreensão, aplicação e avaliação do conhecimento com base na Taxonomia de Bloom.

1.3 Objetivos Específicos

- Sintetizar e caracterizar materiais híbridos de polianilina (PANI) e dióxido de titânio, avaliando suas propriedades físicas, como morfologia, tamanho de partícula, área superficial específica, porosidade, estrutura cristalina, condutividade elétrica, estabilidade térmica, dispersão das fases no compósito e afinidade com a radiação visível.
- Avaliar a eficiência fotocatalítica dos compósitos híbridos na degradação do corante Ponceau 4R sob radiação UV/VIS, correlacionando o desempenho com as propriedades estruturais e ópticas dos materiais e com a proporção PANI: TiO_2 utilizada.
- Realizar a caracterização estrutural dos compósitos híbridos PANI/ TiO_2 por meio de técnicas como Difração de Raios X (DRX), a fim de identificar as fases cristalinas presentes e avaliar o grau de cristalinidade dos materiais obtidos.
- Avaliar as propriedades químicas e ópticas dos compósitos sintetizados por meio das técnicas de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Realizar a caracterização estrutural dos compósitos híbridos PANI/ TiO_2 através da espectroscopia Raman, a fim de identificar modos vibracionais característicos, confirmar as fases cristalinas presentes e avaliar possíveis interações interfaciais entre a PANI e o TiO_2 .

- Analisar as propriedades térmicas e ópticas dos materiais sintetizados por meio de análise termoanalítica (TGA/DSC) e espectroscopia UV-Vis de reflectância difusa (DRS), a fim de avaliar a estabilidade térmica, estimar a energia de *band gap* e determinar a capacidade de absorção na região do visível.
- Elaborar um método didático teórico-prático sobre tratamento de efluentes industriais, usando a Taxonomia de Bloom.
- Propor a capacitação e a conscientização ambiental dos estudantes do Ensino Fundamental I e II, Ensino Médio e Técnico, orientando-os por níveis progressivos de aprendizagem — desde a compreensão de conceitos básicos até a criação de soluções sustentáveis mais complexas.

Referencial Teórico

2.1 Efluentes

O tratamento de efluentes é fundamental para mitigar os impactos ambientais causados pelos resíduos provenientes de atividades industriais, especialmente nas indústrias têxtil, química e farmacêutica. O descarte inadequado desses resíduos pode causar danos irreversíveis aos ecossistemas aquáticos e terrestres, prejudicando a biodiversidade e a saúde humana (Ribeiro; Ferrari; Tavares, 2020). Nesse contexto, Pavani *et al.* (2022) destacam a importância do uso de nanopartículas como uma alternativa eficaz para reduzir os poluentes presentes nos efluentes industriais, promovendo a melhoria da qualidade da água.

Conforme os documentos da *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*, (Brasil, 2016) o Brasil, junto a outros países, assumiu o compromisso de tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos, que envolvem metas relacionadas à melhoria da qualidade da água, ao combate à poluição, à redução do despejo de produtos químicos perigosos, ao tratamento de efluentes e ao aumento da eficiência do uso da água, além de dobrar a proporção de águas residuais tratadas de acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 06 e 14 (Seixas *et al.*, 2020).

O tratamento de despejos contaminados por corantes pode envolver métodos biológicos e físico-químicos. Embora os processos biológicos sejam frequentemente utilizados devido ao baixo custo e à praticidade, eles apresentam limitações, como maior tempo de operação e alta sensibilidade às condições experimentais, além de serem ineficazes para altas concentrações de corantes, conforme Jain *et al.* (2021). Já os processos físico-químicos, que incluem adsorção, osmose reversa, precipitação, oxidação, coagulação e floculação, também possuem desvantagens, pois podem gerar poluição secundária a partir dos produtos utilizados e exigem infraestrutura adequada para sua implementação (Jain *et al.*, 2021).

Uma linha, em alternativa, muito discutida atualmente diz respeito às nanopartículas que são utilizadas nos processos fotocatalíticos heterogêneos, pois

é possível utilizar diferentes semicondutores, que, ao atuarem como catalisadores, aumentam a eficiência na degradação. Essa eficiência pode ser melhorada com a adição de elementos dopantes, o que permite modificar as propriedades ópticas do semicondutor, tornando-o mais fotoativo (Pavani *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2019).

Nesse viés, a fotocatalise também é utilizada como uma poderosa ferramenta no tratamento de efluentes de lavanderias de jeans, a exemplo, Ribeiro, Ferrari e Tavares (2020) compararam a eficácia de dois catalisadores, dióxido de titânio (TiO_2) e óxido de zinco (ZnO), para a remoção de cor dos efluentes. Segundo os autores, o estudo propõe alternativas tecnológicas para aprimorar o tratamento de águas residuais industriais, destacando que a fotocatalise é uma técnica promissora por ser uma tecnologia limpa. Ao final, concluem que, apesar de o (TiO_2) ser mais eficaz na remoção de cor, o ZnO oferece mais vantagens em termos de separação do meio e outros fatores envolvidos (Ribeiro; Ferrari; Tavares, 2020).

Para a realização do tratamento de águas residuais, as nanopartículas assumem papel de destaque. Em particular, os estudos de Fontana *et al.* (2024), Dong *et al.* (2023), Hao *et al.* (2020), Matos *et al.* (2024) e) discutem a integração de componentes nanométricos para melhorar a eficiência de processos fotocatalíticos ou promover a produção sustentável de energia.

Segundo Freire *et al.* (2000) os métodos de tratamento de efluentes podem ser classificados em diferentes categorias, conforme descrito a seguir:

Biológicos Utilizam micro-organismos para decompor matéria orgânica, sendo uma alternativa econômica. No entanto, apresentam limitações quanto a poluentes específicos e altas concentrações.

Físico-Químicos Englobam técnicas como adsorção, coagulação e osmose reversa. Embora sejam eficazes, podem gerar poluição secundária e demandam infraestrutura complexa.

Fotocatalise com Nanopartículas Este método emprega semicondutores, como (TiO_2) e ZnO , juntamente com luz, para degradar poluentes. Sua eficiência pode ser aumentada por dopagem com elementos químicos e é especialmente indicado para compostos recalcitrantes.

O presente trabalho está alinhado com investigações recentes sobre o uso de materiais híbridos para melhorar a eficiência de processos fotocatalíticos. Trabalhos como o de Hamdy *et al.* (2021) destacam a importância da incorporação de polianilina (PANI) em sistemas baseados em óxidos metálicos, como ZnO , para aumentar a absorção de luz visível e a eficiência de separação de cargas, permitindo

a degradação eficiente de poluentes orgânicos. Embora este trabalho se concentre em ZnO, ele fornece *insights* valiosos para a associação de PANI com outros óxidos, como o (TiO₂).

A pesquisa conduzida por Zhang, Zong e Zhu (2009) demonstra como a junção de monocamadas de PANI com ZnO pode inibir a fotocorrosão e aumentar significativamente a eficiência fotocatalítica na degradação de corantes orgânicos sob luz visível. Esses resultados reforçam a aplicabilidade da PANI como um componente eficaz em materiais híbridos, especialmente para superar limitações relacionadas à recombinação de pares elétron-buraco, um desafio também enfrentado pelo (TiO₂).

Gilja *et al.* (2018) observaram que a adição de PANI a compósitos com ZnO estende sua atividade fotocatalítica para a região visível e evita sua dissolução em meio aquoso. Embora esses estudos se concentrem em ZnO, os princípios são aplicáveis à associação de PANI com (TiO₂), objeto central deste trabalho.

Outros autores, como Ribeiro (2016), exploraram híbridos de PANI dopada com ácido dodecilbenzeno sulfônico (ADBS) e ZnO, avaliando suas aplicações em fotodegradação de compostos orgânicos. Embora os resultados tenham mostrado limitações na atividade fotocatalítica, os híbridos sintetizados via sonicação apresentaram excelente capacidade de adsorção, destacando a relevância de condições de síntese para otimizar o desempenho de materiais híbridos. Esses estudos também podem ser aplicados ao desenvolvimento de compósitos de PANI e (TiO₂), buscando equilíbrio entre fotocatalise e adsorção.

O dióxido de titânio (TiO₂) é amplamente utilizado na fotocatalise heterogênea para o tratamento de efluentes contendo corantes. Esta técnica pode utilizar semicondutores baseados em hidrotalcita e (TiO₂), por exemplo, que apresentam vantagens significativas para a degradação de poluentes orgânicos. Os autores Denti *et al.* (2022) discutem, ainda, os processos oxidativos avançados, destacando a fotocatalise como uma alternativa eficaz devido ao seu alto potencial redox, menor toxicidade e menores custos quando comparados a outros semicondutores. Desta forma, a fotocatalise utilizando (TiO₂) mostra-se promissora para a eliminação de corantes presentes em efluentes, contribuindo para uma solução mais sustentável e eficiente no tratamento de águas residuais.

Ainda há a possibilidade do desenvolvimento de filmes de poliestireno para a imobilização do dióxido de titânio (TiO₂), que se apresenta como uma estratégia relevante. A imobilização do (TiO₂) em suportes, como filmes poliméricos provenientes da reciclagem de isopor (poliestireno expandido), facilita a remoção do catalisador do efluente tratado, reduzindo custos relacionados ao processo de separação. Embora os filmes produzidos tenham mostrado potencial como suporte para fotocatalise heterogênea, os resultados indicam que a quantidade de catalisador

disponível na superfície ainda não é suficiente para alcançar a mesma eficiência que o catalisador disperso. Assim, há espaço para melhorias na técnica de preparo dos filmes, visando aumentar a eficiência do processo de degradação de poluentes (Silveira *et al.*, 2019).

Tecnologias emergentes como a fotocatalise acoplada à biodegradação também vêm ganhando espaço. Dong *et al.* (2023) utilizaram bismuto dopado com boro como catalisador na degradação da ciprofloxacina, obtendo até 95% de remoção em 40 dias. Essa integração promove maior mineralização dos poluentes e proteção dos biofilmes para garantir a viabilidade do processo, o que contribui para um tratamento mais sustentável de poluentes recalcitrantes.

De maneira semelhante, o uso de catalisadores à base de bismuto tem-se mostrado promissor não apenas na degradação de poluentes, mas também na fixação de nitrogênio para a produção de amônia, um composto essencial na indústria de fertilizantes, produtos químicos e energia. O bismuto, em suas diferentes formas, incluindo bismuto metálico, óxido de bismuto, haletos de bismuto, como o cloreto de bismuto, e polioxometalatos de bismuto, apresenta boas propriedades catalíticas, sendo uma alternativa interessante para a fixação de nitrogênio em condições ambientais. O estudo de Hao *et al.* (2020) aponta desafios e estratégias de desenvolvimento desses materiais, como engenharia de superfície e modificação de campo elétrico, visando alternativas ao processo de Haber-Bosch, que consome muita energia.

De forma análoga, a conversão fotocatalítica de biomassa lignocelulósica apresenta um grande potencial para a produção sustentável de produtos químicos e combustíveis de valor agregado, especialmente em um cenário onde há crescente demanda por fontes alternativas e renováveis. Nesse contexto, o estudo de Liu *et al.* (2019) aponta avanços significativos na aplicação de processos fotocatalíticos para a transformação de lignina e celulose, destacando a eficiência, as condições operacionais moderadas e os impactos ambientais reduzidos dessas técnicas. Esses processos incluem desde a clivagem seletiva de ligações na lignina até a produção de eletricidade por meio da fotocatalise, abrindo novas possibilidades para o uso mais sustentável dos resíduos agrícolas e florestais.

Os estudos mencionados corroboram a estratégia proposta neste trabalho, que combina (TiO_2) com PANI para melhorar a eficiência fotocatalítica. Essa combinação não apenas amplia o uso do material, mas também promove a separação de cargas e minimiza a recombinação, fatores essenciais para a degradação eficaz do corante Ponceau 4R.

2.2 Fotocatálise heterogênea

A fotocatálise heterogênea é classificada como um dos Processos Oxidativos Avançados (POAs), sendo considerada uma alternativa tecnológica para o tratamento de efluentes provenientes de atividades industriais, bem como para a descontaminação de ambientes impactados por poluentes. Este mecanismo fundamenta-se na ativação eletrônica de um fotocatalisador, geralmente um semicondutor, que ao ser exposto à radiação luminosa com energia superior à sua banda proibida (*band gap*), promove a geração de pares elétron-buraco. Esses pares são capazes de desencadear reações redox altamente eficazes na degradação de compostos orgânicos e inorgânicos nocivos ao ambiente (Batista *et al.*, 2022; Araújo *et al.*, 2016).

A fotocatálise heterogênea teve sua primeira demonstração experimental no início da década de 1970, por meio do trabalho seminal realizado por Fujishima e Honda (Fujishima; Honda, 1972). Neste estudo pioneiro, os autores relataram a oxidação da água utilizando uma suspensão de dióxido de titânio (TiO_2) irradiada em uma célula fotoeletroquímica, resultando na geração de hidrogênio e oxigênio. A partir dessa descoberta, o uso do (TiO_2) como fotocatalisador passou a receber considerável atenção na comunidade científica, em virtude de suas diversas aplicações potenciais, que abrangem desde a degradação de poluentes até a produção limpa de energia (Nogueira; Jardim, 1998; Hidalgo-Jimenez *et al.*, 2020).

Os processos fotocatalíticos heterogêneos têm sido amplamente empregados no contexto da fotocatálise ambiental, apresentando-se como uma estratégia eficiente para o tratamento de efluentes. Seu uso visa, principalmente, à remoção e à completa degradação de compostos orgânicos recalcitrantes. Além disso, tais processos vêm sendo explorados em aplicações que envolvem a síntese de produtos químicos sob irradiação luminosa, a geração fotocatalítica de hidrogênio como vetor energético limpo e sustentável, bem como na conversão de energia solar em formas utilizáveis, representando, assim, uma interface entre tecnologia ambiental e energias renováveis (Freire *et al.*, 2000; Nogueira; Jardim, 1998).

Os processos fotocatalíticos heterogêneos envolvem a utilização de diversos óxidos semicondutores como materiais ativos, dentre os quais se destacam o dióxido de titânio (TiO_2), o sulfeto de cádmio (CdS), o óxido de zinco (ZnO), o sulfeto de zinco (ZnS) e o óxido de ferro (Fe_2O_3) (Nogueira; Jardim, 1998). Dentre esses materiais, o (TiO_2) sobressai como o fotocatalisador mais amplamente empregado, principalmente devido a uma série de características vantajosas, tais como: alta disponibilidade natural, baixa toxicidade, excelente estabilidade química em ampla faixa de pH, notável atividade e estabilidade fotoquímica, insolubilidade em meio aquoso, baixo custo de produção, além de apresentar baixa reatividade química e

biológica. Ademais, o TiO_2 demonstra elevada resistência tanto à corrosão química quanto à fotocorrosão, atributos que o tornam altamente atrativo para aplicações ambientais e energéticas (Fleck; Polesello; Leão, 2025).

Diversos materiais sólidos, como isolantes, semicondutores e condutores, apresentam uma estrutura eletrônica composta por bandas de valência (BV) e de condução (BC), separadas ou não por uma banda proibida (*band gap*). Nos semicondutores, em particular, essa estrutura é caracterizada por uma banda de valência preenchida e uma banda de condução vazia, separadas por um intervalo de energia que define suas propriedades eletrônicas. Quando esses materiais são excitados por radiação com energia igual ou superior à largura do *band gap*, os elétrons são promovidos da BV para a BC. Nessa condição, os elétrons excitados podem se mover livremente pela banda de condução, originando campos eletrônicos deslocalizados. Esse fenômeno confere aos semicondutores uma condutividade elétrica variável, que, sob determinadas condições, pode se aproximar daquela observada em materiais metálicos (Baccaro; Gutz, 2018).

Para que um material semicondutor atue de maneira eficiente como fotocatalisador, é essencial que os potenciais redox associados às reações de evolução de hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) a partir da água, bem como à geração de espécies reativas de oxigênio (tais como peróxido de hidrogênio, radical hidroxila e radical superóxido), estejam localizados dentro da faixa de energia correspondente ao *band gap* do semicondutor. Essa condição garante que os portadores de carga fotoexcitados — elétrons na banda de condução e buracos na banda de valência — possuam energia suficiente para promover, respectivamente, reações de redução e oxidação que levem à formação dessas espécies químicas reativas, fundamentais para a eficiência do processo fotocatalítico (Marques; Stumbo; Canela, 2017).

A aplicação da fotocatalise heterogênea na mineralização de poluentes orgânicos permite sua conversão em espécies estáveis do ponto de vista termodinâmico, como dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). Esse processo viabiliza a remoção completa de compostos potencialmente nocivos, promovendo uma abordagem limpa e eficiente para o tratamento de águas residuais (Silva, 2016).

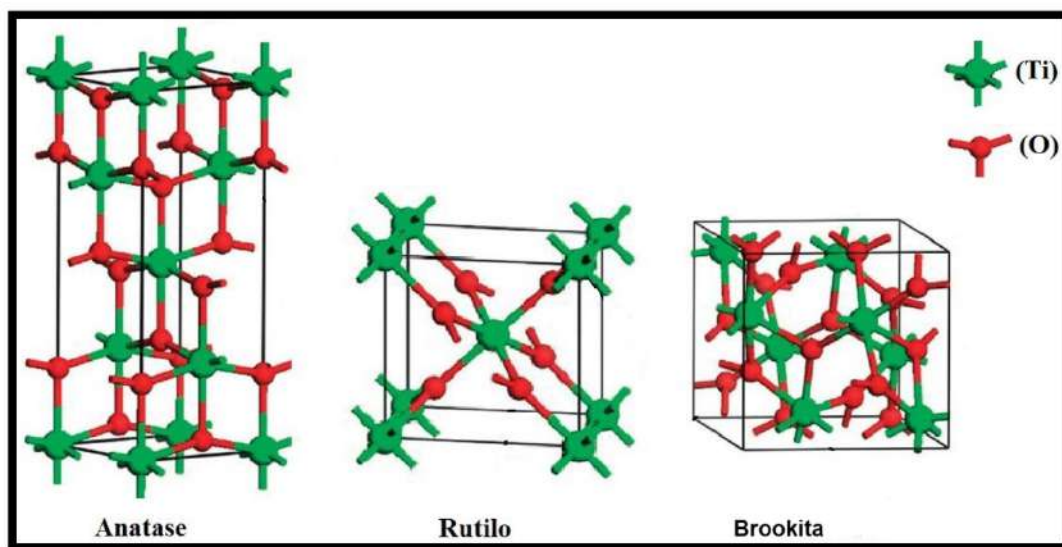
2.3 Dióxido de Titânio (TiO_2)

O dióxido de titânio (TiO_2) é um material de grande interesse científico devido às suas características fotocatalíticas, alta estabilidade química e baixa toxicidade, o que o torna uma opção promissora para aplicações em diferentes setores industriais e biomédicos. Ele ocorre naturalmente nas formas cristalinas anátase, rutilo e brookita, conforme Figura 1 sendo amplamente estudado por sua capacidade

de induzir reações de oxidação-redução quando exposto à radiação ultravioleta (UV) (Henao; Montes; Sierra, 2017).

A fase cristalina anatase é a mais eficiente para aplicações fotocatalíticas devido ao seu *band gap* de aproximadamente $\sim 3,2$ eV, portanto sua ativação ocorre por exposição à radiação UV ($\lambda \leq 387$ nm), promovendo a excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução, formando pares elétron-buraco (e^-/h^+). Esse processo gera espécies reativas de oxigênio (ROS), como radicais hidroxila $\bullet\text{OH}$ e superóxido (O_2^-), que conferem ao material propriedades antimicrobianas e capacidade de degradação de poluentes. No entanto, sua limitação à luz UV restringe suas aplicações, o que tem impulsionado pesquisas para expandir sua absorção para a região visível. Outras fases do dióxido de titânio, como rutilo, com *band gap* em torno de 3,0 eV, e brookita, com *band gap* entre 3,1 e $\sim 3,4$ eV, também são estudadas, embora apresentem menor atividade fotocatalítica que a anatase em diversas condições (Vargas *et al.*, 2018).

Figura 1 – Estruturas cristalinas do TiO_2



Fonte: Adaptado de Machado (2020).

A eficiência da atividade fotocatalítica do (TiO_2) está diretamente relacionada à sua estrutura cristalina e ao grau de cristalinidade alcançado durante o processo de síntese. A estrutura cristalina influencia propriedades eletrônicas fundamentais, como a separação e mobilidade dos pares elétron-buraco (e^-/h^+), enquanto um alto grau de cristalinidade reduz defeitos estruturais que atuam como centros de recombinação, aumentando a eficiência quântica do processo. A cristalização controlada dos precursores amorfos é, portanto, essencial para obter materiais com estrutura definida, pureza elevada e morfologia adequada às aplicações desejadas.

Métodos como o tratamento térmico em mufla e a síntese hidrotermal são amplamente utilizados para promover a formação de fases cristalinas estáveis — sendo a fase anatase a mais favorecida e desejada em condições específicas de temperatura e tempo, por apresentar maior atividade fotocatalítica em comparação com outras fases do (TiO₂) (Martins *et al.*, 2022; Silva, 2021).

2.4 Síntese hidrotermal do dióxido de titânio (TiO₂): controle e aplicações

A escolha do método de síntese/cristalização influencia diretamente parâmetros críticos como tamanho de partícula, área superficial específica, porosidade e grau de organização estrutural, os quais impactam significativamente a geração e a separação eficiente dos pares elétron-buraco. Dessa forma, a otimização do processo de rotas sintéticas torna-se uma etapa fundamental na modulação das propriedades físico-químicas do TiO₂, visando controlar seu desempenho em aplicações ambientais, como a degradação de contaminantes, e em dispositivos antimicrobianos baseados em tecnologias sustentáveis (Santos, 2018).

A síntese hidrotermal tem se mostrado altamente vantajosa na preparação de materiais como o dióxido de titânio (TiO₂), especialmente quando se busca controle morfológico, pureza e eficiência fotocatalítica. Essa técnica utiliza um sistema aquoso fechado sob alta temperatura e pressão (Figura 4), promovendo a dissolução e recristalização de precursores pouco solúveis em condições normais. Uma das grandes vantagens da rota hidrotermal está na capacidade de sintetizar pós cerâmicos com tamanho de partícula ultrafino e bem cristalizados, permitindo controlar características como fase cristalina, morfologia e grau de aglomeração apenas ajustando parâmetros como pH, temperatura e tempo de reação (Yang; Park, 2019).

Além disso, a água desempenha um papel importante no meio reacional, atuando como solvente e meio de transporte de íons, com propriedades físico-químicas que favorecem a nucleação e o crescimento cristalino com alta eficiência cinética sob pressão (Rabenau, 1985).

Do ponto de vista histórico e técnico, a síntese hidrotermal tem raízes profundas na geologia experimental, e se consolidou na ciência dos materiais por permitir a obtenção de compostos com estados de oxidação difíceis e fases metaestáveis que não são acessíveis por rotas convencionais em estado sólido. Essa abordagem é particularmente eficaz para compostos com altos pontos de fusão ou baixa solubilidade, pois a adição de mineralizantes, como ácidos ou bases, aumenta a solubilidade

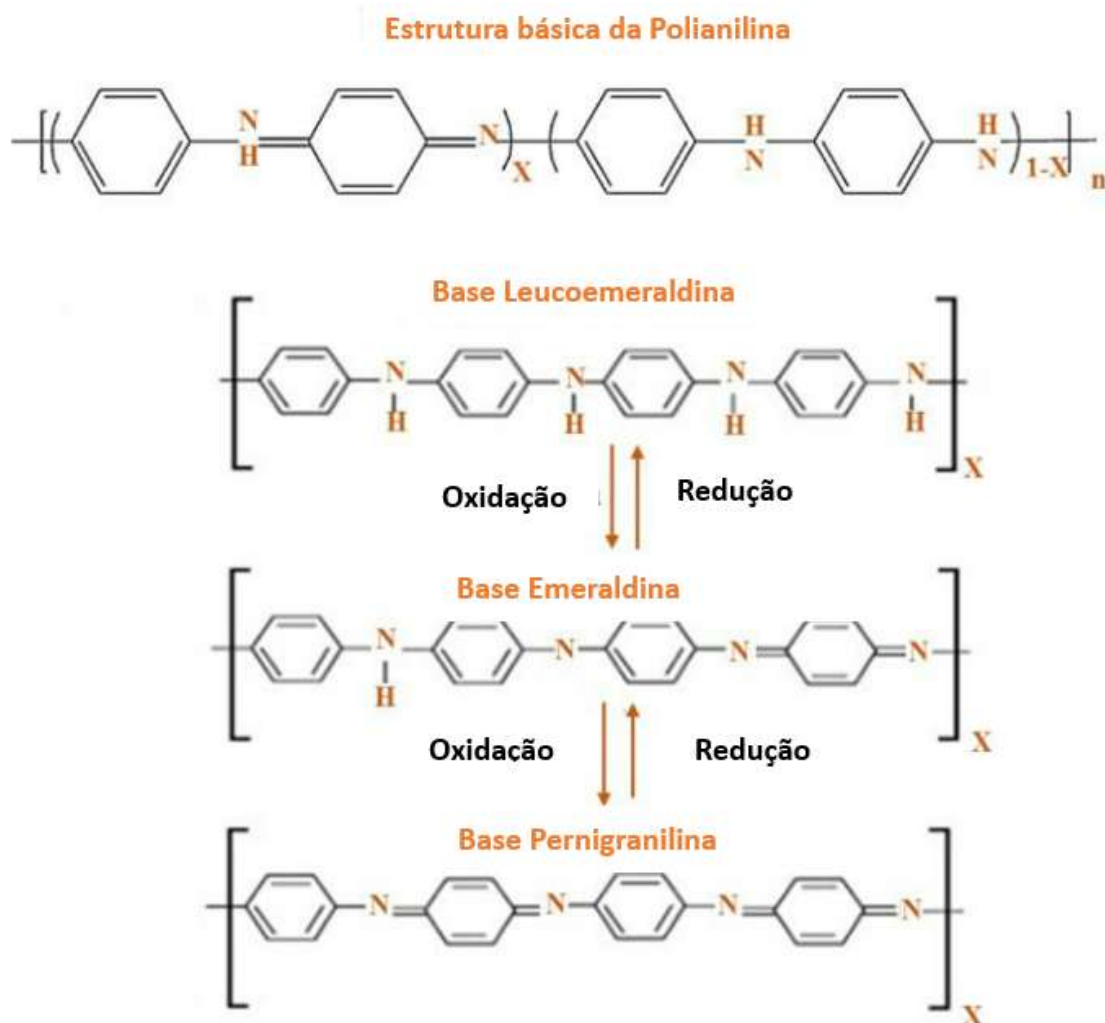
dos precursores, promovendo a formação de fases específicas em temperaturas relativamente baixas (Rabenau, 1985; Morey, 1953).

2.5 Polianilina (PANI)

Polímeros condutores são materiais que vêm sendo amplamente investigados ao longo das últimas duas décadas. A polianilina (PANI), um polímero condutor, na forma dopada (emeraldina sal), destaca-se por suas propriedades eletrônicas singulares, elevada estabilidade e simplicidade no processo de síntese. Quando combinada com TiO_2 , a PANI pode aprimorar de forma significativa a capacidade de absorção de luz visível, aumentando a eficiência fotocatalítica do material híbrido. Estudos recentes apontam que compósitos de PANI/ (TiO_2) apresentam grande potencial em aplicações como a degradação de poluentes, produção de hidrogênio e outros processos voltados à sustentabilidade ambiental (Olad; Behboudi; Entezami, 2012; Li *et al.*, 2008; Lee; Chang, 2019; Faez *et al.*, 2000).

A polianilina (PANI) pode ser estável em diferentes estados de oxidação, conhecidos como leucoemeraldina, emeraldina e pernigranilina, cujas estruturas químicas são ilustradas na Figura 2. Esses estados variam conforme o método de síntese utilizado. A leucoemeraldina é a forma mais reduzida, contendo apenas átomos de nitrogênio do grupo amina em sua estrutura. Por outro lado, a pernigranilina representa a forma totalmente oxidada, onde todos os átomos de nitrogênio pertencem ao grupo imina. A forma intermediária mais estável é a base emeraldina, que é dopada para produzir o sal emeraldina, caracterizado por suas propriedades de condutividade elétrica. A síntese da PANI na forma de sal emeraldina é realizada por polimerização química da anilina, utilizando um agente oxidante como persulfato de amônio $((\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8)$ em solução e um ácido protônico como dopante como ácido clorídrico (HCl , 1,0 mol/L) (Beygisangchin *et al.*, 2021; Nascimento, 2023; Vargas *et al.*, 2018).

Figura 2 – Representação da polianilina (PANI) em suas três formas principais de oxidação.



Fonte: Adaptado de Beygisangchin *et al.* (2021).

O preparo da polianilina (PANI) é tradicionalmente realizado com ácidos próticos fortes. No entanto, pesquisas recentes têm explorado rotas alternativas de síntese utilizando diferentes ácidos protônicos associados a variados agentes oxidantes, conforme descrito na Tabela 1 que permitem alterar características como a morfologia, a processabilidade e a condutividade elétrica da PANI (Lima *et al.*, 2018b).

Tabela 1 – Ácidos protônicos e agentes oxidantes comumente utilizados na síntese da polianilina (PANI).

Reagente	Fórmula química / Abreviação	Concentração típica (mol/L)
Ácidos protônicos (dopantes)		
Ácido clorídrico	HCl	1,0
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	1,0
Ácido nítrico	HNO_3	1,0
Ácido p-toluenossulfônico	PTSA	1,0
Ácido fosfórico	H_3PO_4	1,0
Ácido metanossulfônico	MSA	1,0
Agentes oxidantes		
Persulfato de amônio	$(NH_4)_2S_2O_8$	0,1–1,0
Peróxido de hidrogênio	H_2O_2	0,1–1,0
Dicromato de potássio	$K_2Cr_2O_7$	0,1–0,5
Permanganato de potássio	$KMnO_4$	0,1–0,5
Cloreto férrico	$FeCl_3$	0,1–1,0

Fonte: Elaborado com base em Kulkarni *et al.* (2004), Zhang *et al.* (2019), Prasutiyo, Manaf e Hafizah (2020).

Assim, a escolha do meio ácido, do agente oxidante e das condições de polimerização não apenas define o estado de oxidação e o grau de dopagem da PANI (Stejskal *et al.*, 2004; Kulkarni *et al.*, 2004), como também determina sua organização supra TiO_2 . Esses fatores são decisivos para o alinhamento de bandas, para a formação de heterojunções eficientes e para a supressão da recombinação de portadores, permitindo que a PANI atue como sensibilizadora sob luz visível e como caminho condutor para elétrons/*holes* (Vaez *et al.*, 2018).

2.6 Corante – Ponceau 4R

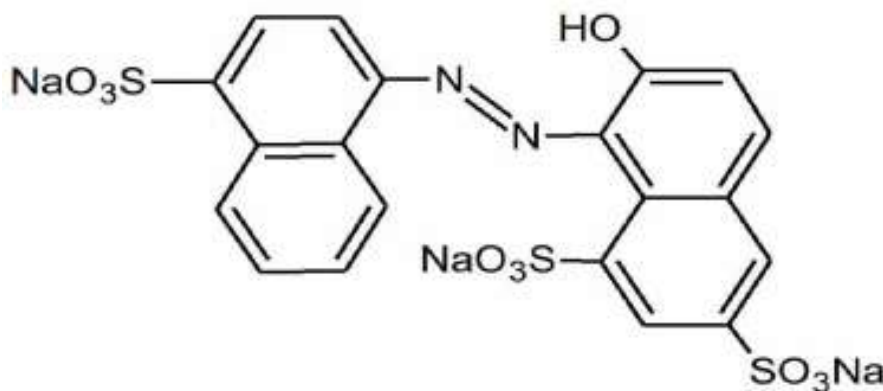
O Ponceau 4R é classificado como um corante azo, assim como a tartrazina, e é amplamente utilizado em diversos setores, especialmente na indústria alimentícia, farmacêutica e de produtos de higiene pessoal devido à sua baixa toxicidade (Sukma

et al., 2024). No entanto, sua segurança tem sido questionada devido à presença de contaminantes como benzeno, 4-aminobifenil e 4-aminoazobenzeno, que podem ser prejudiciais à saúde humana quando consumidos em grandes quantidades. Logo, é importante salientar que existe um limite de ingestão diária aceitável de 0,7 mg/kg/dia estabelecido pela União Europeia (Ghalkhani *et al.*, 2022).

O corante do tipo azo denominado Ponceau 4R (P4R), representado na Figura 3, possui como nomenclatura IUPAC *sal trisódico do ácido 2-(4-sulfo-1-naftilazo)-2-naftol-6,8-disulfônico*. Este composto é amplamente utilizado na indústria alimentícia com a finalidade de conferir tonalidade avermelhada a diversos produtos. No entanto, seu uso é proibido nos Estados Unidos e sujeito a restrições no Reino Unido, devido à existência de evidências científicas que apontam para potenciais efeitos tóxicos associados à sua ingestão (Food Ingredients Brasil, 2009).

Os corantes Ponceau são solúveis em água e ligeiramente solúveis em etanol, o que os torna ideais para coloração de bebidas, doces, produtos de panificação e cosméticos. Todavia, devido à sua estabilidade e resistência à degradação, apresentam riscos ambientais e de bioacumulação (Ghalkhani *et al.*, 2022). Dessa forma, diversas estratégias têm sido desenvolvidas para remover esses corantes de águas residuais, especialmente em indústrias alimentícias. Estudos mostram que há degradação e descoloração do Ponceau 4R sob diferentes reações químicas, incluindo fotoreações, oxidação e redução (Sukma *et al.*, 2024).

Figura 3 – Estrutura química do corante alimentício Ponceau 4R na forma neutra.



Fonte: Retirado de Santos (2017).

Apesar da existência de métodos tradicionais de remoção, como adsorção, coagulação-floculação e processos biológicos, muitos deles apresentam limitações quanto à eficiência na completa mineralização dos corantes azo, além de gerarem subprodutos tóxicos ou exigirem condições operacionais complexas. Nesse contexto, a fotocatalise heterogênea tem se destacado como uma alternativa eficaz, sustentável

e de baixo custo para o tratamento de efluentes contendo compostos recalcitrantes como o Ponceau 4R. Essa técnica utiliza semicondutores ativados por radiação, geralmente na faixa do ultravioleta ou visível, promovendo a geração de espécies reativas capazes de degradar o corante até subprodutos menos tóxicos ou completamente mineralizados (Vieira *et al.*, 2016; Freire *et al.*, 2000; Lin; Mehrvar, 2018; Jain *et al.*, 2021).

Metodologia

3.1 Metodologia dióxido de titânio (TiO_2)

Para o uso do TiO_2 optou-se pela síntese ao invés da utilização de sua versão comercial (Tabela 2), devido à possibilidade de controle mais preciso sobre as propriedades estruturais, morfológicas e ópticas do material. A síntese permite a obtenção de fases específicas (como anatase pura), a modificação da área superficial e da distribuição de tamanho de partículas, além de facilitar a incorporação de dopantes ou a formação de compósitos, visando maior eficiência fotocatalítica adaptada às condições experimentais propostas (Siegel *et al.*, 1988).

Para a síntese do TiO_2 , foram utilizados 20,8 mL de isopropóxido de titânio ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$, 97%, Sigma-Aldrich) e 90 mL de etilenoglicol ($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, 99%, Sigma-Aldrich) conforme detalhado no Quadro 1. A mistura foi submetida à ultrassonicação por 2 horas. Em seguida, foram adicionados 40 mL de água deionizada e 360 mL de acetona CH_3COCH_3 (Synth, P.A. ACS, PM: 58,08 g/mol), mantendo-se a ultrassonicação por mais 2 horas.

Para a lavagem do material sintetizado, realizou-se centrifugação por três vezes com 25 mL de água deionizada e 25 mL de etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, P.A., PM: 46,07 g/mol). Posteriormente, a suspensão foi submetida ao processo hidrotermal (Figura 4) a 200° C por 7 horas. Finalizada a síntese, o material foi seco em estufa a 140° C por 3 horas, pulverizado em almofariz e armazenado.

Essa síntese foi baseada no procedimento descrito por Santos (2017).

Tabela 2 – Comparação entre TiO_2 comercial (P25) e TiO_2 sintetizado em laboratório

Critério	TiO_2 comercial (P25)	TiO_2 sintetizado
Fase cristalina	Mistura de anatase/rutilo	Possibilidade de controle da fase (anatase pura, por exemplo)
Tamanho de partícula	Média de 30 nm (Degussa P25)	Controlável (ex: 12nm com gas-condensation)
Superfície específica	Típica de $\approx 50\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$	Pode ser ajustada conforme o método de síntese
Dopagem/modificação	Limitada ou exige etapas posteriores	Dopantes podem ser incorporados durante a síntese
Custo e praticidade	Disponível comercialmente, uso direto	Pode ser controlada pela escolha de reagentes e uso de energia
Reprodutibilidade	Alta (padronizado)	Pode variar, exige controle rigoroso
Eficiência fotocatalítica	Boa, mas limitada pela composição fixa	Pode ser otimizada para aplicações específicas
Sintetabilidade	Pode exigir aditivos (ex: PVA)	Boa sinterabilidade mesmo sem aditivos

Fonte: Elaborado com base em Siegel *et al.* (1988), Hussain *et al.* (2010), Wannapop *et al.* (2024), Umair *et al.* (2025).

A síntese do dióxido de titânio (TiO_2) pode ocorrer por diversas rotas. Uma das mais utilizadas em laboratório e na indústria é a hidrólise seguida de condensação de um alcóxido de titânio, como o isopropóxido de titânio ($Ti[OCH(CH_3)_2]_4$), especialmente em sínteses sol-gel ou hidrotermais. A reação ocorre em duas etapas principais (1) e (2) (Noman; Ashraf; Ali, 2019; Andronic; Enesca, 2020).

Hidrólise: O alcóxido reage com a água, rompendo os grupos isopropóxido e formando grupos hidroxila ligados ao titânio:

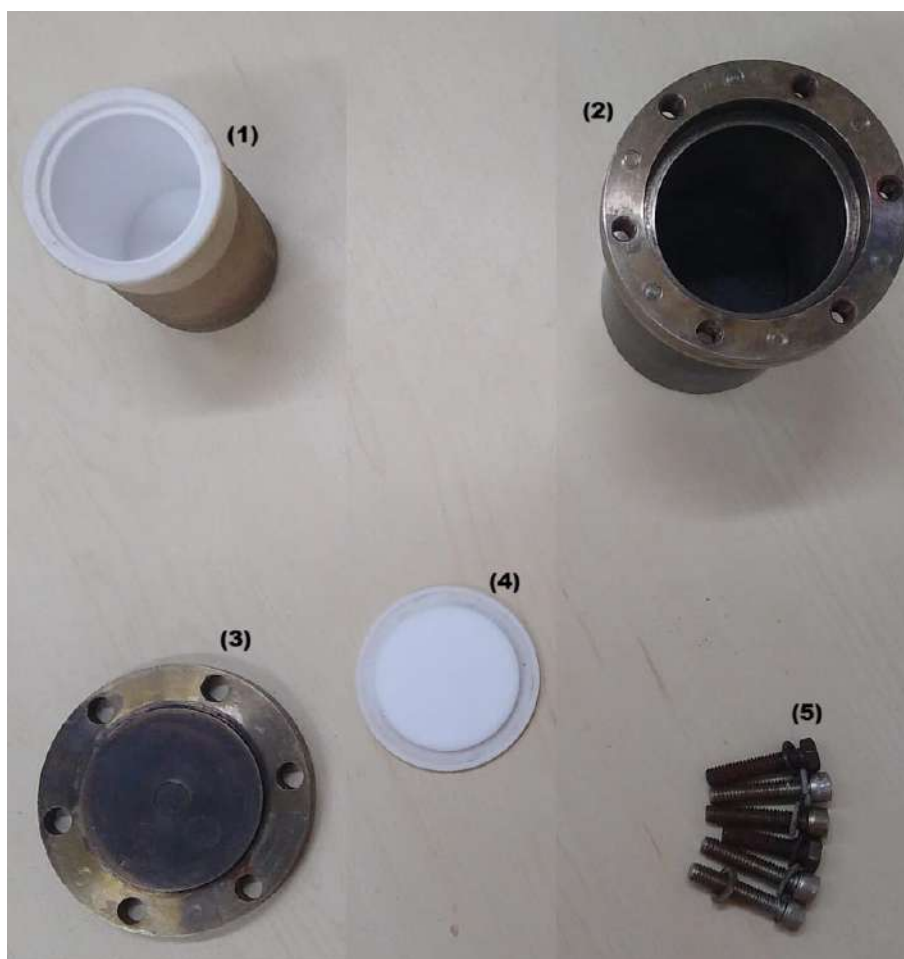


Formação de titânio tetrahidróxido e isopropanol (subproduto).

Condensação: Os grupos $\text{Ti}(\text{OH})_4$ sofrem policondensação, eliminando água e formando a rede inorgânica de TiO_2 (com liberação de H_2O):



Figura 4 – Componentes do sistema de tratamento térmico hidrotérmico: (1) recipiente interno em Teflon, também denominado copo reacional; (2) reator em aço inoxidável; (3) tampa de selagem do reator; (4) tampa em Teflon; (5) parafusos de encaixe.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 1 – *Reagentes e materiais utilizados na síntese do dióxido de titânio (TiO₂)*

Categoria	Item	Especificação	Quantidade / Condição	Observações
Reagentes Principais	Isopropóxido de titânio	97% – Sigma-Aldrich	20,8 mL	Precursor de Ti
	Etilenoglicol	99% – Sigma-Aldrich	90 mL	Solvente orgânico e estabilizante
	Água deionizada	-	40 mL (reação) + 75 mL (lavagem)	Usada na reação e lavagens
	Acetona	Synth P.A. – ACS (PM: 58,08 g/mol)	360 mL	Co-solvente
	Etanol	Alphatec P.A.– ACS (PM: 46,07 g/mol)	75 mL (lavagem)	Para lavagem final
Materiais e Equipamentos	Banho de ultrassom	Ultrasonic Cleaner/ VGT -1620 QTD	2 h (inicial) + 2 h (pós adição)	Agitação da mistura
	Centrífuga	Hettich- Universal 320 R	3 ciclos	Separação e lavagem
	Tubo de ensaio	-	3 unidade	Reator para lavagem
	Reator hidrotermal	-	200° C por 7 h	Cristalização
	Estufa	LUCADEMA /modelo LUCA-82/150.	140° C por 3 h	Secagem final
	Almofariz	-	Uso manual	Pulverização do material final

Fonte: Elaborado pela autora

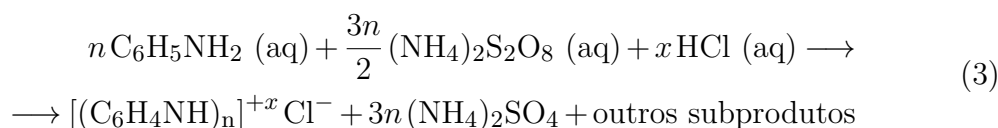
Portanto, a rota sintética adotada para a obtenção do (TiO₂) mostrou-se estratégica para garantir o controle sobre as variáveis estruturais do material, especialmente no que se refere à pureza de fase, área superficial e características morfológicas. Tais atributos são fundamentais para aplicações fotocatalíticas, pois afetam diretamente a absorção óptica, a mobilidade de cargas e a eficiência na degradação de contaminantes. Além disso, a flexibilidade da síntese permite a adaptação do material às condições experimentais específicas da presente pesquisa, reforçando a escolha por métodos controlados em detrimento de amostras comerciais genéricas. (Wannapop *et al.*, 2024; Hamrayev; Korpayev; Shameli, 2024).

3.2 Metodologia da síntese da Polianilina (PANI)

A polianilina (PANI) foi sintetizada por meio da polimerização química em solução, seguindo metodologias clássicas descritas por Müller *et al.* (2011); Costa e Junior (2014). A síntese utilizou anilina (C₆H₅NH₂) (NEON P. A, P.M. 93,13), persulfato de amônio ((NH₄)₂S₂O₈) (NEON P.A, P.M 228,20), ácido clorídrico (HCl, 1,0 mol/L) (ALPHATEC P.A, P.M: 36,48) e água destilada, envolvendo etapas de preparo de soluções, polimerização sob controle de temperatura e purificação do polímero obtido.

Inicialmente, foram preparadas as soluções reagentes: a solução de anilina (0,1 mol/L) foi obtida pela diluição de 0,93 mL de anilina em balão volumétrico de 100 mL com água destilada; a solução de persulfato de amônio (0,1 mol/L) foi preparada com a dissolução de 1,14 g do sal em 50 mL de água destilada; e a solução de HCl (1,0 mol/L) foi obtida pela diluição de 4,1 mL de HCl concentrado até o volume 50 mL.

A reação de polimerização foi conduzida em banho de gelo (0–5°C) sob agitação magnética. Em um béquer, foram misturados 25 mL da solução de HCl 1,0 mol/L com 25 mL da solução de anilina. Em seguida, adicionaram-se 25 mL da solução de persulfato de amônio gota a gota ao longo de 30 minutos, com o objetivo de controlar a temperatura do meio reacional. Após a adição completa, a mistura foi mantida sob agitação por mais 2 horas para garantir a formação do polímero, conforme metodologia similar descrita por Gomes e Oliveira (2009) e resumida na equação 3.



O polímero formado, dopado com ácido, e na forma emeraldina, foi separado por filtração e lavado com água destilada até o filtrado atingir pH neutro. Em seguida, o material foi seco em estufa a vácuo a 60°C por 12 horas, conforme (Lee *et al.*, 2020). A etapa de purificação também incluiu a lavagem por filtração a vácuo em funil de Büchner, seguida de lavagens com solução NH_4OH (0,1 mol/L) (ALPHATEC P.A P.M: 35,05) para neutralização de resíduos ácidos e conversão da PANI para sua forma base. Lavagens adicionais com etanol foram realizadas com o intuito de remover impurezas orgânicas, conforme descrito (Müller *et al.*, 2011).

O produto obtido foi um pó verde escuro de polianilina (estado emeraldina), caracterizado por espectroscopia UV-Vis (BELL Photonics UV-M51), FTIR (Bruker Vertex 70).

3.3 Adsorção de TiO₂ com PANI

A adsorção foi realizada dissolvendo-se 0,10 g de PANI em 8 mL de ácido clorídrico concentrado, seguida de ultrassonicação por 30 minutos. Em seguida, adicionou-se 0,10 g de dióxido de titânio sintetizado previamente disperso em 10 mL de álcool P.A. A síntese foi realizada conforme o método descrito por Lee *et al.* (2020), com modificações, nas proporções PANI: TiO₂ de [m:m] PANI/TiO₂ (1:1), PANI/TiO₂ (1:2) e PANI/TiO₂ (2:1), conforme apresentado no Quadro 2.

As proporções entre PANI e TiO₂ empregadas na síntese dos compósitos (1:1, 1:2 e 2:1), descritas no Quadro 2, foram definidas com base em estudos prévios que destacam o impacto da razão mássica entre os componentes na morfologia, estabilidade térmica, área superficial e desempenho funcional dos materiais híbridos (Turkten *et al.*, 2023; Naik *et al.*, 2024). A variação controlada dessas proporções visa investigar a influência relativa de cada componente nas propriedades estruturais e fotocatalíticas do compósito, considerando que teores elevados de PANI podem favorecer a extensão da absorção na região do visível e o transporte de cargas, enquanto maiores frações de TiO₂ tendem a preservar a estabilidade estrutural e a atividade oxidativa da matriz inorgânica (Turkten *et al.*, 2023).

A concentração do ácido clorídrico (HCl 1 mol·L⁻¹) foi mantida conforme protocolos consolidados para a polimerização ácida da anilina, uma vez que o meio ácido atua duplamente como agente dopante da PANI (forma emeraldina) e como meio estabilizante da suspensão coloidal de TiO₂ durante o processo (Naik *et al.*, 2024). A variação do volume de HCl nas diferentes proporções buscou ajustar o pH da solução total, otimizando tanto a dispersão do semicondutor quanto a eficiência da polimerização *in situ*.

Quanto ao uso do etanol (álcool etílico P.A.), sua adição está relacionada à melhora na dispersão dos reagentes, à redução de tensões superficiais entre os domínios orgânico e inorgânico e à facilitação da remoção de subprodutos durante a lavagem dos compósitos (Naik *et al.*, 2024). Assim, o volume de etanol foi ajustado proporcionalmente à carga de massa total dos precursores (TiO₂ + PANI), favorecendo a homogeneização da matriz híbrida durante a síntese.

Após a preparação, as amostras foram submetidas a tratamento ultrassônico por 1 hora, visando promover a dispersão homogênea e a adsorção eficiente entre os componentes. Posteriormente, foi realizada lavagem utilizando etanol a 40% (v/v) e água destilada, a fim de remover subprodutos. O material obtido foi então seco em estufa a 100° C por 24 horas e armazenado para posterior utilização.

Quadro 2 – *Condições experimentais para síntese dos compósitos PANI/TiO₂ em diferentes proporções.*

Proporção (PANI:TiO ₂)	PANI (g)	TiO ₂ (g)	HCl Diluição (1 mol·L ⁻¹)	Álcool P.A. (mL)
1:1	0,10	0,10	8	10
1:2	0,10	0,20	10	20
2:1	0,20	0,10	20	20

Fonte: Elaborado pela autora

O processo de adsorção do material ativo sobre a superfície do semicondutor é fundamental para maximizar a interação e a transferência de elétrons, fator já comprovado em sistemas similares descritos por Machado *et al.* (2012) na patente de compósitos baseados em TiO₂ e corantes sensibilizadores. Os autores destacam a importância da adsorção na melhoria da eficiência fotocatalítica (Machado *et al.*, 2012).

3.4 Caracterização do Material

Para a caracterização do material, efetuaram-se análises de espectroscopia Raman (identificação de fases e defeitos), microscopia eletrônica de transmissão (MET; morfologia, dispersão e *d*-espaçamentos) e reflectância difusa no UV–Vis (DRS; propriedades ópticas e *E_g* por Tauc), visando correlacionar estrutura e desempenho fotocatalítico.

Além disso, foram realizadas análises de difração de raios X (DRX) para identificar as fases cristalinas e estimar o tamanho de cristalito; espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para mapear grupos funcionais

e indícios de interação na interface PANI/TiO₂; e termogravimetria/análise térmica diferencial (TG/DTA) para avaliar a estabilidade térmica e os eventos de decomposição das amostras, a fim de complementar os resultados de Raman, MET/HRTEM e DRS e possibilitar a correlação consistente entre estrutura, morfologia e propriedades ópticas no desempenho fotocatalítico.

3.4.1 Análise termogravimétrica (TG/DSC)

As análises térmicas de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e termogravimétricas (TG) foram realizadas no equipamento Netzsch STA 449 F3 Nevio, disponível no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI). As amostras foram acondicionadas em cadinhos de alumina abertos, com volume de 85 μ L. As condições experimentais adotadas incluíram uma faixa de temperatura de 35 °C a 600 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, sob atmosfera de nitrogênio (N₂) em fluxo contínuo de 100 mL por minuto.

3.4.2 Difração de Raios X (DRX)

As medidas de raios X foram realizadas usando um difratômetro XRD-6000 SHIMADZU, e uma fonte monocromática CuK α ($\lambda = 1,54148$ Å), no intervalo angular compreendido entre $10^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$. O passo para contagem foi de 0,02°. Como padrão de difração foi utilizado silício cristalino. Os difratogramas das amostras sintetizadas foram comparados aos padrões existentes na base de dados JCPDS (Anexo A).

O cálculo do tamanho de cristalito foi realizado com base nos dados de difração de raios-X (DRX) das amostras analisadas. O método utilizado é a equação de Scherrer, amplamente reconhecida para determinar tamanhos de cristalitos em materiais cristalinos nanométricos (Lima *et al.*, 2018a).

Conforme Costa *et al.* (2006) a Equação de Scherrer (4) é dada por:

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (4)$$

Onde:

- D é o tamanho médio do cristalito [nm];
- K é a constante de forma (adimensional), geralmente assumida como 0,9 para materiais cristalinos isotrópicos;
- λ é o comprimento de onda da radiação utilizada [nm], $\lambda = 0,154$ nm (radiação Cu-K α);
- β é a largura à meia altura (FWHM) do pico de difração (radianos);

- θ é o ângulo de difração correspondente ao pico (graus).

Para realizar os cálculos, é necessário converter β de graus para radianos, Equação (5), semelhante ao realizado por (Santos, 2013):

$$\beta \text{ (radianos)} = \beta \text{ (graus)} \times \frac{\pi}{180} \quad (5)$$

Utilizando os dados experimentais obtidos por DRX para as amostras de TiO_2 , calculamos o tamanho de cristalito de cada amostra.

3.4.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), utilizando o equipamento Bruker Vertex 70. As amostras foram preparadas na forma de pastilhas, utilizando brometo de potássio (KBr) como matriz 1% (m/m). As medidas foram realizadas no intervalo espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , com uma resolução de 4 cm^{-1} e média de 32 varreduras por espectro.

3.4.4 Metodologia para análise por Espectroscopia Raman

A caracterização espectroscópica por Raman foi conduzida no Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás (IF/UFG) no Laboratório Multiusuário de Microscopia (LabMic) para o dióxido de titânio (TiO_2) puro, PANI e para o compósito PANI/ TiO_2 (2:1). Os espectros Raman foram obtidos utilizando um espectrômetro equipado com *laser* de excitação na faixa do visível ($\lambda = 488 \text{ nm}$), configurado em modo confocal para garantir alta resolução espacial. O feixe foi focalizado sobre as amostras com objetiva de 10 $\times$, e a potência incidente na amostra foi mantida em torno de 1,5 mW, a fim de evitar degradação térmica ou foto-oxidação da PANI. O diâmetro do feixe no ponto de foco foi de aproximadamente 2 μm , com largura de fenda de 20 μm , e as medições foram adquiridas com 5 acumulações de 10 s cada.

A calibração do equipamento foi realizada utilizando o modo Raman do silício (520 cm^{-1}) como referência. As amostras foram analisadas em suporte de vidro, sob temperatura ambiente, e os espectros resultantes foram processados para remoção de ruído de fundo e suavização, sem alteração das intensidades relativas.

A faixa espectral analisada compreendeu 100–2000 cm^{-1} , englobando as vibrações características do TiO_2 (fase anatase) e as bandas atribuídas às estruturas benzenoide e quinoide da PANI.

3.4.5 Metodologia para Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)

A caracterização morfológica das amostras foi realizada por Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) no Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás (IF/UFG) no Laboratório Multiusuário de Microscopia (LabMic) utilizando um microscópio eletrônico de transmissão JEOL JEM-2100, operando a 200 kV, equipado com câmera CCD ORIUS SC1000 (Gatan) e detector EDS (Thermo Scientific), controlado pelo software *DigitalMicrograph*.

As amostras analisadas corresponderam ao dióxido de titânio (TiO₂) puro e ao compósito PANI/TiO₂ (2:1). As micrografias foram obtidas com escala de 100 nm, e 5 nm permitindo observar as partículas e os espaços interplanares.

A análise estatística do tamanho das partículas foi realizada a partir da contagem de aproximadamente 1400 partículas para o TiO₂ e 1000 partículas para o compósito PANI/TiO₂, utilizando o software *ImageJ* para a medição dos diâmetros. Os dados obtidos foram posteriormente tratados no software *OriginLab 9.1*, onde foram gerados histogramas de distribuição de tamanho e ajustadas curvas gaussianas para determinação do diâmetro médio e da dispersão.

Os espaços interplanares foram determinados a partir das micrografias do MET utilizando o software *ImageJ*. Iniciou-se com a verificação da barra de escala de 5 nm que corresponde a aproximadamente 300 pixels. Dessa forma, a relação de calibração utilizada foi de $1 \text{ nm} = 300/5 = 60 \text{ pixels}$. Considerando as franjas cristalinas mais nítidas, observou-se que cada espaçamento interplanar (d) corresponde, em média, a 17–18 pixels entre duas linhas claras adjacentes. Aplicando-se a calibração, obteve-se:

$$d = \frac{17}{60} = 0,283 \text{ nm} \quad (6)$$

O valor médio estimado para o espaçamento interplanar do TiO₂ foi, portanto:

$$d = 0,28 \sim 0,3 \text{ nm} \quad (7)$$

O valor médio calculado para o espaçamento interplanar do compósito PANI/TiO₂ (2:1) foi, portanto:

$$d = 0,27 \sim 0,3 \text{ nm} \quad (8)$$

3.4.6 Análise óptica por Reflectância Difusa (UV–Vis/DRS) e determinação do *band gap*

As medidas de reflectância difusa foram realizadas no Laboratório de Físico-Química da Universidade Estadual de Goiás (UEG), conforme descrito na Tabela 3. Foi utilizado um espectrofotômetro UV–Vis Shimadzu UV-2600 equipado com esfera integradora ISR-2600 Plus, cobrindo o intervalo espectral de 200 a 800 nm. O padrão de referência utilizado para calibração do fundo foi o BaSO₄. As amostras em pó foram acondicionadas em porta-amostras de alumínio, levemente compactadas, de modo a garantir uma superfície homogênea e difusora.

Tabela 3 – *Parâmetros experimentais adotados para a análise óptica (UEG).*

Parâmetro	Especificação
Equipamento	Shimadzu UV-2600 com esfera integradora ISR-2600 Plus
Faixa espectral	200–800 nm
Padrão de calibração	BaSO ₄ (branco de referência)
Fenda espectral	2 nm
Passo de varredura	1 nm
Temperatura	25 ± 2 °C
Software de análise	UVProbe 2.5 e OriginLab 9.1
Modelo de cálculo	Kubelka–Munk e Tauc

Fonte: Elaborado pela autora.

Os espectros foram obtidos com passo de 1 nm, fenda espectral de 2 nm e velocidade de varredura média, em temperatura ambiente e umidade controlada. A reflectância difusa $R(\lambda)$ foi convertida na função de Kubelka–Munk, conforme a relação (Kubelka; Munk, 1931; López; Gómez, 2012):

$$F(R) = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (9)$$

A partir da função $F(R)$ foram construídas as curvas de Tauc, definidas por:

$$(F(R)h\nu)^n = A(h\nu - E_g) \quad (10)$$

Em que $n = 2$ para transições indiretas e $n = 1/2$ para transições diretas. Assim, o valor de E_g foi determinado pela extrapolação da porção linear do gráfico $(F(R)h\nu)^n$ em função de $h\nu$, até a interseção com o eixo de energia ($y = 0$), conforme metodologia descrita também por (Khan *et al.*, 2025).

Os dados experimentais foram tratados no *software OriginLab 9.1*, realizando-se a conversão de comprimento de onda (nm) para energia fotônica ($E = 1240/\lambda$, eV) conforme metodologia recomendada por Makuła et al. (2018)(Makuła; Pacia; Macyk, 2018).

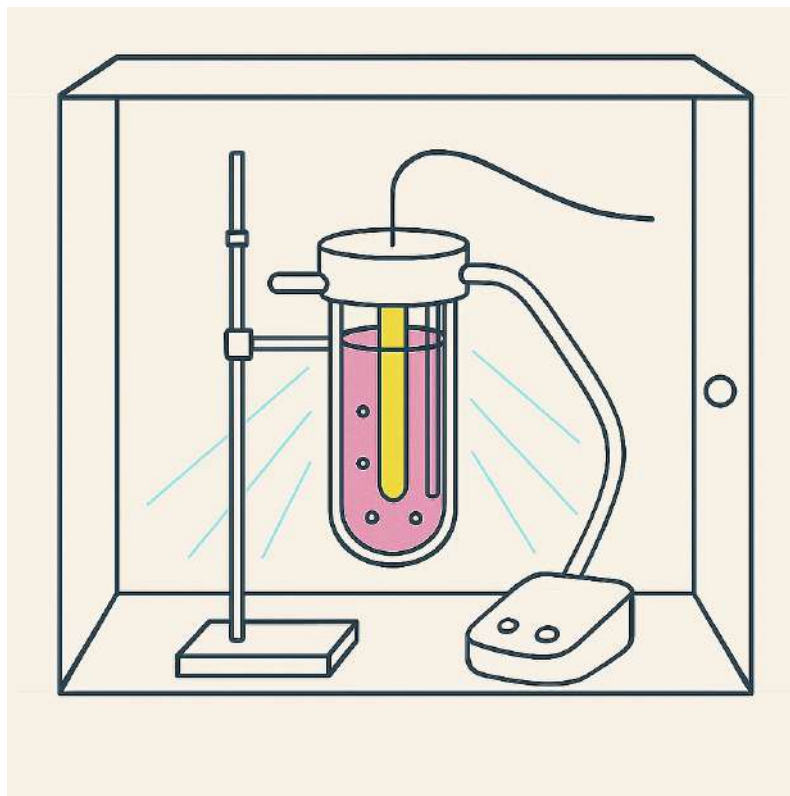
3.5 Ensaios Fotocatalíticos: Sistemas e experimentos de fotodegradação

A eficiência fotocatalítica dos catalisadores PANI/TiO₂ foi avaliada por meio da degradação de poluentes orgânicos, utilizando o corante Ponceau 4R (P4R) como composto modelo. Os ensaios foram conduzidos empregando 0,02 g de fotocatalisador (0,10 g L⁻¹) e 0,006 g de corante Ponceau 4R (30 mg L⁻¹) em 200 mL de solução aquosa. Foi testado o TiO₂ puro, como branco. A reação foi monitorada por meio da coleta de alíquotas a cada 20 minutos, sendo analisado o processo de descoloração por espectrofotometria na faixa de 190 a 800 nm. Os ensaios fotocatalíticos foram realizados em escala de bancada, utilizando um reator de acordo a Figura 5, possuindo um volume útil de 180 mL. O interior do reator é oco, permitindo a inserção de uma lâmpada. Durante todo o experimento, o efluente foi continuamente irradiado, maximizando a exposição à luz e a temperatura média durante o processo alcançou 38° C.

Como fonte de irradiação, utilizou-se uma lâmpada Osram HNS 16W G13. As soluções de corante foram preparadas em balões volumétricos de 200 mL: um contendo apenas o corante e outro contendo o fotocatalisador. Ambas foram homogeneizadas por 30 minutos em banho ultrassônico no escuro. Em seguida, as soluções foram transferidas para o reator.

As misturas contendo o P4R e o fotocatalisador foram preparadas imediatamente antes de cada ensaio. O tempo total de reação foi de 120 minutos, com coleta de alíquotas a cada 20 minutos. As amostras foram filtradas em membranas com porosidade de 0,45 µm antes da análise. Todos os experimentos foram realizados em triplicata, e os dados apresentados correspondem à média dos valores obtidos.

Figura 5 – *Esquema ilustrativo do sistema de fotocatalise utilizado nos experimentos. O reator de vidro apresenta compartimento interno de quartzo para inserção da lâmpada UV (amarela). A solução do corante (rosa) é agitada por um soprador de ar com diafragma conectada por mangueira à entrada lateral do reator que desce pelo duto até a solução. O conjunto é sustentado por suporte universal em câmara fechada com maçaneta.*



Fonte: Elaborado pela autora.

Para avaliar a influência do fotocatalisador no sistema, foram realizadas análises de adsorção do corante pelos fotocatalisadores, além de ensaios de degradação por fotólise. As leituras espectrofotométricas foram realizadas utilizando o espectrofotômetro modelo BELL Photonics UV-M51, com água deionizada como branco. As leituras de absorvância foram realizadas na faixa de 190 a 800 nm (Santos, 2013).

3.6 Ensaio de Adsorção

A eficiência dos materiais sintetizados —TiO₂ puro, PANI/TiO₂ (1:1), PANI/TiO₂ (1:2) e PANI/TiO₂ (2:1) — na adsorção do corante Ponceau 4R foi avaliada por meio de espectrofotometria UV-Vis, utilizando o comprimento de onda de 508 nm, correspondente ao máximo de absorção do corante. Os experi-

mentos foram conduzidos em ambiente escuro, com o objetivo de eliminar qualquer influência fotocatalítica, externa, a análise exclusiva da capacidade adsorbtiva dos materiais.

Durante todo o ensaio, as amostras permaneceram sob agitação constante, a fim de garantir a homogeneidade da solução. Alíquotas foram coletadas a intervalos regulares de 20 minutos, totalizando um período de 120 minutos de análise. Antes de cada leitura, as amostras foram filtradas em membranas com porosidade de 0,45 μm para remoção de partículas suspensas. As medidas de absorbância foram realizadas em um espectrofotômetro UV-Vis (BELL Photonics UV-M51). Todos os experimentos foram realizados em duplicata, e os resultados apresentados correspondem à média dos valores obtidos nas replicatas experimentais.

3.7 Metodologia para aplicação da Taxonomia de Bloom no Ensino Interdisciplinar

A pesquisa para aplicação na área da educação adotou uma abordagem interdisciplinar e escalonada, integrando os pressupostos da Taxonomia de Bloom, discutida em Trevisan e Amaral (2016), ao ensino de Ciências, com foco em atividades experimentais relacionadas à fotocatalise e ao uso de impressão 3D. A metodologia foi estruturada em seis etapas principais, aplicadas de forma adaptada aos diferentes níveis de ensino (Ensino Fundamental I e II, Médio e Técnico), de modo a respeitar a maturidade cognitiva dos estudantes e promover o desenvolvimento de competências em níveis progressivos de complexidade.

Na primeira etapa, busca-se a sensibilização dos participantes por meio de vídeos, imagens e discussões coletivas sobre a poluição dos corpos hídricos e a importância do tratamento de efluentes. A segunda etapa consiste na introdução dos conceitos de fotocatalise heterogênea, utilizando o corante alimentício Ponceau 4R como poluente modelo. A terceira etapa envolve a modelagem e impressão 3D de suportes e reatores experimentais, variando desde a observação da prototipagem nos anos iniciais até a criação de dispositivos funcionais em escala laboratorial no nível técnico.

Na quarta etapa, é voltada para a execução do experimento fotocatalítico, com exposição da solução de corante à radiação solar ou ultravioleta (UV), na presença de catalisadores como o dióxido de titânio (TiO_2), puro ou dopado, além de eventuais compósitos com polianilina (PANI), de acordo com a infraestrutura disponível. A quinta etapa corresponde à análise e discussão dos resultados obtidos, envolvendo desde registros visuais e gráficos simples até medições instrumentais de

absorvência, pH, condutividade e eficiência de degradação.

Por fim, na sexta etapa, os estudantes apresentarão os resultados por meio de murais, cartazes, relatórios e apresentações em feiras de ciências, conforme a faixa etária. Esse processo contribuiu para a consolidação da aprendizagem e para a avaliação formativa.

Ao longo de todas as etapas, as atividades foram planejadas com base nos domínios cognitivos da Taxonomia de Bloom, com o intuito de estimular os estudantes a transitar dos níveis mais simples (lembrar e entender) até os mais complexos (avaliar e criar), promovendo o pensamento crítico, a consciência ambiental e a capacidade de propor soluções tecnológicas sustentáveis.

Resultados e Discussão

4.1 Análise térmica

A caracterização térmica do material TiO_2 foi realizada utilizando técnicas de análise termogravimétrica (TG) e calorimetria diferencial de varredura (DSC) (Figura 6). A curva TG revelou uma significativa perda de massa de aproximadamente 88,5% no intervalo de temperatura de 30° C e 120° C, atribuída à eliminação de água fisicamente adsorvida e resíduos orgânicos provenientes da síntese (Costa *et al.*, 2006). A estabilidade térmica foi observada a partir de 150° C até 600° C indica a formação de um material termicamente resistente, compatível com aplicações em fotocatalise (Costa *et al.*, 2006).

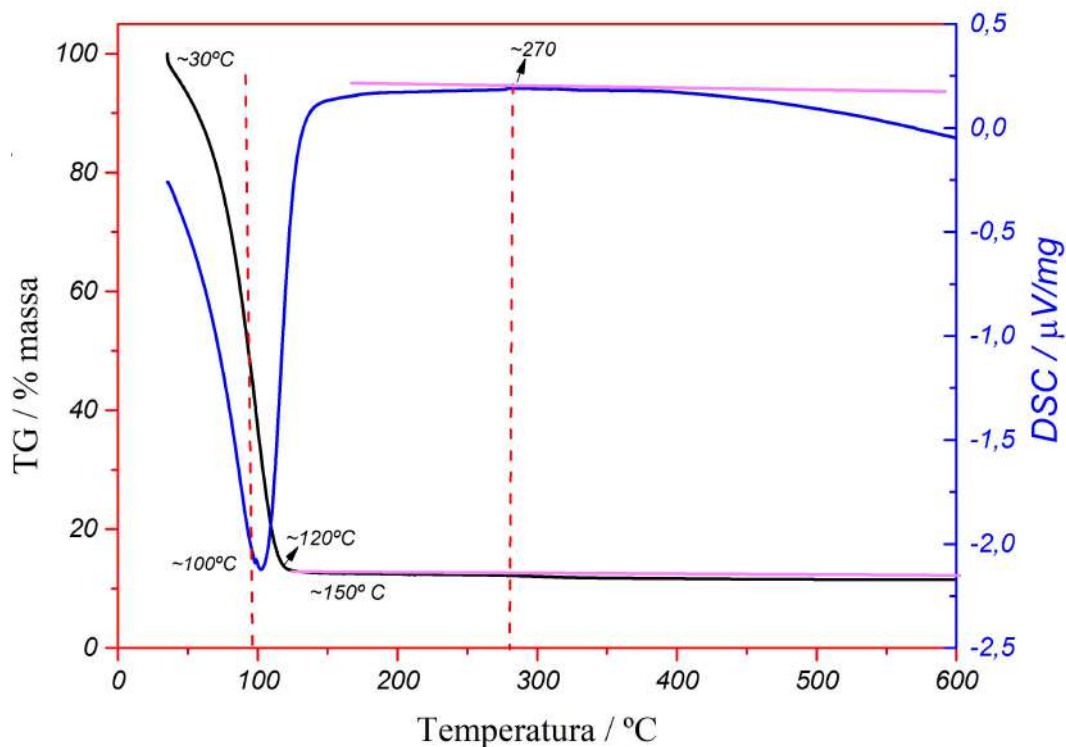
A curva DSC apresentou um pico endotérmico na faixa inicial de aquecimento, com mínimo em torno de 100° C e intensidade aproximada de $-2,0\mu\text{V}/\text{mg}$, associado à desidratação do material (Costa *et al.*, 2006). Por volta de 270 °C, observa-se no DSC um desvio sutil na linha de base, compatível com um evento exotérmico associado à cristalização do material, com formação predominante da fase anatase (Armoa, 2007).

Em temperaturas próximas de 450 °C, o DSC indicou um novo evento térmico atribuível ao início da transformação anatase $\rightarrow$ rutilo (Armoa, 2007), estimada a partir do DSC em cerca de 3%. Essa fração não foi confirmada pelas análises de DRX, Raman e MET, em razão do baixo teor e do caráter discreto da variação energética, observado apenas de maneira sutil no termograma. Ainda que em baixo teor, a presença de rutilo pode contribuir positivamente para a fotocatalise devido ao efeito de junção anatase/rutilo, que favorece a separação de cargas e reduz a recombinação elétron–buraco (Santos, 2013).

Não houve evidências de transições estruturais significativas até 600°C, o que sugere a estabilidade da fase cristalina presente no material. Este comportamento é característico de materiais que contêm grande quantidade de água (fisisorção) e resíduos orgânicos provenientes de sínteses por métodos úmidos, como a precipitação homogênea (Costa *et al.*, 2006); (Ionashiro, 2004) . Acima de 400 °C, o

material apresentou uma tendência à estabilização térmica, indicando a eliminação de compostos voláteis e a formação progressiva da rede de TiO_2 conforme mencionado por Mourão *et al.* (2009).

Figura 6 – Análise termogravimétrica do TiO_2 puro.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esse comportamento está em consonância com o que foi descrito por Marques, Stumbo e Canela (2017), que destacam a importância do tratamento térmico no aprimoramento das propriedades fotocatalíticas do TiO_2 . Segundo os autores, a aplicação de temperaturas superiores a 100°C durante a etapa de modificação ou imobilização do semicondutor é capaz de promover alterações estruturais e superficiais que favorecem a atividade catalítica. Tais modificações estão diretamente associadas à transição da estrutura amorfa para fases cristalinas mais ativas, como a anatase, além de influenciarem parâmetros como área superficial e porosidade — aspectos essenciais para o desempenho em processos de degradação fotocatalítica.

Importante ressaltar que a calcinação em temperaturas superiores a 600°C pode induzir a transição anatase $\rightarrow$ rutilo, segundo a literatura, está relacionada à estabilização da estrutura cristalina do rutilo, acarretando perdas nas propriedades catalíticas (Wolff *et al.*, 2022). Essa estabilização geralmente ocorre entre 500 e 600°C (Ha *et al.*, 2000).

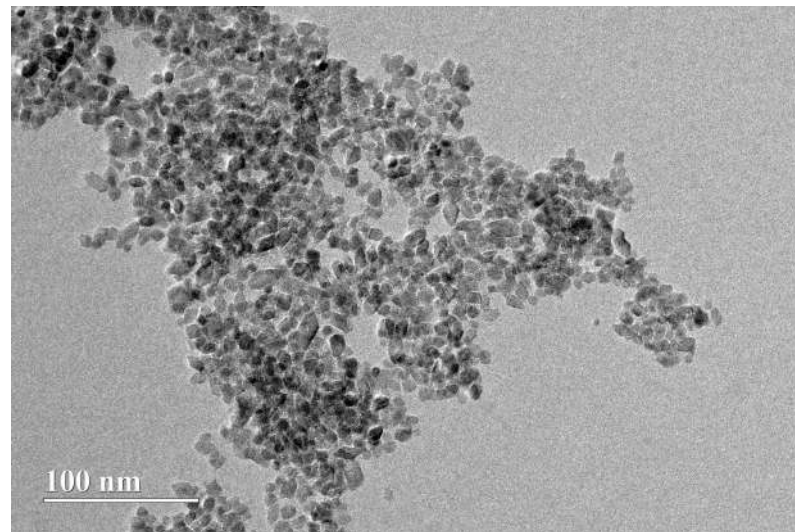
O tratamento térmico hidrotermal dos materiais sintetizados foi realizado a 200°C, visto que a estufa em que o reator é inserido possui uma faixa de trabalho de 50°C 200°C, não sendo possível ultrapassar essa temperatura. Nesse método, o aquecimento do reator promove a transferência de calor para o óxido em processamento, ao mesmo tempo em que ocorre o aumento da pressão interna do sistema. Essa combinação de temperatura e pressão favorece a aceleração das transições de fase, contribuindo para a formação das fases cristalinas desejadas, como será evidenciado posteriormente nos resultados de difração de raios X (DRX).

4.2 Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET): morfologia e distribuição das nanopartículas

A caracterização morfológica do TiO₂ e do compósito PANI/TiO₂ na proporção 2:1 foi realizada por Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) com escala de 100 nm, permitindo observar a distribuição de tamanho das partículas obtidas. As micrografias (Figuras 7 e 8) revelam partículas com morfologia distinta, próximas da forma esférica e com dispersão homogênea, sem evidências significativas de aglomeração. Tal característica sugere que o processo de síntese empregado foi eficiente para promover a nucleação e crescimento de partículas em escala nanométrica. (Ananth *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2025; Radoičić *et al.*, 2017).

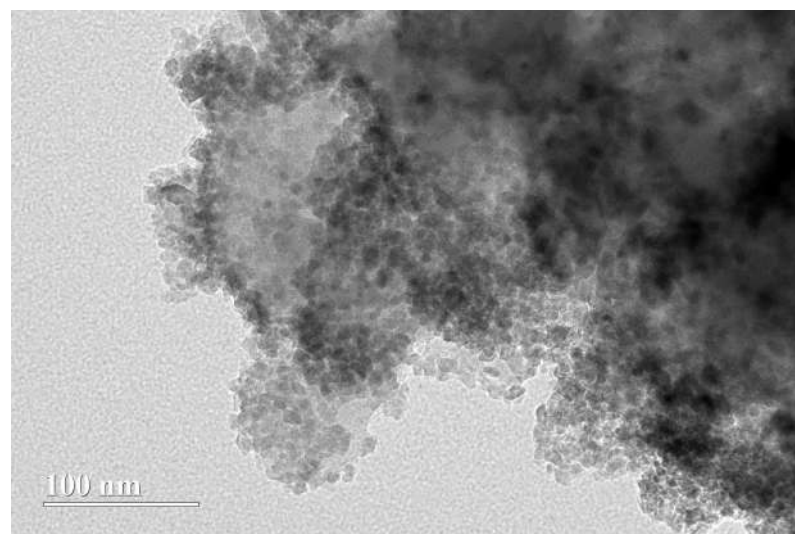
A análise estatística foi realizada com o software *ImageJ* para determinar o tamanho de partículas, obtida a partir da contagem de aproximadamente 1400 partículas, para o TiO₂, e 1000 partículas para PANI/TiO₂, de acordo com os histogramas das Figuras 9 e 10. A curva ajustada por função gaussiana confirma a predominância de partículas menores que 10 nm. Os dados tratados para o TiO₂ evidenciam que o diâmetro médio de partícula encontra-se em 8,6 nm, e 7,57 nm para o compósito PANI/TiO₂; valores também destacados nos gráficos. Observa-se que a maioria das partículas estão concentradas na faixa entre 5 e 15 nm, indicando uma distribuição relativamente estreita e típica de processos de síntese sol-gel/hidrotermal (Ananth *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2025; Radoičić *et al.*, 2017).

Figura 7 – *Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)* do material (TiO_2) puro.



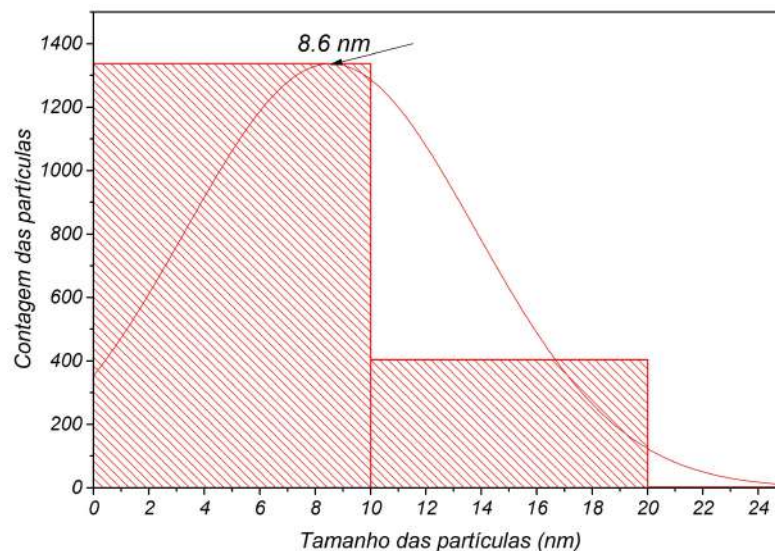
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 8 – *Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)* PANI/ TiO_2 (2:1).



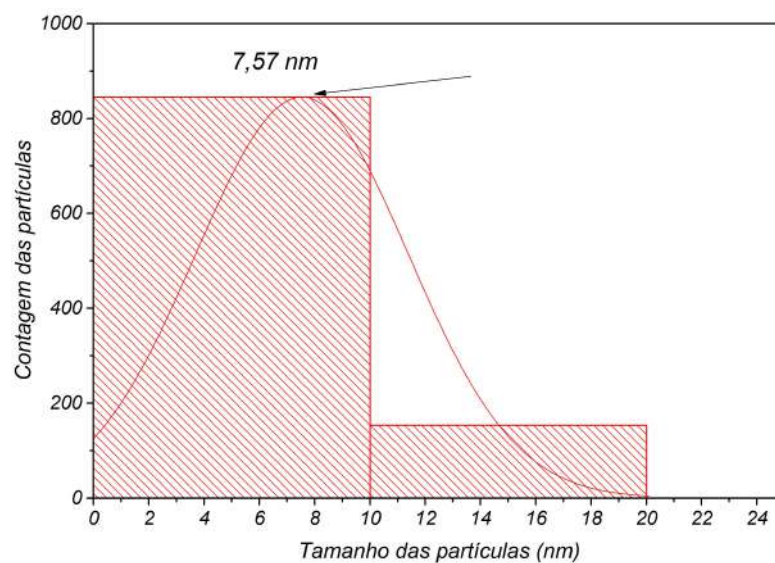
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 – *Histograma. Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) do (TiO₂) puro.*



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 10 – *Histograma. Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) do compósito PANI/TiO₂ (2:1).*



Fonte: Elaborado pela autora.

A predominância de tamanhos abaixo de 10 nm é coerente com o esperado para o TiO₂ em fase anatásio, frequentemente associado a elevada área superficial e maior densidade de defeitos superficiais, fatores que potencializam o desempenho fotocatalítico (Ananth *et al.*, 2022; Radoičić *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2020; Islam; Lombardi, 2022). As partículas nanométricas reforçam a estabilidade do método de síntese adotado, evitando crescimento excessivo e coalescência (Khan *et al.*, 2025).

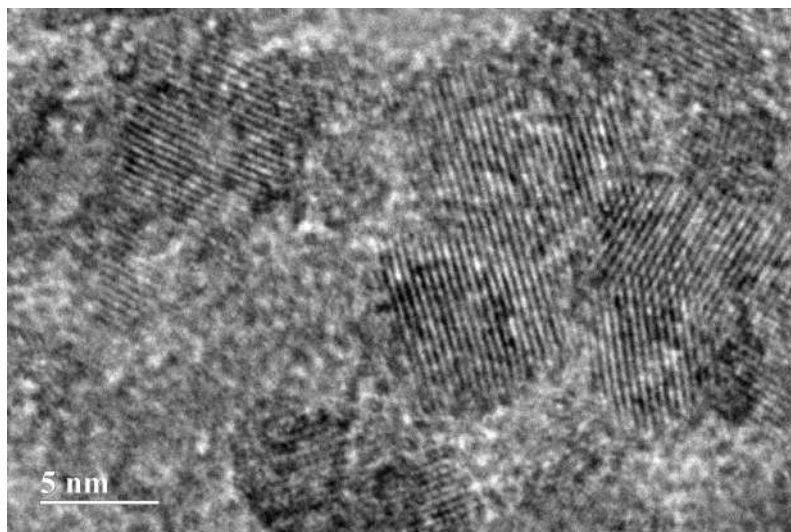
A morfologia do compósito híbrido PANI/TiO₂ na proporção 2:1, Figura 8, observada na micrografia, evidencia uma estrutura composta por nanopartículas diversas e próximas da forma esférica, finamente dispersas sobre uma matriz contínua de polianilina (PANI), o que é consistente com os resultados de difração de raios X. As regiões mais claras da imagem correspondem predominantemente ao TiO₂ que está finamente disperso sobre uma camada de PANI, enquanto as zonas mais escuras indicam áreas recobertas ou encapsuladas pela PANI, resultado da forte interação entre as fases condutora e semicondutora (Radoičić *et al.*, 2017). Essa conformação das micrografias sugere boa dispersão do TiO₂ na matriz polimérica, com redução na tendência de aglomeração, o que contribui para maior área superficial e, conseqüentemente, melhor desempenho fotocatalítico (Ma *et al.*, 2020; Khan *et al.*, 2025).

A obtenção de partículas nessa faixa nanométrica é de grande relevância para aplicações ambientais, uma vez que a redução do tamanho médio aumenta a razão *área superficial/volume*, favorecendo a adsorção de moléculas de corantes e reagentes durante o processo fotocatalítico. Além disso, partículas menores podem apresentar maior separação de cargas fotoexcitadas, reduzindo a recombinação elétron–buraco e aumentando a eficiência da degradação (Fujishima; Honda, 1972; Ma *et al.*, 2020; Ananth *et al.*, 2022).

Comparativamente, a literatura reporta que o TiO₂ puro tende a apresentar partículas entre 10 e 20 nm (Lee *et al.*, 2020), enquanto a incorporação de PANI pode atuar como agente de confinamento, limitando o crescimento cristalino e estabilizando o sistema (Radoičić *et al.*, 2017). Assim, a redução média para 7,5 nm observada neste estudo reforça o papel da PANI como matriz hospedeira, capaz de melhorar a dispersão do TiO₂ (Altannyhi *et al.*, 2024), reduzir o tamanho das partículas e aumentar a separação de cargas fotoinduzidas (Lee *et al.*, 2020; Radoičić *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2020), aspectos relevantes para a eficiência na fotodegradação do corante Ponceau 4R.

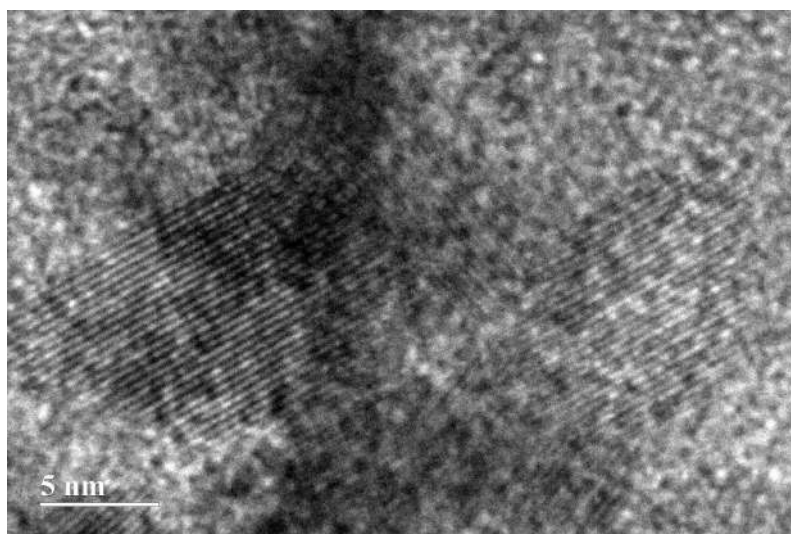
A análise dos espaços interplanares (Figuras 11 e 12) foram determinadas com escala de 5 nm e resultou em $d \sim 0,3\text{nm}$. Identificou-se para ambos, TiO₂ puro e PANI/TiO₂, a compatibilidade dos resultados conforme dados da ficha cristalográfica JCPDS em anexo (Figura 22) com os planos (004) ou (101), (200) característicos da fase anatase do TiO₂, confirmando a presença de uma estrutura cristalina bem ordenada. Portanto, estão em concordância com Theivasanthi e Alagar (2013)(Theivasanthi; Alagar, 2013).

Figura 11 – *Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)* com espaços interplanares do TiO_2 puro.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 – *Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)* com espaços interplanares do compósito PANI/ TiO_2 (2:1).



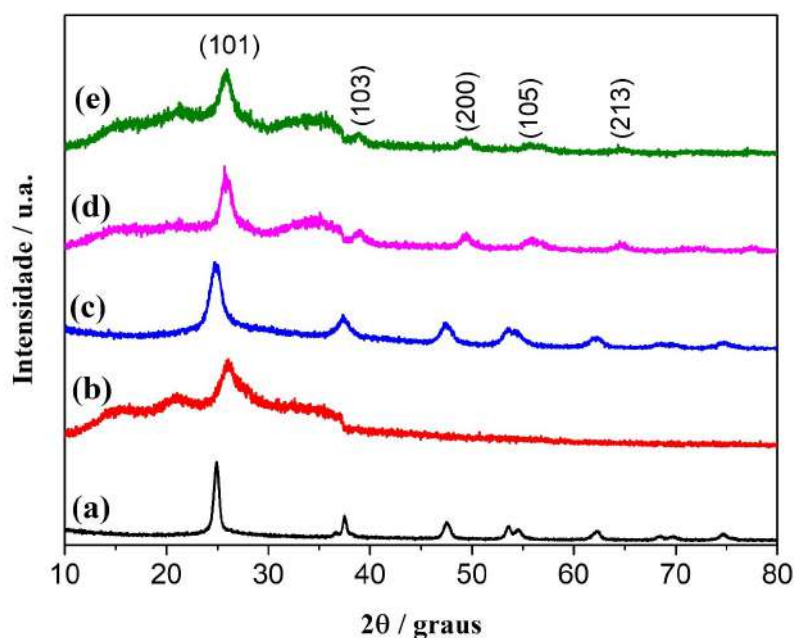
Fonte: Elaborado pela autora.

Esses resultados indicam que a estrutura cristalina foi mantida mesmo após a formação do compósito com a PANI (Figura 12). A presença de tais planos evidencia a boa dispersão do semicondutor na matriz condutora e sugere uma interface eficiente entre as fases, condição favorável à transferência de carga durante o processo fotocatalítico (Islam; Lombardi, 2022; Ma *et al.*, 2020).

4.3 Análise por difração de raios X (DRX)

A Figura 13 apresenta os difratogramas de raios X dos materiais sintetizados: (a) TiO_2 puro, (b) PANI, (c) PANI/ TiO_2 (1:1), (d) PANI/ TiO_2 (1:2) e (e) PANI/ TiO_2 (2:1). Para o TiO_2 , observam-se picos bem definidos nas posições $2\theta \approx 25,3^\circ$, $37,8^\circ$, $48,0^\circ$, $54,0^\circ$, $62,7^\circ$ e $75,0^\circ$, atribuídos aos planos (101), (004), (200), (105), (204) e (215), respectivamente, Tabela 4, compatíveis com a fase anatase segundo a ficha JCPDS n° 21-1272.

Figura 13 – Difratogramas de raios X dos materiais sintetizados: (a) TiO_2 puro, (b) PANI, (c) PANI/ TiO_2 (1:1), (d) PANI/ TiO_2 (1:2), (e) PANI/ TiO_2 (2:1).



Fonte: Elaborado pela autora.

O espectro da polianilina (PANI) exibe um padrão difuso, característico de materiais semicristalinos, com uma banda ampla entre 25 e 28° , associada à periodicidade entre cadeias poliméricas dopadas, conforme descrito por (Li *et al.*, 2013). A presença dessa banda sugere estrutura parcialmente ordenada, típica da forma condutora (emeraldina) da PANI.

De forma semelhante, em estudo realizado por Boniatti *et al.* (2014), foi observada uma sobreposição significativa entre o pico da PANI em $2\theta \approx 25^\circ$ e os picos principais dos semicondutores CdSe e TiO_2 incorporados em filmes automontados. Os autores identificaram a fase anatase do TiO_2 pelos picos em $2\theta = 25,3^\circ$, $37,8^\circ$ e $48,0^\circ$, associados aos planos (101), (004) e (200), respectivamente, além de indicarem que essa sobreposição exige o uso de técnicas complementares para distinguir as

Tabela 4 – Análise dos difratogramas de raios X (DRX) dos materiais sintetizados

Amostra	Padrões de Difração Observados	Interpretação Cristalográfica	JCPDS	Observações
TiO ₂ puro	25,3°, 37,8°, 48,0°, 54,0°, 62,7°, 75,0°	Planos (101), (004), (200), (105), (204), (215)	21-1272	Alta cristalinidade, fase anátase confirmada
PANI	Banda ampla entre 25 e 28°	Periodicidade entre cadeias poliméricas	–	Estrutura semicristalina (forma emeraldina)
PANI/TiO ₂ (1:1) PANI/TiO ₂ (2:1) PANI/TiO ₂ (1:2)	Picos de TiO ₂ preservados com menor intensidade e maior alargamento	Indicam TiO ₂ disperso e interação com PANI	21-1272	Redução da cristalinidade; indícios de ligações Ti–O–C e Ti–O–N

Fonte: Elaborado pela autora.

contribuições individuais de cada material. Essa coincidência evidencia a dificuldade de separação entre o sinal difuso da PANI e os picos cristalinos do TiO₂, reforçando o caráter semicristalino da PANI e a necessidade de análises combinadas em sistemas híbridos poliméricos.

Nos espectros de DRX (c), (d) e (e), observa-se a coexistência de características estruturais tanto da PANI quanto do TiO₂. Em todos os casos, os picos principais da fase anatase permanecem visíveis, embora com intensidades reduzidas e maior alargamento em comparação ao TiO₂ puro. Tal comportamento indica redução da cristalinidade e possível redução do tamanho de cristalito, como também relatado por (Li *et al.*, 2013), que identificaram cristalitos de TiO₂ entre 4–6 nm em sua matriz de PANI. O alargamento dos picos pode ser explicado pela adsorção do TiO₂ na matriz polimérica e pelo efeito da dopagem sobre a estrutura semicondutora.

Adicionalmente, os compósitos PANI/TiO₂ (2:1) e PANI/TiO₂ (1:2) apresentam diferenças sutis na intensidade relativa dos picos. A amostra PANI/TiO₂ (2:1) mostra maior contribuição do padrão amorfo da PANI, com redução ainda mais acentuada dos sinais cristalinos, sugerindo maior encapsulamento do TiO₂ pela matriz polimérica. Por outro lado, o compósito PANI/TiO₂ (1:2) mantém picos mais intensos do TiO₂, indicando menor interferência da PANI na estrutura cristalina do semicondutor.

Os resultados de DRX sugerem leve contração dos parâmetros de rede e aumento da largura à meia altura (FWHM) de acordo com Tabela 5, indicando menor tamanho de cristalito e/ou maior microdeformação, com incremento de defeitos e desordem cristalina (Turkten *et al.*, 2023; Abid; Hasan, 2022). Esses defeitos podem influenciar a dinâmica de cargas fotogeradas, afetando tanto a fotocatalise quanto a fotoluminescência, dependendo do equilíbrio entre separação e

recombinação (Radoičić *et al.*, 2017; Turkten *et al.*, 2023). Além disso, a PANI, por seu caráter mais amorfo e absorção no visível, tende a ampliar a resposta espectral e a favorecer a transferência/separação de cargas na interface PANI/TiO₂, contribuindo para a melhora do desempenho fotocatalítico quando sua proporção no compósito é adequadamente ajustada, como apresentado na proporção PANI/TiO₂ (2:1) (Turkten *et al.*, 2023; Radoičić *et al.*, 2017; Abid; Hasan, 2022).

Os tamanhos de cristalito, calculados pela equação de Scherrer, apresentaram as variações mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 – *Tamanhos de cristalitos e valores de FWHM (É a largura do pico, medida na metade da altura máxima do pico. Indica o quanto o pico está alargado – e esse alargamento tem relação direta com diversas propriedades físicas do material analisado)*

Fotocatalisador	Tamanho de Cristalito (nm)	FWHM
TiO ₂ puro	68,56	1,1997
PANI/TiO ₂ (1:1)	55,64	1,4719
PANI/TiO ₂ (1:2)	60,52	1,3573
PANI/TiO ₂ (2:1)	59,28	1,3854

Fonte: Elaborado pela autora.

Os tamanhos de cristalitos obtidos variam de 55,64 nm (PANI/TiO₂ 1:1) a 68,56 nm (TiO₂ puro), indicando que todos os materiais possuem estrutura nanométrica, condição ideal para processos fotocatalíticos devido à elevada área superficial específica. A FWHM destes halos, embora não esteja diretamente relacionada com o tamanho do cristalito como nos cristais, pode ainda assim fornecer informação sobre a estrutura do material, como o grau de ordem de curto alcance e as distâncias intercristalinas médias.

Por outro lado, o TiO₂ puro apresentou o maior tamanho de cristalito (68,56 nm) e o menor valor de FWHM (1,1997), evidenciando alta cristalinidade, característica típica da fase anatase.

Nos compósitos PANI/TiO₂ a composição 1:1 obteve o menor cristalito entre as associações (55,64 nm), com FWHM de 1,4719, sugerindo uma boa dispersão do TiO₂ na matriz de PANI e possível interação entre as fases, o que é benéfico para o transporte de cargas.

As composições 1:2 e 2:1 apresentaram tamanhos de cristalitos muito próximos (60,52 nm e 59,28 nm, respectivamente), com FWHM intermediários (1,3573 e 1,3854), indicando uma cristalinidade equilibrada.

Assim, a análise de DRX indica a formação de compósitos híbridos contendo TiO_2 anatase bem disperso na matriz de PANI, com alterações estruturais dependentes da razão entre os componentes. O uso da PANI favorece a integração entre as fases, mantendo a funcionalidade semicondutora do TiO_2 e permitindo sua aplicação em sistemas fotocatalíticos avançados.

4.4 Análise por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 14 apresenta os espectros de infravermelho dos diferentes materiais analisados neste estudo. Já a Tabela 6 resume as principais bandas observadas por FTIR nos diferentes materiais tratados neste estudo.

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi empregada para investigar os grupos funcionais e as possíveis interações entre a polianilina (PANI) e o dióxido de titânio (TiO_2), tanto nos materiais puros quanto nos compósitos híbridos preparados nas proporções 1:1, 1:2 e 2:1 (Chagas, 2013; Manjunatha *et al.*, 2025).

O espectro da amostra A, Figura 14, exibe bandas típicas da PANI na forma emeraldina. Observa-se ampla banda na região de $3553\text{--}3414\text{ cm}^{-1}$ atribuída aos estiramentos O–H e N–H, além de bandas em 1608 e 1292 cm^{-1} , relacionadas às vibrações dos anéis quinoide e benzenoide e ao estiramento C–N, respectivamente. A presença de banda em 934 cm^{-1} refere-se a deformações fora do plano dos anéis aromáticos, características estruturais da PANI (Asha *et al.*, 2014; Arasi *et al.*, 2009).

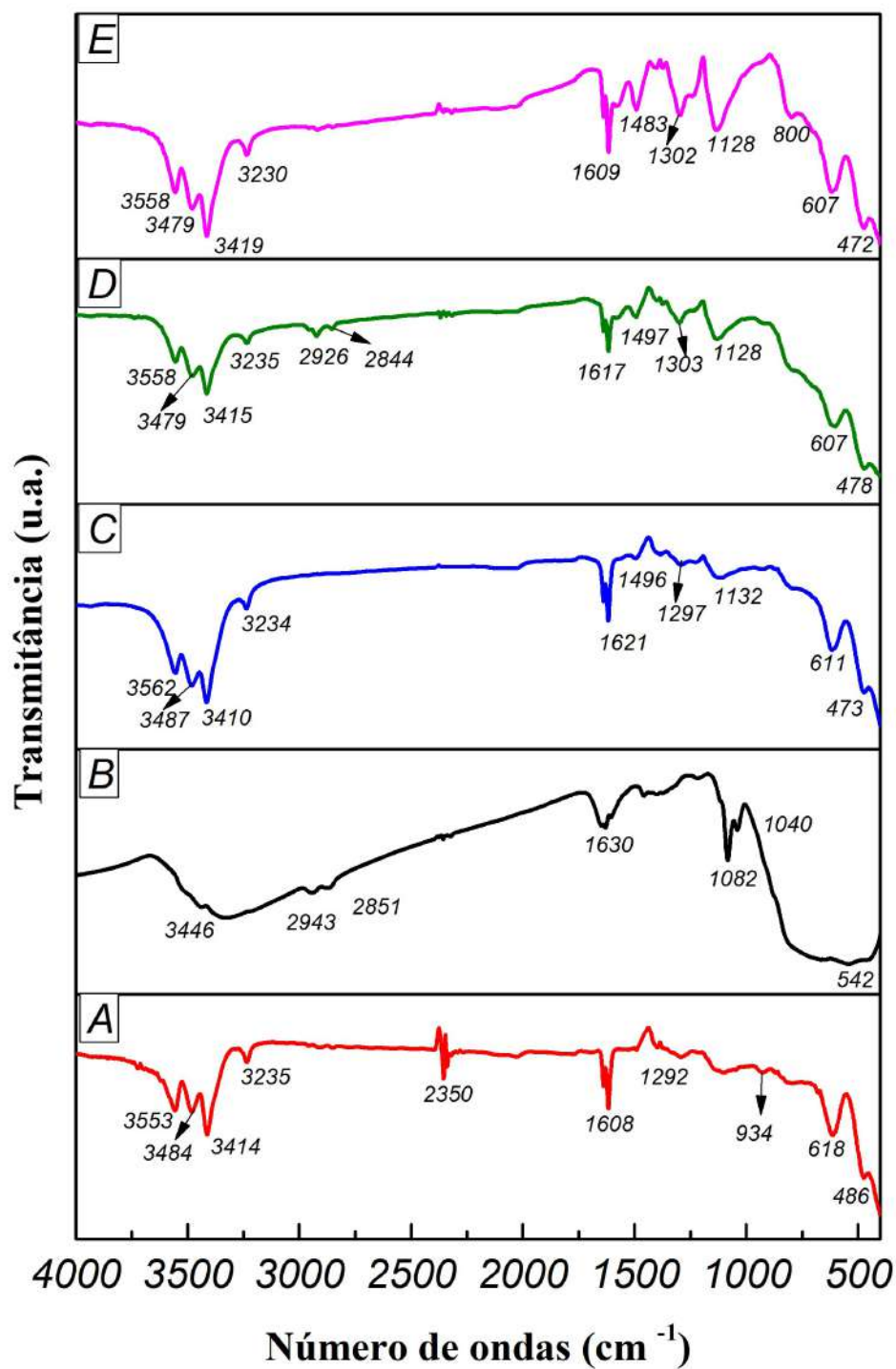
A amostra B, Figura 14, apresenta bandas amplas em 3446 cm^{-1} (estiramento O–H da água adsorvida) e em 1630 cm^{-1} (vibração H–O–H da água molecular). As bandas intensas em 1082 , 1040 e 542 cm^{-1} são atribuídas às ligações Ti–O–Ti, indicativas da estrutura cristalina do TiO_2 (Turkten *et al.*, 2023; Asha *et al.*, 2014). Também se observou elevada desordem de rede (distorções locais/defeitos), indicada pelo alargamento do envelope vibracional de Ti–O–Ti e pela forte contribuição de espécies superficiais (–OH/água adsorvida), em concordância com o comportamento evidenciado no DRX (Turkten *et al.*, 2023; Abid; Hasan, 2022).

A amostra C, Figura 14, combina bandas de ambos os componentes, confirmando a formação do compósito. São observadas bandas em $3562\text{--}3410\text{ cm}^{-1}$ (O–H/N–H), 1621 cm^{-1} (anéis quinoídes), 1496 cm^{-1} (anéis benzenoídes), 1297

cm^{-1} (C–N), e 1132 cm^{-1} (C–N⁺). A presença da banda em 611 cm^{-1} , característica de Ti–O–Ti, evidencia a incorporação do TiO₂ (Altannyhi *et al.*, 2024; Naik *et al.*, 2024).

Na amostra D, Figura 14, com maior proporção de TiO₂, há redução das intensidades das bandas orgânicas (C=C e C–N), enquanto a banda em 607 cm^{-1} (Ti–O–Ti) torna-se mais pronunciada. Bandas em 3235 cm^{-1} (O–H/N–H), $2926\text{--}2844 \text{ cm}^{-1}$ (C–H alifáticos) e $1497\text{--}1303\text{--}1128 \text{ cm}^{-1}$ (estrutura da PANI) sugerem interação parcial entre as fases (Naik *et al.*, 2024; Asha *et al.*, 2014).

Figura 14 – Espectros de infravermelho obtidos para: (A) PANI; (B) TiO_2 puro; (C) PANI/ TiO_2 (1:1); (D) PANI/ TiO_2 (1:2); e (E) PANI/ TiO_2 (2:1).



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6 – *Resumo das principais bandas observadas por FTIR nos diferentes materiais.*

Material	Principais (cm ⁻¹)	Bandas	Atribuição Principal	Observação
PANI (A)	~3553, ~3414, ~1292, ~934	~1608,	O–H/N–H, C=C (qui- noide/benzenoide), C–N, deformações aro- máticas	Estrutura emeraldina preservada
TiO ₂ (B)	~3446, ~1630, ~1040, ~542	~1082,	O–H, H–O–H, Ti–O–Ti	Rede cristalina com gru- pos hidroxilas
PANI/TiO ₂ (1:1) (C)	~3562, ~3410, ~1496, ~1297, ~611	~1621, ~1132,	O–H/N–H, C=C, C–N, C–N ⁺ , Ti–O–Ti	Bandas de ambas as fa- ses, formação do compó- sito confirmada
PANI/TiO ₂ (1:2) (D)	~3235, ~2926, ~1497, ~1303, ~607	~2844, ~1128,	C–H alifáticos, C–N, C– N ⁺ , Ti–O–Ti	Predomínio da fase inor- gânica com preservação parcial da PANI
PANI/TiO ₂ (2:1) (E)	~3558, ~3419, ~1483, ~1302, ~800, ~607, ~472	~1609, ~1128,	O–H/N–H, C=C, C–N, C–N ⁺ , Ti–O–Ti	Alta fração de PANI com interação interfacial complexa

Fonte: Elaborado pela autora com base em Pavia *et al.* (2015).

Na amostra E, Figura 14, com a maior fração de PANI, destacam-se as bandas de 3558 a 3419 cm⁻¹ (N–H e O–H), 1609 e 1483 cm⁻¹ (C=C), 1302 e 1128 cm⁻¹ (C–N/C–N⁺), além das bandas em 607 e 472 cm⁻¹, atribuídas às ligações Ti–O–Ti e possíveis deformações dos anéis aromáticos. Isso sugere uma interação interfacial mais complexa (Manjunatha *et al.*, 2025; Turkten *et al.*, 2023).

Diante disso, a análise dos espectros de FTIR das amostras A a E permite indiciar a formação de compósitos híbridos PANI/TiO₂, com evidências de interações químicas entre as fases orgânica e inorgânica, como a formação de ligações Ti–O–C e a preservação dos cátions radicais C–N⁺ (Arasi *et al.*, 2009; Altannyhi *et al.*, 2024).

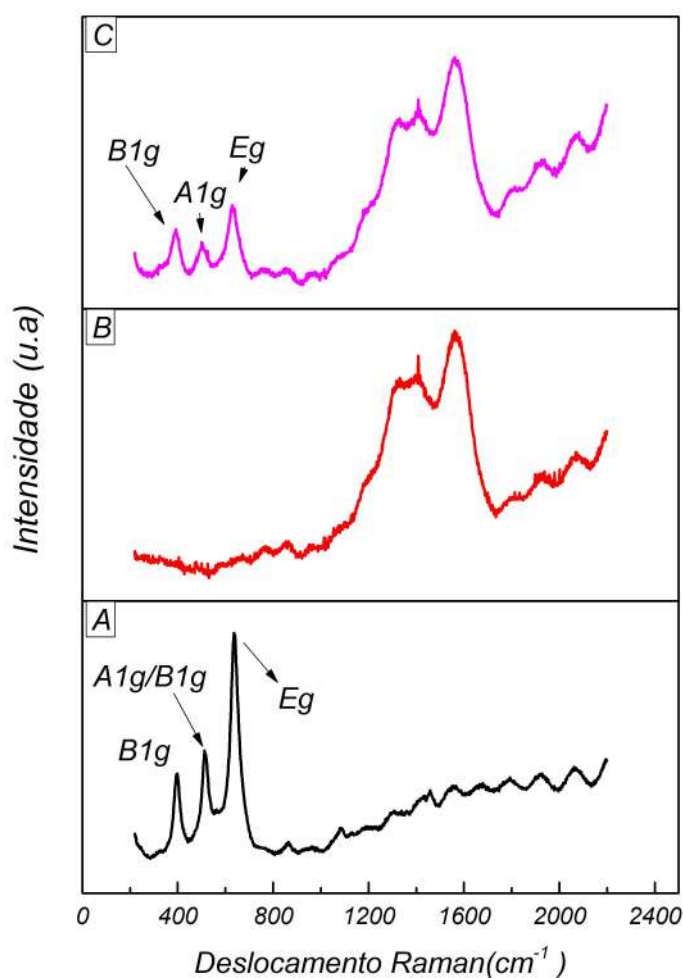
A proporção entre os componentes influencia significativamente o padrão vibracional, o que pode impactar a eficiência em aplicações fotocatalíticas devido à melhoria na separação dos pares elétron-buraco e à geração de espécies reativas sob irradiação (Mahmoud *et al.*, 2025; Naik *et al.*, 2024).

4.5 Análise por Espectroscopia Raman

Na Figura 15 os espectros Raman confirmam a coexistência das vibrações típicas da fase anatase do TiO₂ (A) e das bandas associadas à estrutura conjugada da PANI (C) (Islam; Lombardi, 2022; Ananth *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2025). Nos traços do TiO₂ (A) e do PANI/TiO₂ (C) observam-se nitidamente as bandas fundamentais da fase anatase: B_{1g}(~395 cm⁻¹), A_{1g}/B_{1g} (~513–520 cm⁻¹) e E_g (~630–640 cm⁻¹)

(Ananth *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2025). A ausência das bandas típicas do rutilo B_{2g} ($\sim 447\text{ cm}^{-1}$) e A_{1g} ($\sim 612\text{ cm}^{-1}$) confirma que a fase predominante é anatase (Islam; Lombardi, 2022).

Figura 15 – Espectros Raman dos materiais: (A) TiO_2 puro, (B) polianilina (PANI) e (C) compósito PANI/ TiO_2 (2:1).



Fonte: Elaborado pela autora.

No espectro da PANI (B) não aparecem modos de rede do TiO_2 , como esperado; o sinal é dominado pelas vibrações do polímero, situadas na região de $600\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$ (Islam; Lombardi, 2022).

A razão de intensidades E_g/B_{1g} elevada e a largura de linha moderada do modo E_g sugerem partículas nanocristalinas com ordem local preservada (Khan *et al.*, 2025; Ananth *et al.*, 2022). Contudo, há evidências de desordem de rede, indicada

pelo alargamento e pela assimetria moderada dos modos Raman (especialmente E_g) e por pequenas variações de posição e intensidade de bandas em relação ao TiO_2 puro (Khan *et al.*, 2025), o que é consistente com a presença de defeitos estruturais (por exemplo, vacâncias de oxigênio e distorções locais), microdeformação e efeitos de interface no compósito (Khan *et al.*, 2025; Turkten *et al.*, 2023). Esse comportamento é coerente com as evidências obtidas por DRX e FTIR (Abid; Hasan, 2022).

As bandas adicionais em $1316\text{--}1563\text{ cm}^{-1}$, associadas a C-N^+ e C=C quinoide, sofreram ligeiro deslocamento em relação à PANI pura, indicando a formação de um sistema híbrido PANI/ TiO_2 (C) com forte interação interfacial (Islam; Lombardi, 2022; Khan *et al.*, 2025). Essas modificações vibracionais são atribuídas à formação de ligações Ti-O-C e à transferência de carga entre os orbitais π da PANI e os orbitais d do Ti, o que favorece o acoplamento $p\text{--}n$ e reduz a recombinação elétron-lacuna (Islam; Lombardi, 2022).

Desse modo, o espectro Raman corrobora os resultados de UV-Vis e *band gap*, demonstrando que o compósito PANI/ TiO_2 apresenta características híbridas — estruturais e eletrônicas — responsáveis pela sua melhor resposta fotocatalítica sob luz visível (Ananth *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2025).

4.6 Análise óptica por Reflectância Difusa (UV-Vis) e Determinação do *band gap*

A análise da energia de gap óptico (E_g) foi realizada a partir dos espectros de absorção UV-Vis (200–800 nm) e das curvas de Tauc, conforme apresentado nas Figuras 16, 17 e 18. Os resultados permitiram comparar o comportamento eletrônico do dióxido de titânio (TiO_2), da polianilina (PANI), e do compósito PANI/ TiO_2 (2:1), relacionados na Tabela 7, possibilitando inferências sobre as interações eletrônicas entre as fases condutora e semicondutora.

Tabela 7 – *Resumo dos valores obtidos de Band gap: Valores de energia de gap óptico (E_g) determinados a partir das curvas de Tauc.*

Amostra	E_g Direto (eV)	E_g Indireto (eV)	Observação
PANI	–	2,69	Transição indireta; absorção visível
{TiO ₂	2,98	2,18	Anatase; absorção na região UV
PANI/ TiO ₂ (2:1)	2,57	2,28	Redução do <i>band gap</i> ; sinergia interfacial

Fonte: Elaborado pela autora.

O TiO₂ puro (Figura 16) exibiu máximos de absorção em 219,55 nm e 331,2 nm, associados à excitação de elétrons da banda de valência O 2p para a banda de condução Ti 3d, ou seja, a excitação de elétrons da banda de valência (oxigênio) para a banda de condução (titânio), característica da fase anatase. Esse tipo de transição é indireta permitida, comum no TiO₂ anatase (Khan *et al.*, 2025; Ma *et al.*, 2020).

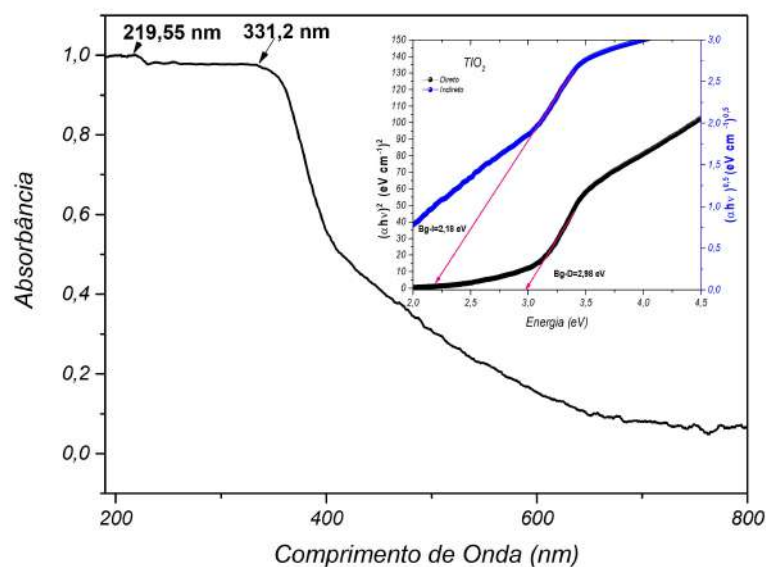
O gráfico de Tauc (inserção na Figura 16) revelou valores (Tabela 7), de $E_g(\text{direto}) = 2,98 \text{ eV}$ e $E_g(\text{indireto}) = 2,18 \text{ eV}$, compatíveis com a literatura para anatase nanocristalina (entre 3,0 eV e 3,2 eV) para transições diretas (Sadia *et al.*, 2024). A diferença observada entre os valores teóricos e experimentais pode ser atribuída ao confinamento quântico em partículas de dimensões nanométricas e à presença de estados superficiais (Edvinsson, 2018).

O espectro UV–Vis da PANI (Figura 17) apresentou duas bandas características em 209 nm e 276 nm, atribuídas, respectivamente, às transições $\pi-\pi^*$ do anel benzenoide e à transição excitônica do sistema quinoide. Essas transições são típicas da forma emeraldina, confirmando o caráter conjugado e parcialmente dopado do polímero (Sadia *et al.*, 2024; Radoičić *et al.*, 2017). O gráfico de Tauc (inserção na Figura 17) indica uma transição indireta com $E_g = 2,69 \text{ eV}$, (Tabela 7), coerente com o relatado para PANI em estado semicondutor (2,5–2,8 eV), evidenciando que o material absorve luz visível e pode atuar como sensibilizador quando combinado a semicondutores inorgânicos (Radoičić *et al.*, 2017).

Para o compósito PANI/TiO₂ (Figura 18), observa-se um deslocamento da borda de absorção em direção ao vermelho, indicando uma redução significativa da energia de gap. O Tauc Plot mostrou valores (Tabela 7), de $E_g(\text{direto}) = 2,57 \text{ eV}$ e $E_g(\text{indireto}) = 2,28 \text{ eV}$, inferiores aos do TiO₂ puro. Essa diminuição demonstra a formação de uma interface heterojuncional entre a PANI e o TiO₂, promovendo

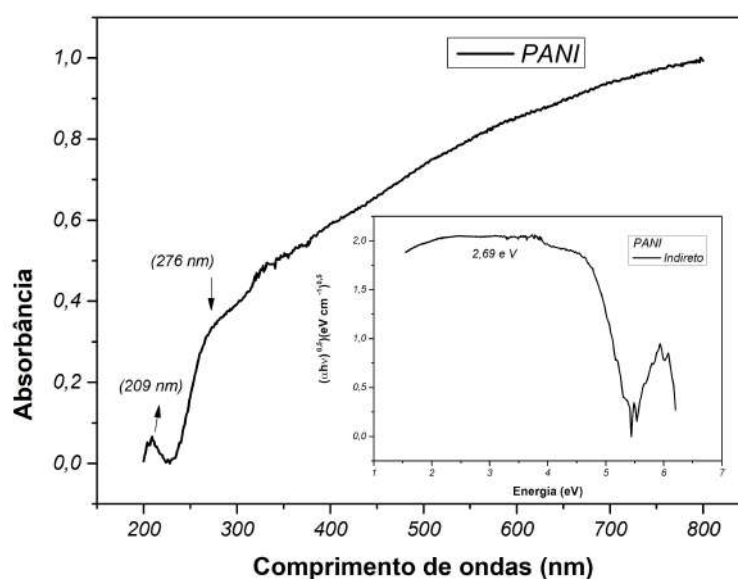
uma melhor separação das cargas fotogeradas e ampliando a absorção na região visível. O acoplamento das bandas resulta na transferência de elétrons do nível π^* da PANI para a banda de condução do TiO_2 , enquanto lacunas são retidas na banda de valência do polímero. Essa configuração favorece a diminuição da recombinação eletrônica e o aumento da eficiência fotocatalítica sob iluminação visível (Radoičić *et al.*, 2017).

Figura 16 – *Reflectância difusa Band gap TiO_2 puro.*

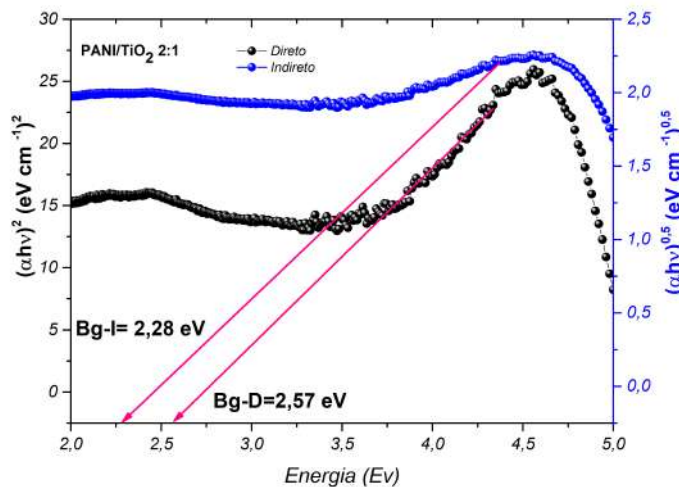


Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 – *Reflectância Difusa, band gap para o composto PANI*



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 – *Reflectância Difusa PANI/ TiO₂ (2:1).*

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos por meio da análise de reflectância difusa e das curvas de Tauc evidenciam a influência significativa da incorporação da PANI sobre as propriedades ópticas do TiO₂. A redução do *band gap* no compósito PANI/ TiO₂ indica uma maior capacidade de absorção na região do visível e sugere a formação de uma interface heterojuncional favorável à separação de cargas fotogeradas. Essa modificação eletrônica é essencial para aplicações fotocatalíticas, pois contribui para o aumento da eficiência sob iluminação solar (Putri *et al.*, 2025; Dou *et al.*, 2025). Dessa forma, os dados ópticos complementam os demais resultados estruturais e morfológicos apresentados neste trabalho, corroborando o potencial do compósito sintetizado como material ativo em processos fotoinduzidos.

4.7 Ensaios de fotodegradação do corante Ponceau 4R

A fotodegradação assistida por materiais semicondutores tem se mostrado uma abordagem promissora e ambientalmente amigável para o tratamento de águas contaminadas por corantes orgânicos (Lee *et al.*, 2020; Turkten *et al.*, 2023). Diversos estudos relatam a eficácia de sistemas fotocatalíticos baseados em TiO₂ e seus compósitos híbridos, como PANI/TiO₂, na degradação do Ponceau 4R sob irradiação UV-visível, evidenciando a formação de espécies reativas e o papel da adsorção na superfície do catalisador como etapa importante para a eficiência do processo (Turkten *et al.*, 2023; Marmitt; Pirotta; Stülp, 2010).

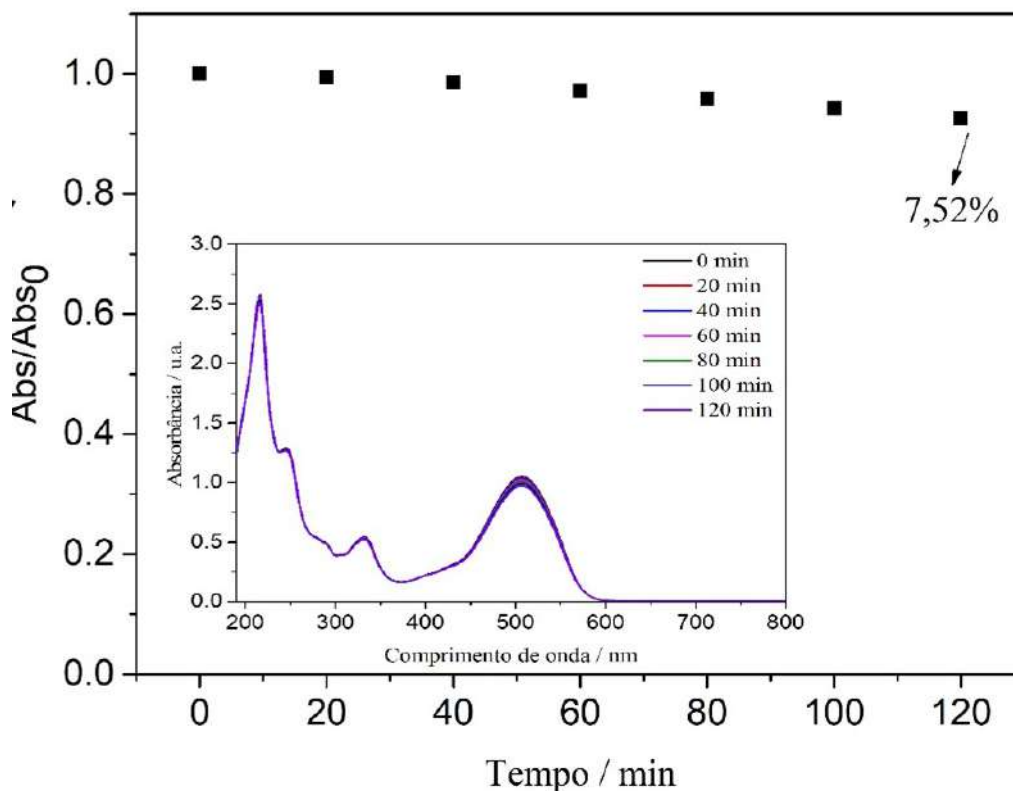
4.7.1 Avaliação da influência da radiação fornecida por lâmpada de 16 W, na degradação do corante Ponceau 4R por fotólise direta.

A fotólise direta, nas condições experimentais em estudo, não é suficiente para promover reações que propiciem a degradação do corante Ponceau 4R, já que este corante é reconhecidamente de difícil degradação por ação de radiação (Araújo *et al.*, 2021). A baixa degradabilidade desse corante por fotólise direta já foi avaliada usando radiação de comprimento de onda a partir de 200 nm (Marmitt; Pirotta; Stülp, 2010).

O resultado ruim para a fotólise direta do Ponceau 4R, sob as nossas condições experimentais, pode ser verificado através dos resultados de medidas de absorbância de UV-Visível (Figura 19).

Por conseguinte, dos espectros de absorção UV/Vis deste corante, pode-se observar que há uma redução ínfima nos valores de absorbância, indicando também baixa eficiência na remoção de cor (Figura 19).

Figura 19 – Absorbância normalizada em função do tempo, para a degradação do P4R por fotólise direta. *Inserto: Espectro de absorção para as alíquotas recolhidas ao longo da fotólise direta do Ponceau 4R . Condições experimentais: Reator em escala de laboratório.*



Fonte: Elaborado pela autora.

Em concordância com o que foi relatado nesta pesquisa, Marmitt, Pirotta e Stülp (2010), em estudos anteriores, mostrou que a fotólise direta apresenta baixa eficiência na degradação de corantes como o Ponceau 4R, com redução de apenas 11,6% na absorbância após tratamento com lâmpada de mercúrio de 400 (W).

A fotólise direta, mesmo sob radiação UVC, apresenta eficiência limitada na degradação de corantes azo, pois esses compostos absorvem pouca luz na faixa emitida e possuem estruturas químicas estáveis. Marbaniang *et al.* (2024) estudaram o corante Ponceau Xylidine, similar ao Ponceau 4R, e observaram que altas taxas de mineralização só foram alcançadas quando a radiação foi combinada com oxidantes, como peróxido de hidrogênio (H_2O_2) ou persulfato, em processos UV/oxidante ou Fenton. Nessas condições, a mineralização chegou a 92% em pH 3. Sem o uso de oxidantes, a degradação foi muito menor, confirmando que a fotólise direta, nas condições testadas, não é suficiente para quebrar a estrutura do corante. Esses resultados mostram a importância de empregar processos oxidativos avançados para

aumentar a degradação e a mineralização do Ponceau 4R.

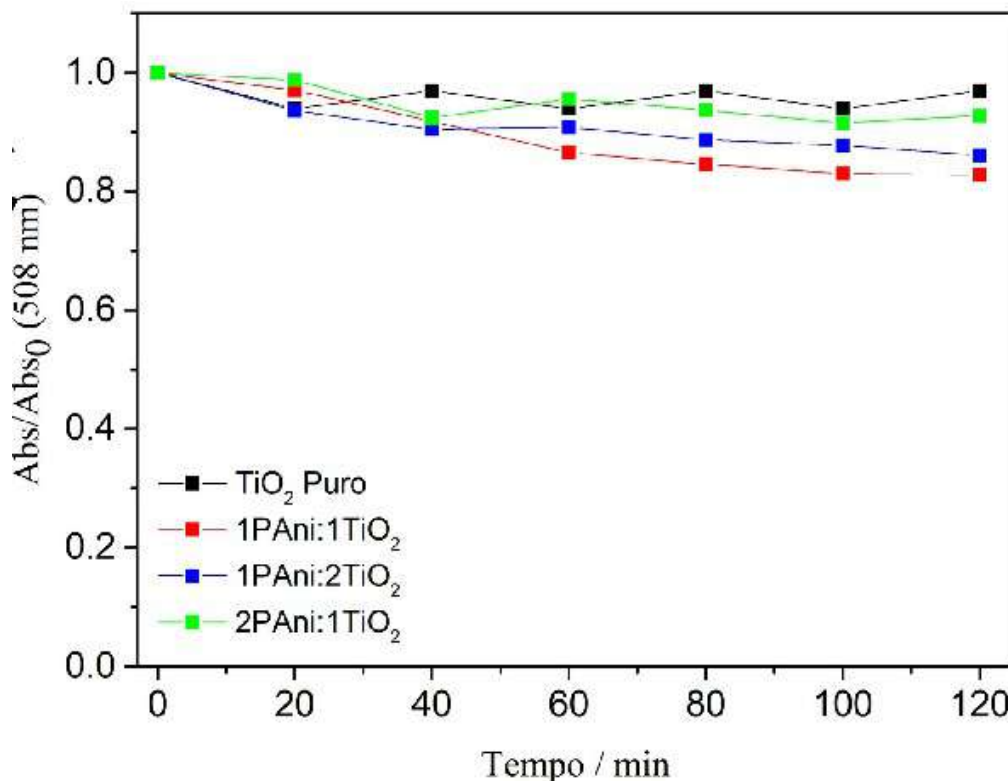
4.8 Avaliação da Adsorção dos fotocatalisadores

A adsorção consiste na acumulação de moléculas ou íons na superfície de um material sólido, resultante de interações físicas (fisisorção), como forças de van der Waals e atrações eletrostáticas, ou de interações químicas (quimissorção), envolvendo a formação de ligações mais fortes e específicas (Machado; Pereira; Silva, 2025; Silva; Pineda; Bergamasco, 2015). Em sistemas aquosos, esse fenômeno é favorecido pela elevada área superficial e pela presença de sítios ativos, podendo atuar como etapa preliminar relevante em processos de remoção de contaminantes, ao concentrar o poluente na interface sólido-líquido e, frequentemente, estabelecer um equilíbrio de adsorção-dessorção antes da etapa reacional (Silva; Pineda; Bergamasco, 2015; Tomaso *et al.*, 2024).

Em contraste, a absorção refere-se à incorporação do soluto ao interior do material, com distribuição em sua matriz ou volume, caracterizando um processo volumétrico (Cipriano; Silvino; Oliveira, 2024). Assim, enquanto a adsorção é predominantemente superficial e depende diretamente das propriedades da interface, a absorção envolve difusão e acomodação do composto na estrutura do material, resultando em comportamentos cinéticos e mecanismos distintos.

A eficiência dos materiais sintetizados na adsorção do corante Ponceau 4R foi investigada por meio de espectrofotometria na região do UV-Vis, utilizando o comprimento de onda de 508 nm, correspondente ao máximo de absorção do corante. Os dados obtidos indicaram variações sutis na capacidade adsorvente entre os diferentes fotocatalisadores avaliados. Na Figura 20, são apresentados os perfis de adsorção dos óxidos de titânio testados, com destaque para o material PANI/ TiO₂ (1:1), que se sobressaiu em relação aos demais por seu desempenho superior como adsorvente.

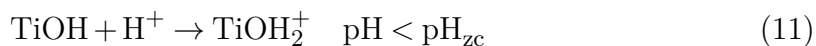
Figura 20 – Avaliação da adsorção dos fotocatalisadores sintetizados. Condições experimentais: ausência de luz; tempo de reação: 120 min; $[P4R] = 31,2 \text{ mg.L}^{-1}$; $[\text{Fotocatalisador}] = 100 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{pH} = \text{Natural (6,9)}$.



Fonte: Elaborado pela autora.

O experimento de adsorção dos materiais foi realizado em ambiente escuro, com o intuito de avaliar a capacidade dos fotocatalisadores adsorver a matéria orgânica em sua superfície, sem a influência da radiação. Essa etapa é essencial, uma vez que a adsorção inicial impacta diretamente na eficiência da degradação fotocatalítica subsequente.

A adsorção está relacionada ao pH da solução, pois este parâmetro afeta a carga superficial dos catalisadores e do estado iônico, pois ele não se ioniza como numa reação, e sim as cargas são adsorvidas na superfície: A superfície do TiO₂ possui grupos hidroxila (Ti-OH) que podem ser protonados ou desprotonados dependendo do pH do meio. Em meio ácido, grupos hidroxila superficiais (Ti-OH) podem ser protonados, formando espécies Ti-OH_2^+ , enquanto em condições básicas, eles podem perder prótons, formando grupos TiO^- . Essa adsorção de íons influencia a carga superficial do TiO₂ e sua interação com outras moléculas. As Equações 11 e 12 ilustram esse comportamento, demonstrando a relação entre o pH do meio e o ponto de carga zero (pH_{pzc}) dos materiais.



A Equação 11 descreve a condição em meio ácido, na qual o pH da solução é inferior ao pH_{pzc} , resultando em uma superfície catalítica globalmente carregada positivamente. Em contrapartida, conforme mostra a Equação 12, em pH superior ao pH_{pzc} , a superfície torna-se predominantemente negativa.

Considerando que o corante Ponceau 4R (P4R) apresenta carga negativa em praticamente toda a faixa de pH, é esperado que haja maior interação eletrostática entre o corante e a superfície do catalisador em meios ácidos ($\text{pH} < 6,2$), onde predominam cargas positivas na superfície do material.

Embora os valores específicos de pH_{pzc} dos óxidos sintetizados não tenham sido determinados, os resultados sugerem que a eficiência da degradação fotocatalítica, especialmente em seus estágios iniciais, não está diretamente condicionada a esse parâmetro. Dessa forma, infere-se que o processo de degradação tem início preferencialmente na interface solução/superfície do catalisador, sendo impulsionado pela geração de espécies reativas (radicais) sob irradiação. Na ausência de luz, a degradação observada é praticamente nula, limitada apenas a interações físico-químicas superficiais entre adsorvato e adsorvente.

A adsorção do corante Ponceau 4R também foi investigada por Souza *et al.* (2023) em ambiente escuro, visando avaliar a interação do corante com diferentes materiais adsorventes sem interferência da radiação. Os resultados indicam que a eficiência do processo depende fortemente do pH da solução, o qual influencia a carga superficial do adsorvente e, consequentemente, a atração eletrostática com o corante, que se mantém aniônico em ampla faixa de pH.

4.9 Análise dos Resultados de degradação e cinética

Os dados experimentais obtidos para os compósitos de PANI/TiO₂ em diferentes proporções demonstraram desempenho fotocatalítico significativamente superior em relação ao TiO₂ puro conforme o Quadro 3. A proporção 2:1 (PANI:TiO₂) apresentou a maior taxa de degradação do corante avaliado, alcançando 99,73%, além da maior constante aparente de velocidade da reação ($k = 0,05180 \text{ min}^{-1}$), indicando uma maior eficiência cinética conforme a Figura 21.

Quadro 3 – *Comparação da eficiência de degradação e parâmetros cinéticos para diferentes proporções de PANI:TiO₂.*

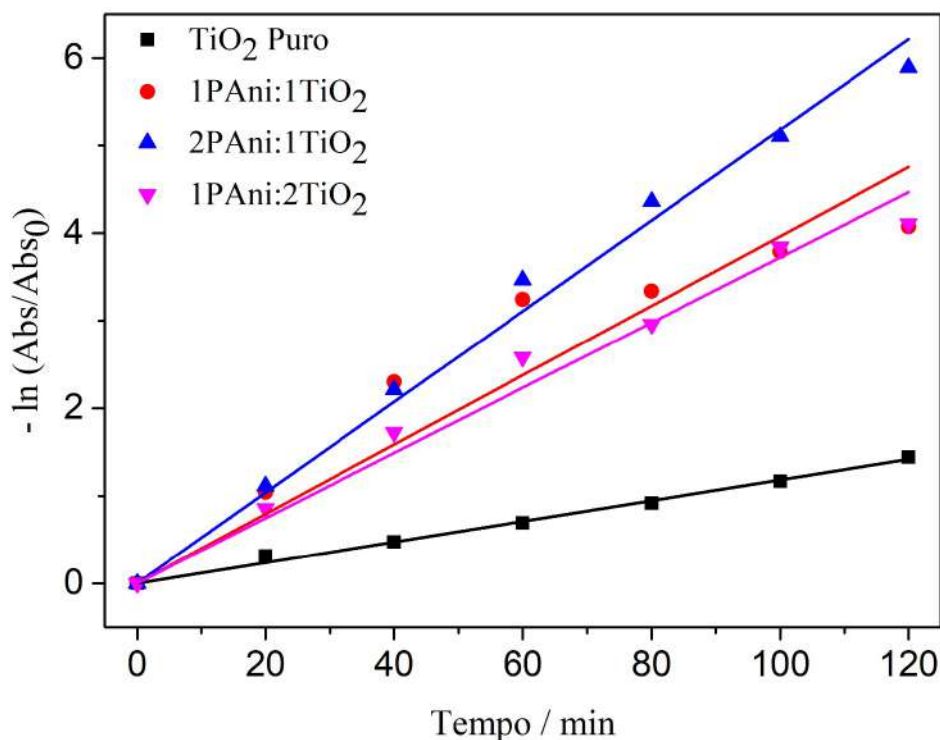
Proporção (PANI : TiO ₂)	Degradação (%)	unidade (min ⁻¹)	R ² ajustado
1 : 1	98,30	0,03962	0,9634
1 : 2	98,35	0,03722	0,9923
2 : 1	99,73	0,05180	0,9963
TiO ₂ puro	76,36	0,01180	0,9983

Fonte: Elaborado pela autora.

Na proporção 1:2, embora a taxa de degradação tenha sido próxima à da proporção 1:1 (98,35% e 98,30%, respectivamente), o coeficiente de determinação ajustado (R² ajustado) foi superior (0,9923), sugerindo um modelo linear mais adequado ao comportamento cinético do sistema, ou seja, refletindo que a degradação do corante ao longo do tempo segue uma tendência previsível e estatisticamente consistente.

Por outro lado, o TiO₂ puro apresentou a menor eficiência de degradação (76,36%) e a menor constante cinética ($k = 0,01180 \text{ min}^{-1}$), apesar de seu elevado R² ajustado (0,9983), evidenciando que a presença de polianilina potencializa significativamente a fotodegradação, tanto pela melhoria da transferência de carga quanto pela redução da recombinação dos pares elétron-buraco.

Figura 21 – Ajuste linear dos dados experimentais para a determinação da constante de velocidade aparente (k) da degradação fotocatalítica do corante Ponceau 4R. A inclinação de cada reta representa o valor de k , evidenciando o aumento da eficiência cinética com o acréscimo de PANI na matriz catalítica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esses resultados indicam que a adsorção com PANI, especialmente na razão 2:1, promove um desempenho cinético e de degradação superior, sendo a composição mais promissora para aplicações em fotocatalise heterogênea. Esse comportamento pode ser atribuído à capacidade da PANI de favorecer a aproximação do poluente às superfícies ativas do TiO₂, aumentando a eficiência do processo fotocatalítico.

Amorim *et al.* (2021) demonstram que a combinação de polímeros condutores, como o polipirrol (PPy), com TiO₂ resulta em compósitos com maior capacidade de adsorção e eficiência fotocatalítica, especialmente sob luz visível. A presença do polímero melhora a separação das cargas foto geradas e favorece o transporte eletrônico, além de ampliar a interação com os poluentes devido à maior afinidade superficial. Esse efeito sinérgico também se aplica à PANI, que atua de forma similar ao PPy, promovendo desempenho superior em compósitos com maior proporção do polímero, como na razão 2:1.

De forma semelhante, Wolff *et al.* (2022) destacam que estratégias de imobilização que promovem boa adesão e distribuição do fotocatalisador em suportes — como o carvão ativado ou materiais poliméricos — podem ampliar a área de contato entre os reagentes e os sítios catalíticos, otimizando tanto a adsorção quanto a degradação. Assim, a maior razão de PANI pode estar atuando como suporte condutor funcional, favorecendo essa interação e justificando o melhor desempenho observado.

Aplicação da Taxonomia de Bloom no Ensino Interdisciplinar: Fotocatálise e Impressão 3D como Estratégias para o Ensino de Ciências e Sustentabilidade

Esta proposta pedagógica propõe um percurso formativo que abrange desde a Educação Fundamental (Anos Iniciais e Finais) até o Ensino Médio e Técnico, envolvendo o tema da fotocatálise aplicada ao tratamento de efluentes. Utiliza a impressão 3D como estratégia de inovação e aprendizagem prática, possibilitando a criação de dispositivos e experimentos que ilustram a degradação de corantes em água (exemplo: Ponceau 4R). A proposta visa garantir que cada etapa do ensino explore o tema em um nível adequado de profundidade, promovendo uma evolução conceitual, prática e tecnológica compatível com a maturidade dos estudantes. Além disso, este trabalho estrutura-se a partir de referenciais teórico-metodológicos e relaciona o planejamento pedagógico às dimensões da Taxonomia de Bloom, visando o desenvolvimento de competências e habilidades em níveis crescentes de complexidade.

A preocupação com a sustentabilidade e a preservação dos recursos hídricos tem ganhado cada vez mais relevância, tanto na esfera acadêmica quanto na sociedade em geral. O corante Ponceau 4R, amplamente utilizado na indústria alimentícia, exemplifica como substâncias corantes podem contaminar cursos d'água e efluentes domésticos ou industriais, resultando em potenciais impactos ambientais (Azevedo; Oliveira; Cavalcanti, 2020).

A fotocatálise aparece como uma tecnologia limpa e inovadora, na qual materiais semicondutores como o dióxido de titânio (TiO_2) podem, na presença de luz, favorecer reações de oxidação e degradação de poluentes orgânicos (Santos; Marinho, 2021). Além disso, a dopagem do TiO_2 (por exemplo, com nitrogênio) e a combinação com polímeros condutores (como a polianilina, PANI, por exemplo) otimizam o processo, ampliando a eficiência de degradação na faixa de luz visível

(Vargas *et al.*, 2018).

Esta proposta pedagógica busca contemplar diferentes níveis de ensino – Ensino Fundamental I, Fundamental II, Ensino Médio e Ensino Técnico –, adaptando a complexidade conceitual e as atividades práticas conforme a maturidade de cada faixa etária, mas mantendo a temática central: “*Como a tecnologia fotocatalítica pode contribuir para a sustentabilidade e o tratamento de efluentes?*”. A utilização de impressoras 3D oferece uma vivência prática de prototipagem e experimentação, tornando o aprendizado mais dinâmico e interativo (Barbosa, 2024).

Busca-se também, fortalecer o referencial teórico e prático de maneira a fornecer subsídios para pesquisas mais avançadas no campo de materiais fotocatalíticos e processos de ensino-aprendizagem, especialmente quando ancorados na Taxonomia de Bloom.

5.1 Fundamentação Teórica e Taxonomia de Bloom

Conforme Trevisan e Amaral (2016), Andrade e Freitag (2021) a Taxonomia de Bloom (e sua versão revisada) é uma estrutura de classificação de objetivos educacionais que organiza as habilidades de pensamento em níveis de complexidade progressiva. Tradicionalmente, essas categorias são:

1. **Lembrar**: resgatar informações aprendidas.
2. **Entender** : interpretar, exemplificar, resumir, inferir.
3. **Aplicar**: usar a informação em novas situações, resolver problemas.
4. **Analisar**: decompor informações, relacionar partes, reconhecer padrões.
5. **Avaliar**: julgar valor, criticar, argumentar com base em critérios.
6. **Criar**: construir algo novo, propor soluções originais, inovar.

Para cada nível de ensino (Fundamental I, Fundamental II, Médio e Técnico), propõe-se que as atividades estejam alinhadas a metas específicas, cobrindo diferentes estágios da Taxonomia de Bloom. Dessa forma, os alunos podem, de modo progressivo (Ferraz; Belhot, 2010) desenvolver habilidades conforme o nível de ensino:

- **Fundamental I**: Foco em *Lembrar* e *Entender*, com introdução lúdica do tema.
- **Fundamental II**: Avanço em *Aplicar* e *Analisar* por meio de experimentos simples.

- **Ensino Médio:** Ampliação de *Analisar*, *Avaliar* e *Aplicar* com protótipos e pesquisas básicas.
- **Ensino Técnico:** Consolidação de *Avaliar* e *Criar*, incluindo inovação de processos, desenvolvimento de reatores em 3D e análise aprofundada de dados.

Conceição *et al.* (2024) discutem a integração da Taxonomia de Bloom à aprendizagem colaborativa no *Novo Ensino Médio* (NEM) para favorecer o protagonismo discente, a interação dinâmica entre estudantes e a articulação com as competências da BNCC, contribuindo para reduzir evasão e repetência e para o desenvolvimento cognitivo. No plano pedagógico, o trabalho enfatiza que alinhar Bloom ao NEM e à *Base Nacional Comum Curricular* (BNCC) promove tomada de decisão e a resolução de problemas pelos estudantes, reforçando a centralidade do aluno no processo de aprendizagem. Por fim, são destacados os desafios estruturais, sobretudo a necessidade de formação continuada para que docentes integrem teoria e prática e revisem métodos frente às demandas contemporâneas.

Butt *et al.* (2018) propõem a criação de uma ontologia chamada TEDEO (*Transdisciplinary Engineering Design Education Ontology*) para integrar e estruturar o conhecimento sobre processos de *design* de diferentes disciplinas da engenharia. Utilizando entrevistas com professores, análise de material didático e um exercício baseado na Taxonomia de Bloom, o estudo identifica conceitos e atividades comuns em diversas engenharias (como Mecânica, Civil, Elétrica e Computação), categorizando-os em um modelo unificado. Essa ontologia visa promover o pensamento sistêmico e a abordagem transdisciplinar no ensino de engenharia, facilitando a formação de profissionais capazes de compreender e integrar diferentes áreas no desenvolvimento de projetos complexos.

Williams (2017) sugere uma atividade aplicada para promover a aprendizagem significativa em cursos universitários, combinando os princípios da Taxonomia de Bloom com a Teoria da Educação de Adultos de Malcolm Knowles. A atividade consiste na criação de um "diário de aprendizagem" onde os estudantes respondem semanalmente a perguntas guiadas por diferentes níveis cognitivos de Bloom (como conhecimento, compreensão, aplicação, análise, síntese e avaliação). O exercício é flexível, adaptável a diversas disciplinas e visa reforçar a ligação pessoal dos alunos com o conteúdo, melhorar suas habilidades de escrita e pensamento crítico, e aumentar a retenção e a aplicação do conhecimento adquirido, considerando especialmente o perfil e as necessidades dos aprendizes adultos.

Pappas, Pierrakos e Nagel (2013) descrevem a aplicação da Taxonomia de Bloom como estrutura para ensinar sustentabilidade em cursos de engenharia, organizando o desenvolvimento cognitivo dos estudantes em quatro contextos interligados: social, ambiental, econômico e técnico. Ao longo de um currículo de seis

disciplinas em três anos, financiado pela (*National Science Foundation*) NSF, os alunos foram expostos a estudos de caso de sustentabilidade e atividades práticas, progredindo gradativamente pelos níveis de Bloom — do conhecimento básico à avaliação crítica — enquanto aprendiam a integrar os diferentes aspectos da sustentabilidade em suas soluções de projeto. Os resultados mostraram que os estudantes desenvolveram uma visão sistêmica, sendo capazes de abordar problemas de forma interdisciplinar e considerando as inter-relações complexas entre os contextos de sustentabilidade.

Tíjaro-Rojas *et al.* (2016) apresenta a metodologia SISA (*Systematic and Integrative Sequence Approach*) como uma sequência pedagógica sistemática e integradora, desenvolvida para promover o aprendizado de conceitos complexos em engenharia, especialmente no contexto de perfis de velocidade hidrodinâmica em escoamentos viscosos. O SISA estrutura o ensino baseado nos níveis cognitivos da Taxonomia Revisada de Bloom, desde a memorização até a avaliação crítica, preparando os alunos para atingir a criação de novos conhecimentos. Sua aplicação é exemplificada em aulas de mecânica dos fluidos, promovendo aprendizado ativo e colaborativo, integrando conhecimentos prévios de matemática e física, e auxiliando na construção de perfis de velocidade de maneira lógica e sequencial. A metodologia mostrou, através de um estudo exploratório com estudantes de engenharia química, que contribui para maior compreensão, retenção e capacidade de aplicação prática dos conteúdos aprendidos.

Yang (2009) sugere o uso de uma abordagem interdisciplinar para tornar disciplinas híbridas mais relevantes aos estudantes, especialmente em contextos que exigem a integração de diferentes áreas do conhecimento, como Direito para Administração ou Comunicação Empresarial para estudantes de Letras. A autora defende que, para superar a fragmentação de conteúdos e o desinteresse dos alunos, o ensino deve respeitar as culturas disciplinares dos estudantes e contextualizar o novo conhecimento dentro de suas áreas principais. A aplicação prática é estruturada a partir dos princípios de abordagens baseadas em resultados e do alinhamento construtivo, visando integrar conteúdos, métodos e valores de diversas disciplinas de forma coesa. Estratégias como aprendizagem baseada em problemas, estudos de caso, atividades dialogadas e aulas interativas são sugeridas para estimular a aprendizagem ativa e a integração de saberes, fortalecendo a relevância prática dos conteúdos para as futuras atuações profissionais dos alunos.

A seguir, as seções deste documento integrarão esses referenciais teóricos às práticas pedagógicas desta proposta, articulando os níveis da Taxonomia de Bloom com as estratégias interdisciplinares e tecnologias aplicadas, como a impressão 3D e a fotocatalise.

5.2 Objetivo Geral

Desenvolver a consciência ambiental e o interesse pela pesquisa científica e tecnológica em diferentes níveis de ensino, por meio de atividades relacionadas à fotocatalise, ao tratamento de efluentes e ao uso de impressoras 3D, alinhando-se aos domínios da Taxonomia de Bloom.

5.2.1 Objetivos Específicos

Fundamental I (Anos Iniciais)

- **Lembrar:** Introduzir a ideia básica de “limpar a água” e a importância de não poluir rios e lagos.
- **Entender:** Introduzir, de maneira lúdica, a ideia de que a luz pode ajudar a limpar a água.

Fundamental II (Anos Finais)

- **Lembrar e Entender:** Explicar o que é poluição, efluentes e a ideia de fotocatalise em linguagem acessível.
- **Aplicar:** Aplicar princípios básicos de fotocatalise, degradação e adsorção em experiências com corantes.
- **Analisar:** Iniciar o contato com tecnologia 3D, observando ou ajudando na modelagem de peças simples, compreendendo a lógica da prototipagem.

Ensino Médio

- **Aplicar:** Aprofundar conceitos de reações químicas, semicondutores, oxidação e redução.
- **Analisar:** Introduzir princípios de polímeros condutores (PANI) e a fotodegradação de poluentes. Relacionar dados obtidos experimentalmente em gráficos e tabelas.
- **Avaliar:** Desenvolver protótipos em 3D (suportes, mini-reatores) e analisar resultados de maneira quantitativa, avaliando a eficácia de cada configuração.

Ensino Técnico (Química, Meio Ambiente, Mecatrônica, etc.)

- **Analisar e Avaliar:** Analisar quantitativamente a eficiência do processo fotocatalítico com base em medidas como absorbância, pH, condutividade elétrica.

- **Criar:** Projetar e imprimir em 3D peças mais complexas, como reatores em escala laboratorial, considerando parâmetros de engenharia (fluxo, vedação, segurança).
- **Avaliar e Criar:** Avaliar a viabilidade industrial do processo, considerando custos, riscos e aspectos legais. Além disso, criar soluções inovadoras, propondo melhorias em reatores ou no processo como um todo.

5.3 Justificativa

Este projeto articula conhecimentos fundamentais de Ciências, Química, Física e Tecnologia, evidenciando como o conhecimento a ciência pode gerar soluções sustentáveis para desafios ambientais reais. A inclusão da impressão 3D e da experimentação fotocatalítica no processo educativo agrega valor por possibilitar a adaptação do tema conforme a maturidade e as competências curriculares de cada faixa etária.

Essa abordagem desperta nos alunos o interesse pela inovação e pela busca de soluções práticas para problemas ambientais. Além disso, promove a interdisciplinaridade ao integrar conteúdos de Matemática (coleta e análise de dados), Química (reações e materiais), Física (luz, semicondutores e energia de ativação), Tecnologia (uso da impressão 3D) e Biologia/Meio Ambiente (impacto nos ecossistemas aquáticos). Também favorece o desenvolvimento de habilidades cognitivas conforme a Taxonomia de Bloom, estimulando a análise, a avaliação e a criação.

Além do potencial pedagógico, a presente proposta se destaca pela relevância científica ao possibilitar o aprofundamento em fotocatalise heterogênea aplicada ao tratamento de efluentes reais. Tal aprofundamento envolve a síntese de nanomateriais, a dopagem de semicondutores e a aplicação de polímeros condutores (Santos; Marinho, 2021).

5.4 Roteiro Metodológico Geral

A seguir, descreve-se um roteiro integrado em que cada módulo (Fundamental I, Fundamental II, Médio e Técnico) participa de etapas semelhantes, adaptadas à profundidade de conteúdo, ao vocabulário e à complexidade dos experimentos. A integração com a Taxonomia de Bloom permite que os professores estruturem atividades que estimulem desde o *lembrar* até o *criar*.

5.4.1 Etapa 1: Sensibilização e Contexto (Todos os níveis)

1. **Apresentação de vídeos/fotos** de rios poluídos ou exemplos de efluentes coloridos (*Lembrar/Entender*).
2. **Discussão coletiva**: “Por que a água está suja? Como podemos limpá-la?” (*Entender*).
3. **Explicação inicial** (adaptada ao nível) sobre poluição hídrica e importância do tratamento de efluentes (*Entender*).

5.4.2 Etapa 2: Introdução à Fotocatálise e Corante Ponceau 4R

1. **Fundamental I e II**: Mostrar, de forma simples, que certos “materiais funcionais” (TiO_2) reagem com a luz para quebrar o corante, deixando a água mais clara (*Entender/Aplicar*).
2. **Ensino Médio**: Abordar a estrutura semicondutora do TiO_2 , radicais livres, dopagem com nitrogênio e o papel da polianilina (PANI). Relacionar com reações redox (*Aplicar/Analisar*).
3. **Ensino Técnico**: Explorar dados experimentais e teóricos (band gap, mecanismos de fotocorrosão, síntese de TiO_2 dopado, preparação da PANI), além de questões de eficiência (*Analisar/Avaliar*) e comparação de metodologias (*Criar* ao propor ajustes).

5.4.3 Etapa 3: Modelagem e Impressão 3D (Níveis Diferenciados)

1. **Fundamental I e II**:
 - Observar a modelagem (realizada pelo professor ou alunos mais avançados).
 - Participar da escolha do “formato” de suportes ou acessórios simples (*Entender/Aplicar*).
2. **Ensino Médio**:
 - Realizar **modelagem básica** em softwares intuitivos (Tinkercad ou similar).
 - Imprimir peças para segurar béqueres ou expor a solução ao sol/lâmpada.
 - Discutir **variáveis de impressão** (velocidade, infill) e sua influência (*Analisar/Avaliar*).
3. **Ensino Técnico**:

- Modelar **mini-reatores** completos, considerando fluxo de água, local para lâmpada UV, vedação, entrada e saída de efluente (*Criar*).
- Explorar softwares de CAD (Fusion 360, SolidWorks) com maior precisão (*Aplicar/Analisar*).
- Analisar parâmetros de impressão que otimizem a durabilidade e resistência química das peças (*Avaliar*).

5.4.4 Etapa 4: Execução do Experimento Fotocatalítico

1. **Preparação da solução de corante** (Ponceau 4R ou similar).

2. **Adição do catalisador:**

- **Fundamental I/II:** Usar TiO_2 simples (ou carvão ativado para comparação) e observar a descoloração ao sol (*Aplicar/Analisar* no nível II).
- **Ensino Médio:** Adicionar TiO_2 dopado (se disponível) ou discutir teoricamente (*Analisar/Avaliar*) a eficiência do dopante. Incluir PANI em demonstrações, se possível.
- **Ensino Técnico:** Preparar ou adquirir **TiO_2 dopado com nitrogênio** e **PANI** (ou blendas) e estudar parâmetros como concentração do catalisador, pH, fonte de luz (UV *x* visível) e tempo de radiação (*Avaliar/Criar*).

3. **Exposição à luz** (sol ou lâmpada UV/LED):

- Ajustar o reator/recipientes impresso em 3D, garantindo estabilidade.
- **Coletar dados** sobre intensidade da cor ou absorbância em intervalos regulares (*Analisar/Avaliar*).

Vale ressaltar que em todos os experimentos, é importante abordar e praticar o uso de controle experimental — como, por exemplo, comparar um béquer exposto à luz com outro mantido no escuro — e incentivar, mesmo nos níveis iniciais, o uso de atas de laboratório, promovendo o desenvolvimento de hábitos de registro científico. Além disso, todos os procedimentos serão realizados seguindo rigorosamente os protocolos de segurança adequados a cada experimento.

5.4.5 Etapa 5: Análise e Discussão dos Resultados (por nível)

1. **Fundamental I:**

- Observação lúdica: comparar “água vermelha” antes e depois (*Entender*).
- Expressar em desenhos ou frases o que entenderam (*Aplicar/Entender*).

2. Fundamental II:

- Utilizar ferramentas digitais para a criação de planilhas possibilitando o registro de dados em tabelas simples, como tempo de exposição e variação de cor. (*Analisar*).
- Discussão: “Por que a água muda de cor? O que acontece com o corante?” (*Analisar/Entender*).

3. Ensino Médio:

- Análise quantitativa porcentagem de descoloração, construção de gráficos (*Analisar*).
- Debater mecanismos oxidativos, dopagem de TiO_2 e papel da PANI (*Avaliar*).
- Relacionar com conceitos de Química, Física e Biologia (*Analisar/Avaliar*).

4. Ensino Técnico:

- Realizar medidas de absorbância em espectrofotômetro, determinando concentração de corante (*Analisar/Avaliar*).
- Comparar eficiência fotocatalítica de TiO_2 puro com o TiO_2 dopado + PANI, em diferentes condições e discutir sobre os possíveis métodos de tratamentos utilizados em larga escala pelas indústrias (*Avaliar*).
- Abordar aspectos de viabilidade industrial, escalonamento, análise de custos e riscos (*Avaliar/Criar*).

5.4.6 Etapa 6: Apresentação de Resultados e Avaliação**1. Fundamental I:**

- Montar murais com desenhos e pequenas frases sobre “o que aprendemos” (*Entender/Aplicar*).

2. Fundamental II:

- Criar pôsteres, cartazes e vídeos explicando o experimento para toda a escola (*Aplicar/Analisar*).

3. Ensino Médio e Técnico:

- Elaborar relatórios técnicos, apresentações (slides), vídeos curtos ou podcasts, como recurso moderno de comunicação científica, mostrando dados e gráficos (*Analisar/Avaliar*).
- Participar de feiras de ciências ou eventos internos, explicando o trabalho (*Criar/Avaliar*).

5.5 Cronograma geral sugerido

O quadro a seguir apresenta um cronograma geral das atividades, estruturado conforme as etapas do roteiro metodológico e adaptável aos diferentes níveis de ensino.

Tabela 8 – *Cronograma geral de atividades para todos os níveis de ensino.*

Etapa	Atividades Principais
1. Sensibilização	Exibição de vídeos/imagens, discussão orientada sobre poluição hídrica e introdução ao problema.
2. Fotocatálise e Corante	Apresentação teórica adaptada sobre fotocatálise e corantes adaptada a cada nível (simples ou avançada); contextualização com aplicações reais.
3. Impressão 3D	Exploração da modelagem 3D: observação nos níveis iniciais e criação nos níveis intermediário e técnico.
4. Experimento	Execução do experimento: preparo da solução, adição do catalisador, exposição à luz e coleta de dados.
5. Análise	Análise dos resultados: qualitativa (níveis iniciais) ou quantitativa com gráficos e cálculos (níveis avançados).
6. Divulgação	Comunicação dos resultados: murais e cartazes (Fundamental), relatórios técnicos e feiras (Médio/Técnico).

Fonte: Elaborado pela autora.

5.6 Materiais e Recursos

- **Corante alimentício** (vermelho para simular Ponceau 4R).
- **Catalisador** (TiO_2 comercial; se possível, dopado; carvão ativado para comparação; PANI e reagentes, conforme disponibilidade e nível).
- **Impressora 3D** (FDM, por exemplo) e filamento (PLA ou outro resistente a produtos químicos, se necessário).
- **Software de modelagem 3D** (*Tinkercad*, *Fusion 360*, *SolidWorks*, etc.).
- Copos de vidro ou béqueres, fontes de luz (sol, lâmpada UV ou LED).
- Para Ensino Técnico: espectrofotômetro, pHmetro, estufa, reagentes e vidrarias específicas.

5.7 Adequações e Extensões

A proposta favorece uma forte integração multidisciplinar, permitindo a participação de professores de diversas áreas do conhecimento. Docentes de Matemática podem atuar na análise estatística dos dados obtidos, enquanto professores de Geografia contribuem com a discussão sobre os impactos socioambientais do uso de tecnologias sustentáveis. A área de Língua Portuguesa se insere na produção de relatórios e apresentações orais, e as Artes podem colaborar com o design dos protótipos, especialmente na etapa de impressão 3D.

No contexto do ensino técnico, visitas técnicas a estações de tratamento de água ou a indústrias que utilizam impressão 3D podem enriquecer significativamente a vivência dos alunos, conectando teoria e prática. Para os estudantes do Ensino Médio e Técnico que dispõem de infraestrutura laboratorial, há ainda a possibilidade de envolvimento em atividades de pesquisa mais avançada, como a sintetização de TiO_2 dopado ou a polimerização da anilina, sempre sob supervisão docente.

Adicionalmente, a iniciativa pode ser estruturada como uma proposta interinstitucional, estimulando a colaboração entre escolas de diferentes níveis. Nessa dinâmica, alunos mais experientes assumem o papel de monitores, apresentando conceitos de fotocatalise e demonstrando o funcionamento da impressão 3D para os estudantes mais jovens, promovendo um ambiente de aprendizagem colaborativa e formativa.

5.8 Resultados Esperados

A implementação desta proposta pedagógica permite um engajamento contínuo dos alunos, observando a evolução de um mesmo tema (fotocatalise e tratamento de água) ao longo da trajetória escolar. Essa abordagem favorece o desenvolvimento de habilidades tanto práticas quanto conceituais, iniciando com observações lúdicas no Ensino Fundamental I e avançando até a elaboração de projetos tecnológicos e científicos no Ensino Técnico.

Além disso, essa proposta favorece a consolidação de uma consciência ambiental crítica, ao estimular a compreensão da importância de soluções sustentáveis para os desafios reais. A aprendizagem colaborativa é outro aspecto central, promovendo a troca de experiências entre os diferentes níveis de ensino e incentivando o protagonismo estudantil e o trabalho em equipe.

No âmbito científico e tecnológico, espera-se que um projeto dessa natureza contribua de forma significativa para a produção de conhecimento, especialmente

no que se refere à fotocatalise, aos materiais dopados e ao desenvolvimento de metodologias de ensino inovadoras integradas à tecnologia 3D.

5.9 Considerações finais para a aplicação da Taxonomia de Bloom no ensino interdisciplinar

Esta proposta pedagógica visa oferecer uma trilha formativa contínua, na qual o mesmo tema — fotocatalise e tratamento sustentável de efluentes — é abordado sob diferentes ângulos e profundidades, alinhando-se às diretrizes da BNCC (Base Nacional Comum Curricular) e aos currículos do Ensino Técnico. A inclusão de impressoras 3D reforça o caráter inovador, despertando o interesse pela prototipagem e pela possibilidade de criar soluções concretas para problemas ambientais.

Ao longo das etapas, aplica-se a Taxonomia de Bloom, de modo que os alunos avancem gradativamente em complexidade cognitiva, desde *Lembrar* e *Entender* no Fundamental I até *Criar* e *Avaliar* no Ensino Técnico. Assim, o processo educativo se torna dinâmico, contextualizado e interdisciplinar, contribuindo para a formação de cidadãos críticos, conscientes e aptos a pensar soluções para os desafios da atualidade.

O projeto propicia uma análise aprofundada dos ganhos de aprendizagem em diferentes níveis de escolarização, permitindo avaliar de forma sistemática o desenvolvimento cognitivo e prático dos estudantes ao longo da formação. Paralelamente, são conduzidas investigações sobre a eficácia da fotocatalise tanto em sistemas modelo, utilizando corantes alimentícios, quanto em efluentes reais, ampliando o escopo de aplicação e validando o potencial da tecnologia em contextos ambientais concretos.

Outro aspecto relevante é o desenvolvimento de metodologias híbridas que integram ensino e pesquisa, com potencial de replicação em outras instituições de ensino, promovendo a inovação pedagógica de forma estruturada. Dessa forma, a iniciativa contribui significativamente para a formação de recursos humanos qualificados em áreas estratégicas, como Química Ambiental, Engenharia de Materiais e Ensino de Ciências, fortalecendo a base científica e tecnológica nacional.

Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam o potencial dos compósitos de polianilina (PANI) com dióxido de titânio (TiO_2) na degradação fotocatalítica do corante Ponceau 4R. As análises estruturais, como DRX, FTIR e TG/DSC, indicam que a inserção da PANI promove alterações significativas na cristalinidade e no tamanho dos cristalitos, favorecendo a atuação dos materiais na faixa do visível. Além disso, os ensaios de adsorção e fotodegradação inicial demonstraram que a presença da PANI potencializa a separação de cargas e aumenta a eficiência do processo fotocatalítico. Como controle, a fotólise direta se mostrou pouco eficaz, confirmando a necessidade do fotocatalisador.

Em síntese, o compósito PANI/ TiO_2 na razão 2:1 apresentou o melhor desempenho (degradação $\approx 99,73\%$; $k \approx 0,05180 \text{ min}^{-1}$), superando tanto o TiO_2 puro ($76,36\%$; $k \approx 0,01180 \text{ min}^{-1}$) quanto as demais proporções. Observou-se ainda que a razão 1:2, embora com degradação semelhante à 1:1, exibiu melhor ajuste ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,9923$), reforçando a previsibilidade do processo.

Do ponto de vista óptico e vibracional, DRS/Tauc indicou redução do *band gap* no compósito em relação ao TiO_2 , e os espectros Raman confirmaram a predominância da fase anatase e corroboraram a interação interfacial com a PANI, compatível com menor recombinação e maior atividade sob luz visível; essa coerência Raman–UV–Vis sustenta o melhor desempenho observado.

Morfologicamente (MET), os materiais apresentaram partículas distintas próximas de esféricas, bem dispersas e com diâmetros médios abaixo de 10 nm; os espaçamentos interplanares estimados foram da ordem de 0,27–0,28 nm, coerentes com anatase nanocristalina.

Por fim, a discussão de pH/adsorção indica que a interação eletrostática favorece a etapa inicial da remoção do corante, embora o pH_{pzc} não tenha sido determinado — aspecto que se coloca como limitação pontual do estudo e oportunidade para trabalhos futuros.

As etapas realizadas permitiram consolidar a proposta de desenvolvimento

de um fotocatalisador híbrido mais eficiente, sustentável e economicamente viável, contribuindo tanto para o avanço das tecnologias de tratamento de efluentes quanto para ações educativas relacionadas à sustentabilidade e ciência aplicada.

Referências

ABID, Noor K; HASAN, Salma M. Structural properties of prepared pani/TiO₂ nanocomposite by chemical polymerization. **Iraqi Journal of Physics**, v. 20, n. 3, p. 29–39, 2022. 59, 60, 61, 66

ALTANNYHI, Khaled A; ELNAGGAR, Elsayed M; ELSAYED, Badr A; ELSE-NETY, Mohamed M. Synthesis, characterization, and coating application of a highly conductive polyaniline-TiO₂ nanocomposite. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 33, n. 1, p. 14, 2024. 56, 62, 64

AMORIM, S.M.; STEFFEN, G.; JUNIOR, J. de S.; BRUSAMARELLO, C.Z.; ROMIO, A.P.; DOMENICO, M.D. Synthesis, characterization, and application of polypyrrole/TiO₂ composites in photocatalytic processes: A review. **Polymer Composites**, v. 29, p. 1055–1074, 2021. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0967391120949489>. 76

ANANTH, N. Joslin; RAO, R. Gowri Shankar; VINITA, V. Sherlin; SAMUEL, J.; SHABNA, S.; SHINU, P. M. Shajin; SURESH, S.; SAMSON, Y.; BIJU, C. S. Structural, raman and optical investigations of TiO₂ nanoparticles prepared using hexamethylenetetramine. **Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements**, v. 197, n. 3, p. 164–168, 2022. 53, 55, 56, 64, 65, 66

ANDRADE, Sammela Rejane de Jesus; FREITAG, Raquel Meister Ko. Objetivos educacionais e avaliações em larga escala na trajetória da educação superior brasileira: Enem, enade ea complexidade cognitiva na retenção do fluxo. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, SciELO Brasil, v. 102, n. 260, p. 177–204, 2021. 79

ANDRONIC, Luminita; ENESCA, Alexandru. Black TiO₂ synthesis by chemical reduction methods for photocatalysis applications. **Frontiers in chemistry**, Frontiers Media SA, v. 8, p. 565489, 2020. 37

ARASI, A Yelil; JEYAKUMARI, J Juliet Latha; SUNDARESAN, B; DHANALAKSHMI, V; ANBARASAN, R. The structural properties of poly (ani-

line)—analysis via ftir spectroscopy. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, Elsevier, v. 74, n. 5, p. 1229–1234, 2009. 61, 64

ARAÚJO, Bruna Aline; SOUZA, José Everton Soares de; SARMENTO, Kênia Kelly Freitas; REBOUÇAS, Larissa Dias; MEDEIROS, Keila Machado de; LIMA, Carlos Antônio Pereira de. Processos oxidativos avançados aplicados no tratamento de efluentes da produção de membranas: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. e27210414253–e27210414253, 2021. 18, 70

ARAÚJO, Karla Santos de; ANTONELLI, Raissa; GAYDECZKA, Beatriz; GRANATO, Ana Claudia; MALPASS, Geoffroy Roger Pointer. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. **Revista Ambiente & Água**, SciELO Brasil, v. 11, p. 387–401, 2016. 18, 27

ARMOA, Marcelo Henrique. **Síntese hidrotérmica de nanopartículas de TiO₂, de nanocompósitos metal/TiO₂ e degradação oxidativa de 4-clorofenol em reator membrana fotocatalítico**. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Química)-Instituto de Química de Araraquara, 2007. 51

ASHA; GOYAL, Sneha Lata; KUMAR, D.; KUMAR, Shyam; KISHORE, N. Synthesis and characterization of polyaniline/TiO₂ composites. **Indian Journal of Pure and Applied Physics**, v. 52, p. 341–347, 2014. 61, 62

AZEVEDO, Paulo Gabriel Ferreira de; OLIVEIRA, Débora Carvalho da Silva; CAVALCANTI, Luiz Antonio Pimentel. Processos físicos e químicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 17, p. 1667–1678, 2020. 78

BACCARO, Alexandre L. B.; GUTZ, Ivano G. R. Fotoeletrocatálise em semicondutores: Dos princípios básicos até sua conformação à nanoescala. **Química Nova**, v. 41, n. 3, p. 326–339, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170174>. 28

BALOYI, Jeffrey; NTHO, Thabang; MOMA, John. Synthesis and application of pillared clay heterogeneous catalysts for wastewater treatment: a review. **RSC advances**, Royal Society of Chemistry, v. 8, n. 10, p. 5197–5211, 2018. 20

BARBOSA, Brendon Willian Guedes. **STEAM, design e tecnologia: uso de microscopias como veículo de comunicação visando a popularização da**

ciência. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Design)) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024. 79

BATISTA, Isabela dos Reis *et al.* Processos oxidativos avançados (poas): Uma revisão da importância de fotocatalise na descoloração de corantes têxteis como o verde malaquita. **Instituto Federal Goiano**, 2022. 18, 27

BEYGISANGCHIN, Mahnoush; RASHID, Suraya Abdul; SHAFIE, Suhaidi; SADRLOHOSSEINI, Amir Reza; LIM, Hong Ngee. Preparations, properties, and applications of polyaniline and polyaniline thin films—a review. **Polymers**, MDPI, v. 13, n. 12, p. 2003, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/12/2003>. 31, 32

BONIATTI, Rosiana; DAL'ACQUA, Nicolle; GIOVANELA, Marcelo; MACHADO, Giovanna; CRESPO, Janaina S. Preparação e caracterização de filmes finos de polieletrólitos condutores para sistemas fotovoltaicos. *In: Anais do 12º Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPol)*. Curitiba, PR, Brasil: [s.n.], 2014. 58

BRASIL, Ministerio de Desenvolvimento Social Governo do. a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. **TN Mundo - Recuperado em, 2016 - mds.gov.br**, v. 15, p. 24, 2016. 23

BUTT, Mehwish; SHARUNOVA, Alyona; STORGA, Mario; KHAN, Yasir Imtiaz; QURESHI, Ahmed Jawad. Transdisciplinary engineering design education: Ontology for a generic product design process. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 70, p. 338–343, 2018. ISSN 2212-8271. 28th CIRP Design Conference, Nantes, France. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.019>. 80

CHAGAS, Cyro Lucas Silva. **Preparação e Caracterização de Híbridos de PANI(ADBS)/Óxidos Magnéticos/TiO₂ e sua Avaliação em Fotodegradação**. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Moleculares, área de concentração: Físico-Química. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 2013. 61

CIPRIANO, Talita Ferreira; SILVINO, Alexandre Carneiro; OLIVEIRA, Dayane Carvalho RS de. Visão geral sobre a fotoquímica aplicada à polimerização: Utilização de complexos metálicos na fotopolimerização de monômeros. **LUMEN ET VIRTUS**, v. 15, n. 41, p. 5286–5313, 2024. 72

CONCEIÇÃO, Eleandro de Jesus; GRAF, Lucimar; KIMURA, Débora da Paz Maciel; GUEDES, Robson Arlam dos Reis. Taxonomia de bloom e a aprendizagem

colaborativa no novo ensino médio. **Revista Acadêmica Online**, v. 10, n. 50, p. 1–13, 2024. 21, 80

COSTA, Ana Cristina F Melo; VILAR, MA; LIRA, Hélio Lucena; KIMINAMI, Ruth Herta G Aliaga; GAMA, Lucianna. Síntese e caracterização de nanopartículas de TiO₂. **Cerâmica**, SciELO Brasil, v. 52, p. 255–259, 2006. 43, 51

COSTA, Renata Cerruti da; JUNIOR, Fernando Gomes de Souza. Preparo de nanocompósitos de maghemita e polianilina assistido por ultrassom. **Polímeros**, SciELO Brasil, v. 24, n. 2, p. 243–249, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2014.035>. 40

DENTI, Andressa Franco; BRUEL, Gabriela Mesquita; DALLAGO, Rogério Marcos; STEFFENS, Juliana. Uso da fotocatalise heterogênea com semicondutores baseados em hidrotalcita e dióxido de titânio para o tratamento de efluentes com corantes use of heterogeneous photocatalysis with semiconductors based on hydro-talcite and titanium dioxide for the treatment effluents with dyes. **Revista CIATEC - UPF**, v. 14, n. 3, p. 75–92, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.111973>. 25

DONG, Yilin; XU, Dongyu; ZHANG, Jie; WANG, Qiuwen; PANG, Shaoxuan; ZHANG, Guangming; CAMPOS, Luiza C; LV, Longyi; LIU, Xiaoyang; GAO, Wenfang *et al.* Enhanced antibiotic wastewater degradation by intimately coupled b-bi3o4cl photocatalysis and biodegradation reactor: Elucidating degradation principle systematically. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier, v. 445, p. 130364, 2023. 24, 26

DOU, Mingsong; HU, Yongzheng; YUE, Xue; LU, Taiping; YANG, Li; HE, Yu; DU, Yingying; ZHU, Anning; YANG, Haokai; ZHU, Yuming *et al.* Porous nanostructured cationic conjugated polyelectrolyte/titanium dioxide nanosheets heterojunction for co-catalyst-free photocatalytic hydrogen production. **Titanium Dioxide Nanosheets Heterojunction for Co-Catalyst-Free Photocatalytic Hydrogen Production**, 2025. 69

EDVINSSON, Tomas. Optical quantum confinement and photocatalytic properties in two-, one- and zero-dimensional nanostructures. **Royal Society Open Science**, v. 5, n. 9, p. 180387, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsos.180387>. 67

FAEZ, Roselena; REZENDE, Mirabel C.; MARTIN, Inácio M.; PAOLI, Marco-A. De. Polímeros condutores intrínsecos e seu potencial em blindagem de radiações eletromagnéticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, ABPol, São José dos

Campos, SP, v. 10, n. 3, p. 130–137, 2000. Recebido em 22/02/2000; aprovado em 24/08/2000. 31

FERRAZ, Ana Paula do Carmo Marcheti; BELHOT, Renato Vairo. Taxonomia de bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais. **Gestão & produção**, SciELO Brasil, v. 17, p. 421–431, 2010. 79

FLECK, William José Kappes; POLESELLO, Eduardo; LEÃO, Felipe Augusto. Efeito do uso do fotocatalisador TiO₂ sobre as propriedades da argamassa estabilizada. **Ambiente Construído**, v. 25, n. 1, p. 1–14, 2025. ISSN 1678-8621. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212025000100852>. 28

FONTANA, Tuyla; SWIERCZYNSKI, Andreia; GOMES, Patrícia; FAGAN, Solange Binotto. Nanotecnologia e os desafios das fotocélulas: eficiência, descarte e impacto ambiental. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 25, n. 3, p. 173–188, 2024. 24

Food Ingredients Brasil. Dossiê corantes. **Food Ingredients Brasil**, n. 9, p. 40–52, 2009. 34

FREIRE, Renato Sanches; PELEGRINI, Ronaldo; KUBOTA, Lauro T; DURÁN, Nelson; PERALTA-ZAMORA, Patrício. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. **Química nova – SciELO Brasil**, v. 23, p. 504–511, 2000. 24, 27, 35

FUJISHIMA, Akira; HONDA, Kenichi. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. **nature**, Nature Publishing Group UK London, v. 238, n. 5358, p. 37–38, 1972. 27, 56

GHALKHANI, Masoumeh; ZARE, Najmeh; KARIMI, Fatemeh; KARAMAN, Ceren; ALIZADEH, Marzieh; VASSEGHIAN, Yasser. Recent advances in ponceau dyes monitoring as food colorant substances by electrochemical sensors and developed procedures for their removal from real samples. **Food and Chemical Toxicology**, Elsevier, v. 161, p. 112830, 2022. 34

GILJA, Vanja; VRBAN, Ivan; MANDIĆ, Vilko; ŽIC, Mark; HRNJAK-MURGIĆ, Zlata. Preparation of a pani/zno composite for efficient photocatalytic degradation of acid blue. **Polymers**, MDPI, v. 10, n. 9, p. 940, 2018. 25

GOMES, Everton Carlos; Oliveira, Maria Auxiliadora Silva de. Alterações na estrutura da polianilina dopada (PANI-HCl) devido ao processo de desdopagem.

Associacao Brasileira de Polimeros (ABPol), Sao Paulo, SP (Brazil), 10. Brazilian congress on polymers , Foz do Iguacu, PR (Brazil), 13-17 Oct 2009, Foz do Iguacu, PR, Brasil, out. 2009. Trabalho em anais; arquivo PDF fornecido pelo autor do repositório pessoal do usuário. 40

HA, P. S.; KWAK, S. Y.; KIM, J. H.; KO, Y. G. Effect of synthesis conditions on phase transition of TiO₂. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 223, n. 1, p. 16–24, 2000. 52

HAMDY, Mohamed S; ABD-RABBOH, Hisham SM; BENAÏSSA, Mhamed; AL-METWALY, M Gad; GALAL, AH; AHMED, MA. Fabrication of novel polyaniline/zno heterojunction for exceptional photocatalytic hydrogen production and degradation of fluorescein dye through direct z-scheme mechanism. **Optical Materials**, Elsevier, v. 117, p. 111198, 2021. 24

HAMRAYEV, Hemra; KORPAYEV, Serdar; SHAMELI, Kamyar. Advances in synthesis techniques and environmental applications of TiO₂ nanoparticles for wastewater treatment: a review. **Journal of Research in Nanoscience and Nanotechnology**, v. 12, n. 1, p. 1–24, 2024. 40

HAO, Qiang; LIU, Chuangwei; JIA, Guohua; WANG, Yuan; ARANDIYAN, Hamidreza; WEI, Wei; NI, Bing-Jie. Catalytic reduction of nitrogen to produce ammonia by bismuth-based catalysts: state of the art and future prospects. **Materials horizons**, Royal Society of Chemistry, v. 7, n. 4, p. 1014–1029, 2020. 24, 26

HECK, Kimberly N; GARCIA-SEGURA, Sergi; WESTERHOFF, Paul; WONG, Michael S. Catalytic converters for water treatment. **Accounts of chemical research**, ACS Publications, v. 52, n. 4, p. 906–915, 2019. 20

HENAO, Claudia Patricia Betancur; MONTES, Vanessa Hernández; SIERRA, Robison Buitrago. Nanopartículas para materiales antibacterianos y aplicaciones del dióxido de titanio. **Revista cubana de investigaciones biomédicas**, v. 35, n. 4, p. 366–381, 2017. 29

HIDALGO-JIMENEZ, Jacqueline; WANG, Qing; EDALATI, Kaveh; CUBERO-SESÍN, Jorge M; RAZAVI-KHOSROSHAHI, Hadi; IKOMA, Yoshifumi; GUTIÉRREZ-FALLAS, Dionisio; DITTEL-MEZA, Fernando A; RODRÍGUEZ-RUFINO, Juan Carlos; FUJI, Masayoshi *et al.* Phase transformations, vacancy formation and variations of optical and photocatalytic properties in TiO₂-zno composites by high-pressure torsion. **International Journal of Plasticity**, Elsevier, v. 124, p. 170–185, 2020. 27

HUSSAIN, Murid; CECCARELLI, Raffaella; MARCHISIO, DL; FINO, Debora; RUSSO, Nunzio; GEOBALDO, Francesco. Synthesis, characterization, and photocatalytic application of novel TiO₂ nanoparticles. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 157, n. 1, p. 45–51, 2010. 37

IONASHIRO, M. **Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial**. [S.l.]: sn, 2004. 51

ISLAM, Syed K; LOMBARDI, John R. Raman enhancement (sers) of the surface phonon modes of TiO₂. **Chemical Physics Letters**, Elsevier, v. 806, p. 140040, 2022. 55, 57, 64, 65, 66

JAIN, Keerti; PATEL, Anand S; PARDHI, Vishwas P; FLORA, Swaran Jeet Singh. Nanotechnology in wastewater management: a new paradigm towards wastewater treatment. **Molecules**, MDPI, v. 26, n. 6, p. 1797, 2021. 23, 35

KHAN, Rajwali; RAHMAN, Nasir; PRASANNAN, Adhimoorthy; GANIYEVA, Khayriniso; CHAKRABORTTY, Sabyasachi; SANGARAJU, Sambasivam. Phase transition and bandgap modulation in TiO₂ nanostructures for enhanced visible-light activity and environmental applications. **Scientific Reports**, v. 15, p. 20309, 2025. 47, 53, 55, 56, 64, 65, 66, 67

KUBELKA, Paul; MUNK, Franz. An article on optics of paint layers. **Z. Tech. Phys**, v. 12, n. 593-601, p. 259–274, 1931. 46

KULKARNI, Milind V.; VISWANATH, Annamraju Kasi; MARIMUTHU, R.; SETH, Tanay. Synthesis and characterization of polyaniline doped with organic acids. **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry**, Wiley, v. 42, n. 8, p. 2043–2049, 2004. 33

LEE, Sher Ling; CHANG, Chi-Jung. Recent developments about conductive polymer based composite photocatalysts. **Polymers**, MDPI, v. 11, n. 2, p. 206, 2019. 31

LEE, Youn-Jun; LEE, Hae Su; LEE, Chang-Gu; PARK, Seong-Jik; LEE, Jechan; JUNG, Seungho; SHIN, Gwy-Am. Application of pani/TiO₂ composite for photocatalytic degradation of contaminants from aqueous solution. **Applied Sciences**, MDPI, v. 10, n. 19, p. 6710, 2020. 41, 56, 69

LI, Xueyan; WANG, Desong; CHENG, Guoxiang; LUO, Qingzhi; AN, Jing; WANG, Yanhong. Preparation of polyaniline-modified TiO₂ nanoparticles and their photocatalytic activity under visible light illumination. **Applied Catalysis B: Environmental**, Elsevier, v. 81, n. 3-4, p. 267–273, 2008. 31

LI, Yuzhen; YU, Yuan; WU, Liangzhuan; ZHI, Jinfang. Processable polyaniline/titania nanocomposites with good photocatalytic and conductivity properties prepared via peroxo-titanium complex catalyzed emulsion polymerization. **Applied Surface Science**, v. 273, p. 135–143, 2013. 58, 59

LIMA, Francisco Marcone; MARTINS, Felipe Mota; JÚNIOR, Paulo Herbert França Maia; ALMEIDA, Ana Fabíola Leite; FREIRE, Francisco Nivaldo Aguiar. Tamanho médio das nanopartículas de dióxido de titânio a partir de uma nova abordagem na equação de scherrer. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 23, p. e-11965, 2018. 43

LIMA, Pedro Henrique Correia; FONSECA, DF; BRAZ, CJF; CUNHA, CTC. Polímeros condutores com propriedades eletrocromicas: Uma revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 13, n. 1, 2018. 32

LIN, Yi Ping; MEHRVAR, Mehrab. Photocatalytic treatment of an actual confectionery wastewater using ag/TiO₂/Fe₂O₃: optimization of photocatalytic reactions using surface response methodology. **Catalysts**, MDPI, v. 8, n. 10, p. 409, 2018. 35

LIU, Xiaoqing; DUAN, Xiaoguang; WEI, Wei; WANG, Shaobin; NI, Bing-Jie. Photocatalytic conversion of lignocellulosic biomass to valuable products. **Green chemistry**, Royal Society of Chemistry, v. 21, n. 16, p. 4266–4289, 2019. 24, 26

LÓPEZ, Raúl; GÓMEZ, Ricardo. Band-gap energy estimation from diffuse reflectance measurements on sol-gel and commercial TiO₂: A comparative study. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, Springer, v. 61, n. 1, p. 1–7, 2012. 46

MA, Dongge; LI, Jundan; LIU, Anan; CHEN, Chuncheng. Carbon gels-modified TiO₂: Promising materials for photocatalysis applications. **Materials**, MDPI, v. 13, n. 7, p. 1734, 2020. 55, 56, 57, 67

MACHADO, Antônio Eduardo da Hora; MIRANDA, Jacques Antônio de; SATTLER, Christian; OLIVEIRA, Lamark de. **Compositos de ftalocianina de zinco e óxido de titânio, para emprego em processos fotocatalíticos, e método para sua obtenção. Compositos de ftalocianina de zinco e óxido de titânio, para emprego em processos fotocatalíticos, e método para sua obtenção.** 2012. PI0300920-3. Concedida em 11 de dezembro de 2012. 42

MACHADO, Lais Petra; PEREIRA, Márcio Soares; SILVA, Clarissa Oliveira da. Nitreto de carbono grafítico: Uma revisão sobre possíveis modificações no material para o aprimoramento da fotocatalise da água para a produção de hidrogênio. **Revista Virtual de Química**, v. 17, n. 5, 2025. 72

MACHADO, Werick Alves. **Produção de hidrogênio por via fotocatalítica empregando novos compósitos à base de SiO₂ revestidos com TiO₂**. Uberlândia, MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2020. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.564>. 29

MAHMOUD, Auwal Adamu; ALI, SB; AJIYA, DA; MUHAMMAD, M. Photodegradation of some antibiotics and industrial dye by visible light of highly active synthesized pani/TiO₂ nanocomposite photocatalyst. **Jurnal Bio-Geo Material Dan Energi**, v. 5, n. 1, p. 28–38, 2025. 64

MAKUŁA, Patrycja; PACIA, Michał; MACYK, Wojciech. **How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photocatalysts based on UV–Vis spectra**. [S.l.]: ACS Publications, 2018. 6814–6817 p. 47

MANJUNATHA, S. *et al.* Fabrication p–n heterostructure of polyaniline–polyvinyl alcohol–TiO₂ nanocomposite for effective electromagnetic shielding application. **International Journal of Scientific Research and Technology**, v. 2, n. 4, p. 390–403, 2025. 61, 64

MARBANIANG, Morten; KUMAR, John Elisa; MULAI, Tsungom; KHARMAWPHLANG, Wanshanlang; SHARAN, Rajeswar N; SAHOO, Mihir Kumar. Metal-ion and uvc light-catalyzed oxidation and biodegradation of ponceau xyridine in aqueous solution: A comparative study. **ChemistrySelect**, Wiley Online Library, v. 9, n. 31, p. e202401474, 2024. 71

MARMITT, Sandro; PIROTTA, Lilian V; STÜLP, Simone. Aplicação de fotólise direta e uv/h₂O₂ a efluente sintético contendo diferentes corantes alimentícios. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 33, p. 384–388, 2010. 69, 70, 71

MARQUES, Fabielle C.; STUMBO, Alexandre M.; CANELA, Maria C. Estratégias e materiais utilizados em fotocatalise heterogênea para geração de hidrogênio através da fotólise da água. **Química Nova**, v. 40, n. 5, p. 561–571, 2017. 28, 52

MARTINS, Nailma J.; BARBOSA, Luele R. S.; COTA, Vitor E. P.; MOURÃO, Henrique A. J. L. Materiais lamelares de Ti aplicados em processos fotocatalíticos. **Química Nova**, SBQ, v. 45, n. 5, p. 594–607, 2022. Recebido em 22/06/2021; aceito em 22/11/2021; publicado na web em 20/01/2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170855>. 30

MATOS, Andrezza Pereira de *et al.* Desempenho de nanomateriais na degradação fotocatalítica da rodamin B sob radiação solar. **Universidade Federal da Paraíba**, 2024. 24

MOREY, George W. Hydrothermal synthesis. **Journal of the American Ceramic Society**, Wiley Online Library, v. 36, n. 9, p. 279–285, 1953. 31

MOURÃO, Henrique AJL; MENDONÇA, Vagner R de; MALAGUTTI, Andréa R; RIBEIRO, Caue. Nanoestruturas em fotocatalise: uma revisão sobre estratégias de síntese de fotocatalisadores em escala nanométrica. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 32, p. 2181–2190, 2009. 52

MÜLLER, Franciéli; FERREIRA, Carlos A.; AMADO, Franco D. Rico; RODRIGUES, Marco A. S. Desenvolvimento de membranas e filmes auto-suportados a partir de polianilina: Síntese, caracterização e aplicação. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, SciELO Brasil, v. 21, n. 4, p. 259–264, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000053>. 40, 41

NAIK, Yashwanth V.; KARIDURAGANAVAR, M. Y.; SIDDAGANGAIAH, P. B. *et al.* Influence of TiO₂ nanoparticles during in-situ polymerization of TiO₂/pani nanocomposites and its supercapacitor properties. **Journal of Energy Storage**, v. 97, p. 112874, 2024. 41, 42, 62, 64

NASCIMENTO, Marcela Verícimo do. Photocatalytic study of composites based on titanium dioxide (TiO₂) and graphitic carbon nitride (g-c₃n₄) under artificial and natural light. **Repositorio Universidade Federal do Ceara**, 2023. 31

NETO, Irineu Ferreira da Silva; SOUZA, Maria Nathalya Costa; ALMEIDA, Sheyla Cristiane Xenofonte de. Degradação de corantes por processos fotocatalíticos no tratamento de efluentes industriais:: Uma revisão integrativa. **BIOFARM-Journal of Biology & Pharmacy and Agricultural Management**, v. 16, n. 4, p. 365–373, 2020. 19

NOGUEIRA, Raquel F. P.; JARDIM, Wilson F. A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental. **Química Nova**, v. 21, n. 1, p. 69–72, 1998. 27

NOMAN, Muhammad Tayyab; ASHRAF, Muhammad Azeem; ALI, Azam. Synthesis and applications of nano-TiO₂: a review. **Environmental science and pollution research**, Springer, v. 26, n. 4, p. 3262–3291, 2019. 37

OLAD, ALI; BEHBOUDI, Sepideh; ENTEZAMI, Ali Akbar. Preparation, characterization and photocatalytic activity of TiO₂/polyaniline core-shell nanocomposite. **Bulletin of Materials Science**, Springer, v. 35, p. 801–809, 2012. 31

ONU, Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: [<https://www.unicef.org/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>]. 20

PAPPAS, Eric; PIERRAKOS, Olga; NAGEL, Robert. Using bloom's taxonomy to teach sustainability in multiple contexts. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 48, p. 54–64, 2013. 80

PARVULESCU, Vasile I; EPRON, Florence; GARCIA, Hermenegildo; GRANGER, Pascal. Recent progress and prospects in catalytic water treatment. **Chemical Reviews**, ACS Publications, v. 122, n. 3, p. 2981–3121, 2021. 20

PAVANI, Naiara Maria; MACENA, Daniel Ângelo; TAMASHIRO, Jacqueline Roberta; SILVA, Lucas Henrique Pereira; ALMEIDA, Maryane Pipino Beraldo de; KINOSHITA, Ângela Mitie Otta. Nanopartículas de dióxido de titânio e óxido de zinco: Síntese, caracterização e ação fotocatalítica em efluentes industriais. *In: Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332*. [S.l.: s.n.], 2022. v. 14, n. 1, p. 185–192. 23, 24

PAVIA, Donald L.; LAMPMAN, Gary M.; KRIZ, George S.; VYVYAN, James R. **Introdução à Espectroscopia**. 5ª edição (tradução da edição norte-americana). ed. São Paulo, Brasil: Cengage Learning, 2015. Livro voltado para a introdução à espectroscopia, abordando conceitos fundamentais de espectroscopia no infravermelho, RMN, UV-visível e espectrometria de massas. ISBN 978-85-221-0708-7. 64

PRASUTIYO, Y. J.; MANAF, A.; HAFIZAH, M. A. E. Synthesis of polyaniline by chemical oxidative polymerization and characteristic of conductivity and reflection for various strong acid dopants. **Journal of Physics: Conference Series**, IOP Publishing, v. 1442, n. 1, p. 012003, 2020. 33

PUTRI, Nugrahani Primary; RISKA, Agus Mifthakhul; KUSUMAWATI, Diah Hari; SUAEBAH, Evi. Enhanced photocatalytic degradation of congo red dye using green-synthesized TiO₂ and pani/TiO₂ with papaya leaf as bio-reduction. **Trends in Sciences**, v. 22, n. 2, p. 9119–9119, 2025. 69

RABENAU, Albrecht. The role of hydrothermal synthesis in preparative chemistry. **Angewandte Chemie International Edition in English**, Wiley Online Library, v. 24, n. 12, p. 1026–1040, 1985. 30, 31

RADOIČIĆ, Marija; ĆIRIĆ-MARJANOVIĆ, Gordana; SPASOJEVIĆ, Vuk; AHRENKIEL, Phil; MITRIĆ, Miodrag; NOVAKOVIĆ, Tatjana; ŠAPONJIĆ, Zoran. Superior photocatalytic properties of carbonized pani/TiO₂ nanocomposites. **Applied Catalysis B: Environmental**, Elsevier, v. 213, p. 155–166, 2017. 53, 55, 56, 60, 67, 68

RIBEIRO, Thiago Soares Silva. **Preparação e caracterização de materiais híbridos de pani (adbs)/ zno e sua aplicação em adsorção/fotodegradação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Goiás (Brazil), 2016. 25

RIBEIRO, Valquíria Aparecida dos Santos; FERRARI, Ana Maria; TAVARES, Célia Regina Granhen. Fotocatálise aplicada ao tratamento de efluentes de lavanderia de jeans: comparação entre TiO_2 e zno na eficiência de remoção de cor. **Brazilian Journal of Business**, v. 2, n. 3, p. 2788–2798, 2020. 23, 24

RODRIGUES, Carmen SD; SILVA, Ricardo M; CARABINEIRO, Sónia AC; MALDONADO-HÓDAR, Francisco José; MADEIRA, Luís M. Wastewater treatment by catalytic wet peroxidation using nano gold-based catalysts: A review. **Catalysts**, MDPI, v. 9, n. 5, p. 478, 2019. 20

SADIA, Sumaiya Islam; SHISHIR, Md Khalid Hossain; AHMED, Shanawaz; ALDID, Allah Rakha; ISLAM, Md Mynul; RANA, Md Masud; AL-REZA, Sharif Md; ALAM, Md Ashraful. Crystallographic biography on nanocrystalline phase of polymorphs titanium dioxide (TiO_2): A perspective static review. **South African Journal of chemical engineering**, South African Institution of Chemical Engineers (SAIChE), v. 50, n. 1, p. 51–64, 2024. 67

SANTOS, André Luiz Alvarenga. **Caracterização Mineralógica e Tecnológica de Minério**. Londrina, PR: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018. Livro didático técnico-científico voltado à área de mineração e engenharia de processos. ISBN 978-85-522-0713-9. 30

SANTOS, Lidiaine Maria; MARINHO, Rodrigo Ferreira. As contribuições de uma sequência didática sobre fotocatálise heterogênea para o ensino de química. **Anais da Semana de Licenciatura**, p. 33–44, 2021. 78, 83

SANTOS, Lidiaine Maria dos. **Preparo e caracterização de catalisadores baseados em óxido de titânio dopado com íons prata, para emprego em fotocatálise**. Orientador: Prof. Dr. Antonio Eduardo da Hora Machado. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2013. 44, 48, 51

SANTOS, Lidiaine Maria dos. **Síntese e caracterização de TiO_2 com modificações superficiais para aplicação em fotocatálise heterogênea**. 135 p. Inclui bibliografia. Linha de pesquisa: Fotoquímica. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Química, Uberlândia, MG, 2017. 34, 36

SEIXAS, Cristiana Simão; PRADO, Deborah Santos; JOLY, Carlos Alfredo; MAY, Peter Herman; NEVES, Estela M Souza Costa; TEIXEIRA, Leonardo Ribeiro. Governança ambiental no Brasil: rumo aos objetivos do desenvolvimento sustentável (ods)? **Cadernos Gestão Pública e Cidadania**, v. 25, n. 81, 2020. 23

SIEGEL, RW; RAMASAMY, S; HAHN, H; ZONGQUAN, Li; TING, Liu; GRONSKY, R. Synthesis, characterization, and properties of nanophase TiO_2 . **Journal of Materials Research**, Cambridge University Press, v. 3, n. 6, p. 1367–1372, 1988. 36, 37

SILVA, Elson Santos da. **Utilização da Fotocatálise Solar Heterogênea no Tratamento de Efluentes Industriais**. Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, área de concentração em Meio Ambiente, Economia e Aproveitamento Energético. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, João Pessoa, PB, 2016. 28

SILVA, Igor Matheus de Amorim. **Efeito da Temperatura de Calcinação do TiO_2 e Influência nas Propriedades Fotocatalíticas**. Curso de Licenciatura em Química. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Química e Biotecnologia, Maceió, AL, 2021. 30

SILVA, Marcela Fernandes; PINEDA, Edgardo Alfonso Gómez; BERGAMASCO, Rosângela. Aplicação de óxidos de ferro nanoestruturados como adsorventes e fotocatalisadores na remoção de poluentes de águas residuais. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 38, n. 3, p. 393–398, 2015. 72

SILVEIRA, L. D.; SAVOIA, J. E.; MARQUES, R. G.; MORAES, L. S. Preparo de filmes de poliestireno para fins de imobilização de dióxido de titânio utilizado em fotocatalise heterogênea. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (COBEQ IC 2019)**. Uberlândia, MG: [s.n.], 2019. 26

SOUZA, Ana Paula Nazar de. Tese (Doutorado em Química), **Desenvolvimento de materiais sustentáveis assistido por extratos de planta para remediação de corantes em sistemas aquosos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2023. 19

SOUZA, Lorena De Bortoli Lecchi de; FERREIRA, MICHELLE BINS TASSARA; RIBEIRO, JOSELITO NARDY; RIBEIRO, ARACELI VERÓNICA FLORES NARDY. Adsorção no tratamento de soluções aquosas contendo corantes alimentícios: Uma temática ambiental no ensino de química. **Revista Eletrônica Sala de Aula em Foco**, v. 12, n. 2, p. 54–65, 2023. 74

STEJSKAL, Jaroslav; HLAVATÁ, Drahomíra; HOLLER, Petr; TRCHOVÁ, Miroslava; PROKEŠ, Jan; SAPURINA, Irina. Polyaniline prepared in the presence of various acids: a conductivity study. **Polymer international**, Wiley Online Library, v. 53, n. 3, p. 294–300, 2004. 33

SUKMA, Warongrit; BOONYAKONG, Cheerapa; CHAIPHET, Thitiphan; CHAMNI, Supakarn. A simple and rapid colorimetric detection of methanol, ethanol, and isopropanol and its application toward alcohol-based hand sanitizer quality control. **Green Chemistry Letters and Reviews**, Taylor & Francis, v. 17, n. 1, p. 2298982, 2024. 34

THEIVASANTHI, Thirugnanasambandan; ALAGAR, Marimuthu. Titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles – xrd analyses – an insight. **arXiv preprint arXiv:1307.1091**, 2013. Centre for Research and Post Graduate Department of Physics, Ayya Nadar Janaki Ammal College, Sivakasi, Tamilnadu, India. 56

TÍJARO-ROJAS, Rocío; ARCE-TRIGATTI, Andrea; CUPP, Jann; PASCAL, Jennifer; ARCE, Pedro E. A systematic and integrative sequence approach (sis) for mastery learning: Anchoring bloom’s revised taxonomy to student learning. **Education for Chemical Engineers**, Elsevier, v. 17, p. 31–43, 2016. 81

TOMASO, Luiz Phelipe de Souza; BOMFIM, Joice Florenço; CARVALHO, Nakédia MF; SENRA, Jaqueline Dias; MALTA, Luiz Fernando Brum. Hidróxidos duplos lamelares em processos catalíticos para a química fina, degradação de poluentes e geração de energia limpa: Uma breve revisão. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 48, n. 1, p. e–20250013, 2024. 72

TREVISAN, André Luis; AMARAL, Roseli Gall do. A taxionomia revisada de bloom aplicada à avaliação: um estudo de provas escritas de matemática. **Ciência & Educação (Bauru)**, SciELO Brasil, v. 22, p. 451–464, 2016. 49, 79

TURKTEN, Nazli; KARATAS, Yunus; UYGUNER-DEMIREL, Ceyda S; BEKBOLET, Miray. Preparation of pani modified TiO₂ and characterization under pre-and post-photocatalytic conditions. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 30, n. 51, p. 111182–111207, 2023. 20, 41, 59, 60, 61, 64, 66, 69

UMAIR, Muhammad; RUIZ-AGUIRRE, Alba; BERRUTI, Ilaria; RODRIGUEZ, Sixto Malato; PALMISANO, Leonardo; LODDO, Vittorio; BELLARDITA, Marianna. Biomass derivatives photoreforming in pilot plant scale to obtain h₂ under green conditions by using ball milling cu₂o-TiO₂ p₂₅ photocatalysts. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 504, p. 158585, 2025. 37

VAEZ, Mohammad; ALIJANI, Somayeh; OMIDKHAH, Mohammadreza; MOGHADDAM, Abdolsamad Zarringhalam. Synthesis, characterization and optimization of n-TiO₂/pani nanocomposite for photodegradation of acid dye under visible light. **Polymer Composites**, Wiley Online Library, v. 39, n. 12, p. 4605–4616, 2018. 33

VARGAS, Vanessa MM; DALMOLIN, Carla; PEZZIN, Sérgio H; OLIVEIRA, Marcela Mohallem; PERALTA-ZAMORA, Patricio. A polianilina no cenário ambiental: Uma abordagem sobre fotocatalise heterogênea. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 41, n. 3, p. 315–325, 2018. 18, 19, 29, 31, 79

VIEIRA, Alesssandra; LIMA, PÉ Aryel Lima Mota; FLÁVIA, Ana; SANTOS, Nayane Gonçalves Nogueira; VIANA, Aline DE ARAÚJO; ARAÚJO, Rinaldo DOS Santos; TAVARES, Francisco Murilo; LUNA, Hugo Leonardo; BUARQUE, Brito. Adsorção em meio aquoso do corante azo ponceau 4r sobre sílica gel organofuncionalizada com aptes. **Repositório Institucional da Universidade Federal do Ceara**, 2016. 19, 35

WANNAPOP, S; INTENG, A; JAREANWAT, R; SOMDEE, A. Novel synthesis of cl/n co-doped TiO₂ nanoparticles for enhanced photocatalytic activity. **Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB)**, v. 19, n. 3, 2024. 37, 40

WILLIAMS, Ann E. Promoting meaningfulness by coupling bloom's taxonomy with adult education theory: introducing an applied and interdisciplinary student writing exercise. **Transformative Dialogues: Teaching and Learning Journal**, v. 10, n. 3, 2017. 80

WOLFF, Gabriel da Silva; BERGER, Carolina; ELIAS, Mariele Abadia; KUREK, Ana Paula; SUAVE, Jaqueline. Fotocatalise heterogênea: uma revisão sobre os métodos promissores de imobilização de dióxido de titânio. **Revista Técnico-Científica do IFSC**, v. 1, n. 12, p. 1–19, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.35700/2316-8382.2022.v1n12.3324>. 52, 77

YANG, Guijun; PARK, Soo-Jin. Conventional and microwave hydrothermal synthesis and application of functional materials: A review. **Materials**, MDPI, v. 12, n. 7, p. 1177, 2019. 30

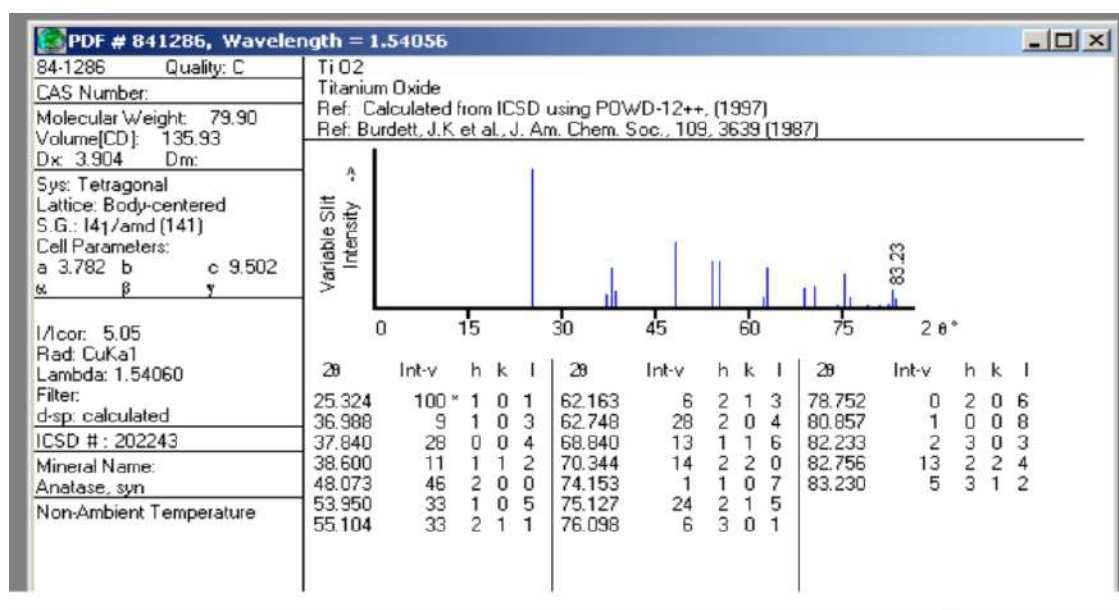
YANG, Min. Making interdisciplinary subjects relevant to students: An interdisciplinary approach. **Teaching in Higher Education**, Taylor & Francis, v. 14, n. 6, p. 597–606, 2009. 81

ZHANG, Hao; ZONG, Ruilong; ZHU, Yongfa. Photocorrosion inhibition and photoactivity enhancement for zinc oxide via hybridization with monolayer polyaniline. **The Journal of Physical Chemistry C**, ACS Publications, v. 113, n. 11, p. 4605–4611, 2009. 25

ZHANG, Jun; XING, An; JIA, Bi; LIU, Xiaoyan. Synthesis of conductive polyaniline nanofibers in one step by protonic acid and iodine doping. **High Performance Polymers**, SAGE Publications, v. 31, n. 8, p. 893–900, 2019. 33

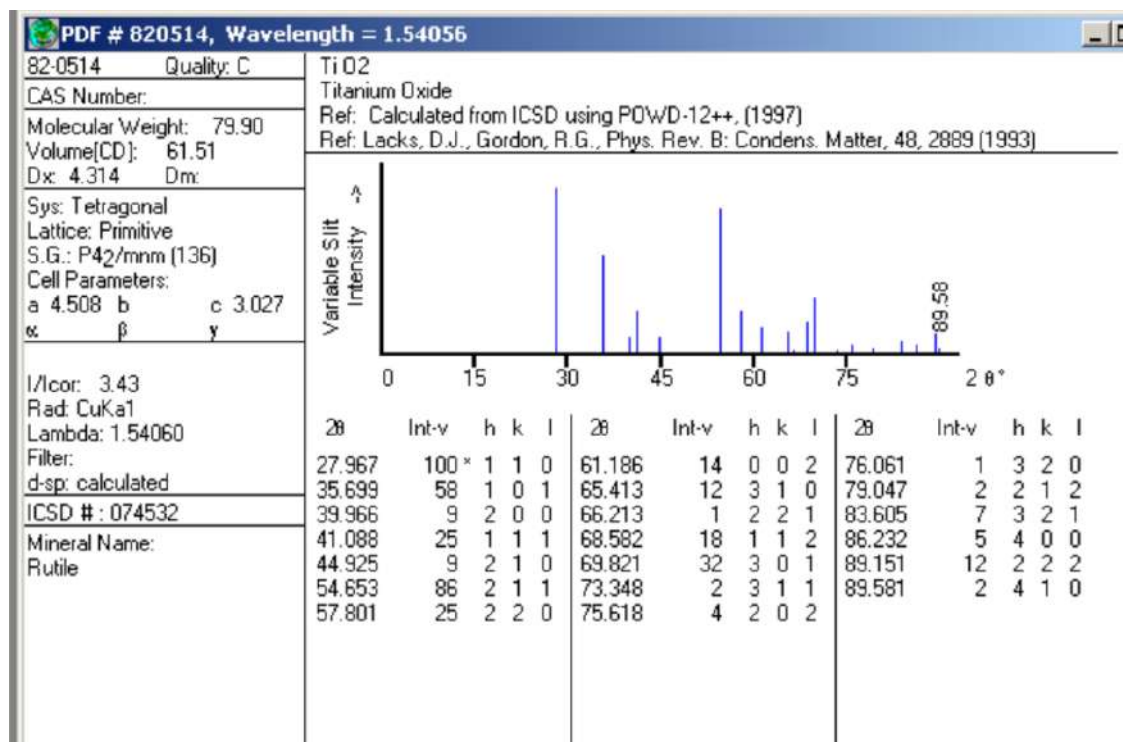
Anexo A – Fichas Cristalográficas

Figura 22 – Ficha cristalográfica JCPDS para o polimorfo anatase.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23 – *Ficha cristalográfica JCPDS para o polimorfo rutilo.*



Fonte: Elaborado pela autora.