

Aplicação de nanoestruturas e pontos quânticos derivados do biochar em fotocatalise heterogênea aderidos em superfície esponjosa

Laryssa C. R. dos Santos¹, Larissa Bach Toledo², Talita Mazon³

lcsantos@cti.gov.br, larissa.toledo@cti.gov.br, talita.mazon@cti.gov.br

¹Divisão de Infraestrutura para Nano e Microssistemas – DINAM
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP

Resumo. A geração excessiva de efluentes industriais e a contaminação das águas por agentes químicos se tornou em um verdadeiro desafio a sociedade e ao meio ambiente. A fim de promover o tratamento das águas residuais, o presente trabalho visou a potencialização das propriedades fotodegradativas dos óxidos ZnO, TiO₂ e CuO em conjunto com a biomassa, submetendo os mesmo a uma técnica de imobilização sob uma superfície esponjosa e avaliando seu comportamento degradativo através de ensaios de absorção e fotocatalise heterogênea. Observou-se maiores índices de degradação devido a uma maior aderência do material, nos semicondutores TiO₂ e ZnO, 82% e 62% respectivamente. Também fora comprovado a partir da cinética de adsorção estudada por espectrofotometria UV-Vis, que os materiais utilizados não apresentam elevado potencial fotolítico, acarretando em uma maior mineralização do agente recalcitrante do que na degradação dos materiais particulados.

Abstract. The excessive generation of industrial effluents and the contamination of water by chemical agents has become a challenge for society and the environment. In order to promote the treatment of wastewater, the present work aimed at enhancing the photodegradative properties of ZnO, TiO₂ and CuO oxides in association with biomass, subjecting them to an immobilization technique on a spongy surface and evaluating their degradation behavior through absorption tests and heterogeneous photocatalysis. Higher degradation rates due to higher material adhesion were observed in the TiO₂ and ZnO semiconductors, 82% and 62%, respectively. UV-Vis spectrophotometry adsorption kinetics calculations also showed that the materials used do not have a high photolytic potential, resulting in greater mineralization of the recalcitrant agent than in the degradation of particulate materials.

1. Introdução

Com o aumento da contaminação de efluentes e a utilização contínua de compostos químicos no âmbito industrial, a anos, vêm contribuindo no surgimento de diversos danos a saúde e ao meio ambiente, principalmente por abordarem substâncias de alta toxicidade, cancerígenas e não biodegradáveis. Faria (2015) & Souza (2023). Outro fator bastante discutível quanto a poluição das águas é a utilização dos agentes recalcitrantes

(corantes orgânicos), dos quais são empregados no acabamento de diversos materiais e que acarretam em um elevado acúmulo de água residual. Cardoso (2010). Portanto a eliminação de tais agentes e o tratamento das águas, são fatores cruciais tanto para a manutenção da população quanto para os cuidados com o meio ambiente. Santos (2020).

Embasando-se em tais aspectos e priorizando a descontaminação das águas residuais, a fotocatalise heterogênea tem sido amplamente estudada, principalmente por ser menos agressiva ao meio ambiente e por não gerar subprodutos carcinogênicos. Souto (2023). Considerada como destaque entre os POA's – Processos Oxidativos avançados – a fotocatalise heterogênea visa a redução de substâncias tóxicas, permitindo o tratamento e remoção de poluentes químicos através da geração de radicais livres ($\text{OH}\cdot$), formados a partir da excitação de elétrons em presença da radiação UV. Zanrosso (2020). Logo, com a evolução de tal prática e seu aprimoramento nas últimas décadas, a mesma em conjunto de semicondutores, favorece tanto a cinética de adsorção do material, com também, melhora o equilíbrio e estabilidade dos processos de óxido-redução; ocasionando na mineralização de agentes recalcitrantes. Batista (2021); Dias (2019) & Martins (2021).

No entanto, é importante destacar que apesar dos semicondutores auxiliarem na retenção das partículas e acelerarem a velocidade do meio reacional, estudos apontam que sua adsorção ocorre de maneira prolongada quando o composto se encontra disperso em meio a solução, não apresentando alta efetividade em sua taxa degradativa e provocando um possível retrocesso da reação; favorecendo assim, o aumento dos índices de toxicidade presente nos compostos oxidados. Sauer² (2006) & Martini (2019). Deste modo, afim de se evitar a geração de poluentes secundários e gastos futuros quando ao seu tratamento, é fundamental que ocorram estudos embasados em alguns parâmetros e características do material fotodegradativo, principalmente no que diz respeito a sua transferência de massa e comportamento cinético, visto que os mesmos podem influenciar tanto na formação de novas substâncias, quanto propiciar a queda de agentes orgânicos presentes nos efluentes. Druzian (2022) & Sauer¹ (2002).

Em vista disto, o trabalho em questão abordou a elaboração de uma superfície do tipo esponjosa, de modo que os óxidos metálicos – ZnO, TiO₂ e CuO – pudessem crescer sobre a superfície do compósito de biocarvão, obtido a partir da biomassa preparada em estrutura com morfologia de esponja; garantindo assim, na obtenção de um material com maior área superficial e possibilitando em processos fotodegradativos mais eficientes.

2. Metodologia

Todos o os experimentos fotolíticos foram realizados sob as instalações do laboratório químico pertencente ao Centro de Tecnologia Renato Archer (CTI). Referente a síntese dos compósitos de biocarvão – TiO₂, ZnO e CuO, sua obtenção está descrita no item a seguir, dos quais foram utilizados nos ensaios de adsorção e fotocatalise heterogênea. O sistema contou com uma lâmpada a vapor de mercúrio de 9W (germicida – UVC – com bulbo de quartzo), agitação magnética (IKA[®] C – MAG HS7) acoplado a um termopar (como estabilizador de temperatura do sistema), um béquer de 1000 mL, uma bomba de ar para aquário e a solução estoque do corante comercial azul de metileno; todo o sistema foi montado dentro de um envoltório de madeira, evitando-se assim, a emissão excessiva de luz; para o monitoramento da reação de degradação/absorção foi utilizado o espectrofotômetro modelo Horiba Science – (DUETTA). Já para os experimentos voltados para a preparação dos compósitos de biocarvão contendo nanoestruturas de

óxidos metálicos – ZnO, TiO₂ e CuO – produzidos a partir de uma estrutura de esponja, utilizou-se um forno tubular de 3 patamares do modelo FDG 3P-S, pedaços de uma esponja provinda de uma bucha de lavar louças comercial; 0,075g de PVDF em pó; 0,03g do material a ser degradado e 2,5 mL de DMF.

2.1 Síntese do biocarvão a partir da Biomassa de cana-de-açúcar

Em um béquer, pesou-se 5g da biomassa provinda da cana-de-açúcar, da qual fora submetida a uma solução ácida contendo 100 mL de água deionizada, 15 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) e 15 mL de ácido fosfórico (H₂PO₄). Após homogeneização, deu-se início ao tratamento hidrotermal, onde a biomassa fora autoclavada em um vaso teflon e acomodada em um reator de aço inox, sob temperatura de 80°C durante 2 horas. Após resfriamento, realizou-se filtragem à vácuo e lavagem do material até atingir pH neutro; partindo então, para a secagem *overnight* em estufa e tratamento térmico a 100°C durante 24 horas. Posteriormente, o material seguiu para um forno tubular a vácuo sob atmosfera de nitrogênio (N₂) e passou por aquecimento de 750°C por 4 horas. Com a obtenção do material grafitizado, o mesmo fora recuperado através de um segundo tratamento ácido (HCl 0,5M), sob agitação de 20 minutos a temperatura ambiente e partiu-se para lavagem com água deionizada e secagem em estufa a 100°C/24h. Após secagem, a biomassa passou por peneiramento a (200 mesh).

2.2 Síntese das nanoestruturas de TiO₂, CuO e ZnO na superfície do biocarvão

Para a síntese dos óxidos foi necessária uma etapa de camada semente. Para tanto, utilizou-se 0,5 g da biomassa tratada, da qual fora agitada em meio a uma solução de 80 mM contendo respectivamente acetato de [Zn (C₃COOH₂)] ou [Cu (CH₃COOH)] em etanol, na proporção de 1:2, sob temperatura ambiente à 2 hora. Logo após, a biomassa já tratada com a camada semente fora transpassada para um recipiente de teflon contendo 200 mL de água deionizada, 6,5 mL de hidróxido de amônio (NH₄OH) e 30 mM do agente precursor nitrato [Zn(NO₃).6H₂O – 1,7824 g, Cu (NO₃)₂.3H₂O – 1,4496 g] ou [(Ti(OCH(CH₃)₂)₄ – 12,5 mL. O recipiente permaneceu em banho químico de 90°C por 2 horas, onde logo após fora centrifugado a 10.000 rpm/30min e seco em forno a uma temperatura de 100°C.

2.3 Preparação da solução estoque do corante azul de metileno

Sobre uma balança analítica, pesou-se 40 mg de azul de metileno comercial do qual fora solubilizado em 200 mL de água deionizada, resultando em uma concentração final de 200 mg/L. Com a solução pronta, a mesma fora transferida para um vidro âmbar, rotulada e armazenada para uso posterior nos ensaios de fotocatalise heterogênea e adsorção.

2.5 Preparação dos compósitos de biocarvão: nanoestruturas de óxidos metálicos – TiO₂, ZnO e CuO – com estrutura do tipo esponja

Inicialmente, com o auxílio de uma tesoura, cortou-se pequenos cubos da parte macia de uma esponja comercial, dos quais foram reservados para uso posterior. Sequencialmente, pesou-se 0,03 g do compósito de biocarvão contendo as nanoestruturas de óxido metálico e 0,075 g de PVDF que foram transferidos para um béquer e diluídos em 2,5 mL de DMF – N-N Dimetilformamida. Após preparo da solução, a mesma fora submetida a agitação

por 2h, sob temperatura de 70°C e mais meia hora de agitação sem a presença de calor. Com isto, adicionou-se as esponjas em meio a mistura para que o material pudesse absorver os compostos ali presentes e armazenou-se o béquer, do qual fora previamente lacrado durante um período de 2 h, sob temperatura ambiente.

Após 2h, as amostras foram removidas da solução contendo o compósito de biocarvão, sendo transpassadas para a parte inversa de uma barca e posicionadas de modo estratégico para que ocorresse um maior cobrimento da área superficial. Posteriormente, a barca fora realocada para um forno tubular de 3 patamares – FDG 3P-S –, do qual foi programado para corresponder em dois períodos (rampas): temperaturas de 100°C e 200°C, com tempo de estabilidade em cada rampa 120 minutos e taxa de aquecimento de 5°C/min.

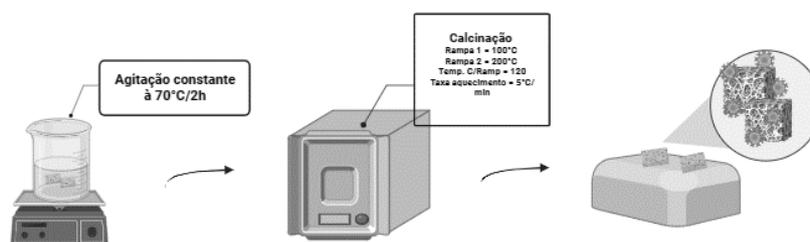


Figura 1- Ensaio de calcinação das estruturas esponjosas com óxidos metálicos -TiO₂, ZnO e CuO

2.7 Ensaio de absorção em presença dos compósitos de biocarvão

Foram efetuados oito ensaios de absorção com os compósitos de biocarvão contendo nanoestruturas de óxidos metálicos aderidos em estrutura esponjosa (esponja comercial); alterando-se somente o meio reacional – TiO₂, ZnO e CuO – e a temperatura do sistema (50°C e temperatura ambiente). Objetivando uma melhor ação fotodegradativa, a concentração dos compósitos e a quantidade de agente recalcitrante fora convertida, evitando-se o saturamento do meio reacional e agregando em um maior contato dos óxidos com o corante. Logo, utilizou-se 200 mg do compósito de biocarvão, para 200 mL do corante azul de metileno a 5 mg/L (1:1). Após preparo da solução, a mesma fora transpassada para o sistema fotolítico em conjunto do agitador magnético e sequencialmente fora efetuada a coleta do branco (tempo 0). Com isto, adicionou-se os compósitos e deu-se início ao recolhimento de mais 10 amostras sob um período de 8 horas, das quais posteriormente foram submetidas a leituras de absorção no espectrofotômetro.

2.8 Fotocatálise heterogênea à 50°C e temperatura ambiente

Ao todo foram realizados oito ensaios fotodegradativos com os compósitos de biocarvão, alternando-se os óxidos metálicos – TiO₂, ZnO e CuO – e a temperatura de exposição (ambiente e à 50°C). Sendo assim, uma solução de 5 mg/L de azul de metileno fora transferida para o sistema previamente descrito. Logo após, implementou-se a lâmpada de mercúrio ao sistema (Figura 2) e ligou-se o agitador juntamente com o aquecedor, dos quais foram ajustados com agitação nível 1 e temperatura de 50°C. Aguardou-se que o sistema atingisse a temperatura de 50°C e com isto, retirou-se uma amostra correspondente ao tempo zero de ativação. Posteriormente, adicionou-se em meio a solução o compósito de estrutura esponjosa e fechou-se o sistema. Deste modo, deu-se início ao processo fotodegradativo e a contagem do tempo de coleta para as próximas 10 amostras que foram submetidas a mais 8 horas de experimento.

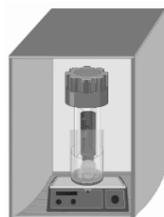


Figura 2- Sistema Fotolítico utilizado nos ensaios de Fotocatálise Heterogênea e absorção

2.9 Leituras da absorbância em espectrofotômetro e taxa de degradação

As leituras de absorbância em espectrofotômetro foram embasadas na Lei de Lambert-Beer, sendo aplicadas tanto para as amostras providas dos ensaios de fotocatalise heterogênea, quanto para os de absorção; tendo como propósito, avaliar o índice de degradação dos distintos materiais utilizados ao decorrer de 8h. Portanto, utilizou-se o equipamento de modelo Horiba Science – DUETTA – do qual fora calibrado para corresponder uma leitura de absorbância entre as regiões de 200 nm a 800 nm, com passo de 1nm. Como ressalva, é importante destacar que a leitura do branco (água deionizada) foi realizada anteriormente a varredura de cada uma das amostras. Posteriormente, os valores encontrados foram plotados em gráficos, tendo eixo “y” a razão da concentração do azul de metileno no tempo da alíquota pela concentração inicial (C/C_0), e como eixo “x” tempo de coleta de cada amostra.

2.10 Curva de calibração Azul de metileno

A curva de calibração foi construída a partir da leitura espectral de 6 amostras em triplicata, variando entre as concentrações de 0,5 mg/L a 5 mg/L. Após leitura das mesmas em espectrofotômetro, selecionou-se o comprimento de onda correspondente a maior absorção sob a região do visível e construiu-se a curva de calibração.

2.11 Estudo Cinético

Com os dados obtidos ao decorrer dos ensaios de absorção, calculou-se o tempo de reação de cada um dos compósitos contendo biocarvão em estrutura esponjosa– TiO_2 , ZnO e CuO – submetendo os mesmos ao modelo diferencial de pseudo-primeira ordem (Equação1) e pseudo-segunda ordem (Equação2) descritos por Langmuir. Posteriormente, foram plotados gráficos com a quantidade adsorvida (qt) versus o tempo (min) de coleta e avaliou-se seus respectivos desempenhos degradativos e com isto avaliou-se sua estrutura

$$qt = q_{e1}[1 - \exp(-K_1 * t)] \quad \text{Eq.1}$$

Onde: qt = quantidade adsorvida em certo ponto do processo de adsorção ($mg * g^{-1}$); q_{e1} = quantidade adsorvida em equilíbrio ($mg * g^{-1}$); $-k_1$ = constante da taxa de pseudo-primeira ordem (min^{-1}); t = tempo de coleta das amostras (min).

$$(K * q_e^2 * t)/(1 + (K * q_e * t)) \quad \text{Eq.2}$$

Onde: K = constante da taxa de pseudo-segunda ordem ($g * mg^{-1} * min^{-1}$); q_e^2 = quantidade adsorvida em equilíbrio elevado ao quadrado ($mg * g^{-2}$); t = tempo de coleta das amostras (min); q_e = quantidade adsorvida em equilíbrio ($mg * g^{-1}$).

2.12 Microtomografia computadorizada (MicroCT) do biocarvão modificado

Sendo uma técnica não destrutiva, de fácil preparação da amostra e que garante a obtenção de imagens tridimensional sob alta resolução, a Microtomografia (microCT) vem sendo amplamente utilizada na caracterização de diversos materiais, fornecendo informações como a quantidade dos poros, composição interna e distribuição de tamanho. Queiroz (2019). A análise microtomográfica do biocarvão contendo superfície modificada com os respectivos semicondutores – TiO₂, ZnO, CuO – foram realizadas utilizando o microtomógrafo (SkyScan 1272, Bruker).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Curva de Calibração

A curva foi construída a partir de 6 pontos em triplicata, dos quais foram submetidos a uma varredura espectral na região do visível. As concentrações utilizadas na construção da curva analítica foram 0,5 mg/L, 1 mg/L, 2 mg/L, 3 mg/L, 4 mg/L e 5 mg/L. A partir dos espectros obtidos, comprovou-se que a absorção máxima do corante azul de metileno era correspondente a 663 nm, sendo este, o parâmetro controle utilizado para as demais análises degradativas. Após varredura espectral, calculou-se a média das amostras e o seu desvio padrão e posteriormente gerou-se a equação da reta para construção da curva. A figura 3 apresenta os pontos obtidos, resultando em uma reta de $R^2 = 0,9831$ e equação da reta correspondente a $y = 0,2277x + 0,0952$.

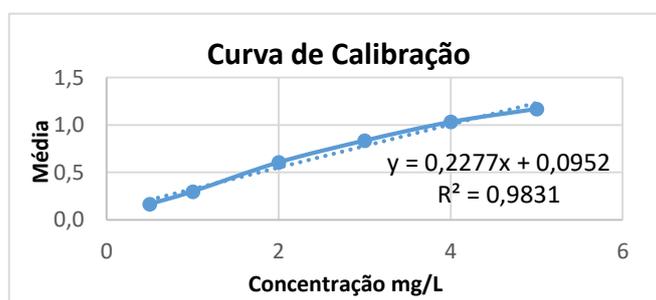


Figura 3– Curva de Calibração do azul de metileno (663nm)

3.2. Aplicação dos modelos cinéticos em compósitos de biocarvão com estrutura esponjosa

Tratando-se da velocidade de remoção de partículas presentes em um adsorvato, a cinética de adsorção apresenta grande importância no âmbito científico, principalmente por abordar o comportamento das moléculas mediante transferência de massa, difusão e reações químicas que ocorrem entre um adsorvato e um adsorvente. Jorge (2015). Ao abranger inúmeras formas de aplicação, a cinética permite estipular o tempo de equilíbrio necessário entre as reações e avaliar seu índice de degradação, favorecendo a remoção de contaminantes. Nascimento (2020). Entretanto, ao ser conduzida por divergentes processos de adsorção, é fundamental levar em consideração alguns fatores como temperatura, distribuição de poros e concentração da solução; uma vez que, os mesmos podem influenciar na capacidade de adsorção do material, agregando em um retrocesso degradativo. Library (2018). Tais variações foram bastante visíveis entre os ensaios de absorção e fotocatalise heterogênea à 50°C (Figura 4 e 5), onde, mesmo com o estímulo da temperatura e radiação UV-vis, os compósitos de biocarvão de estrutura modificada,

apresentaram resultados regulares, tendo uma perda de eficiência significativa no sistema; sendo um indicativo de que a distribuição e preenchimento dos poros sobre a superfície esponjosa afetaram a disposição dos sítios ativos, ocasionando na eliminação parcial do azul de metileno.

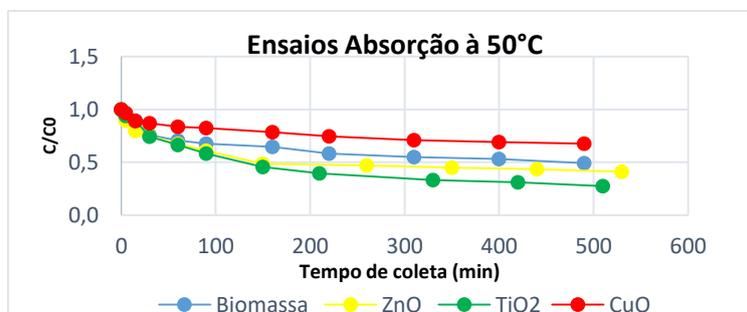


Figura 4 – Análise de Absorção com os semicondutores TiO₂, ZnO, CuO e biomassa á 50°C.

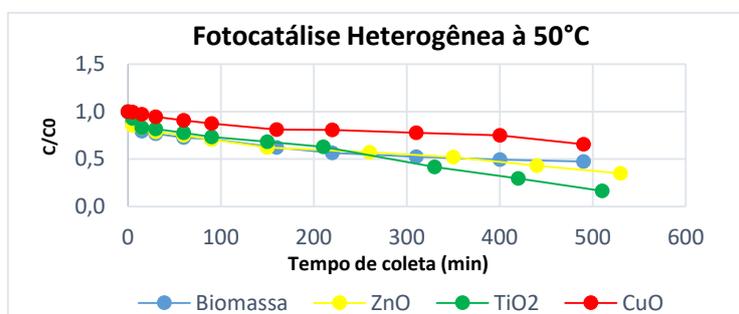


Figura 5 – Análise fotodegradativa dos semicondutores TiO₂, ZnO, CuO e biomassa á 50°C.

Por sua vez, no que diz respeito a mineralização do azul de metileno, os resultados foram mais favoráveis, destacando-se os óxidos TiO₂ e ZnO, dos quais exibiram uma taxa absorviva de 82%, 62%, respectivamente. Os mesmos também apresentaram certa linearidade com os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, dando indício de que a velocidade da reação, assim como o seu comportamento, é diretamente proporcional ao reagente utilizado.

3.2 Análise micrográfica dos efeitos da adição da camada polimérica no biocarvão

Apesar da fotocatalise heterogênea apresentar inúmeras vantagens, sua aplicação em conjunto de semicondutores dispersos em meio ao sistema fotolítico acabam impossibilitando a reutilização dos materiais; implicando em uma etapa a mais de filtração. Em vista disto, a imobilização de nanopartículas vem sendo uma ótima alternativa para driblar situações indesejáveis como a geração excessiva de efluentes e contribuir na recuperação dos materiais e na redução significativa dos custos de processo. Shing (2013). Um dos materiais que vem sendo amplamente utilizado para uma maior retenção e imobilização das partículas são os compósitos poliméricos, destacando-se por serem bastante flexíveis, de fácil obtenção e apresentarem certa durabilidade. Todavia, segundo Schwendler (2021), ainda que sua utilização implique em alguns benefícios para o processo fotodegradativo, o mesmo apresenta uma redução considerável na área superficial dos catalisadores, ocasionando na queda de sítios ativos e conseqüentemente, em uma menor taxa degradativa. Deste modo, é recomendável grande afinidade entre os catalisadores e o polímero utilizado; além de uma considerável área superficial e capacidade adsorviva dos poluentes. Para os experimentos efetuados com a fotocatalise

heterogênea tanto a temperatura ambiente, quanto a 50°C, os óxidos TiO₂, ZnO e CuO; apresentaram índices de degradação consideráveis, ficando em torno de 82%, 62% e 33% respectivamente. Logo, os resultados encontrados foram condizentes com o esperado, visto que, os compósitos de biocarvão em presença do material polimérico, apresentou uma boa distribuição interna das nanopartículas sob uma estrutura esponjosa, exibindo intervalos de 100 um entre cada deposição do semiconductor (Figura 6 (a) e (b)) e evitou a necessidade de uma etapa de filtração ao final do processo fotolítico.

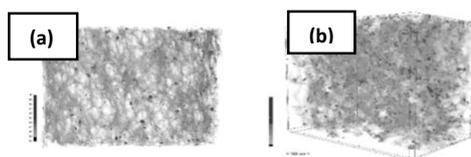


Figura 6 – (a) Imagem microtomográfica bidimensional da matriz esponjosa + ZnO antes da Fotocatálise e (b) Imagem microtomográfica tridimensional da matriz esponjosa + ZnO após Fotocatálise Heterogênea

De acordo com a figura 6 (b), mesmo após um período de 8 horas de exposição à radiação UV, a matriz polimérica manteve retido em seu meio uma quantidade considerável de nanopartículas metálicas (pontos mais escuros), dando indícios de que o contato superficial entre o meio reacional e o semiconductor fora realizado de modo parcial, ocasionando na queda da taxa degradativa e em uma possível reutilização do material. Fatores dos quais podem ter contribuído para o retardamento do processo de degradação é a interação entre a superfície esponjosa e os semicondutores ou uma possível deterioração química do material ao ser exposto a altas temperaturas, ocasionando em uma perda tanto das partículas catalíticas quanto do polímero ao decorrer da etapa de calcinação.

3. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos através dos ensaios fotolíticos e de absorção, observou-se que durante a aplicação da fotocatalise heterogênea, houve uma breve potencialização na mineralização do corante azul de metileno, sendo esta, a comprovação de que a ação oxidativa gerada a partir da fotoreação é uma técnica bastante viável para a recuperação de efluentes industriais e remoção de substâncias orgânicas. Entretanto, apesar da fotocatalise ter apresentado certa eficiência, notou-se que somente a exposição dos óxidos a radiação UV-vis e variações das nanoestruturas contendo TiO₂, ZnO e CuO, não ocasionam em uma degradação completa, sendo necessário, o estímulo da temperatura para ampliar os índices de degradação. Quanto aos resultados adquiridos a partir da absorção, registou-se um maior equilíbrio reacional em comparação a sua mineralização; dando indícios de que ao longo do processo, o biocarvão de estrutura modificada atingiu seu limite de absorção rapidamente; ocasionando na perda de eficiência no sistema. Desta forma, para uma maior capacidade degradativa dos óxidos, seria necessário o aprimoramento da técnica de deposição do biocarvão em estrutura esponjosa, de tal modo que as proporções entre o efluente e a quantidade de semiconductor empregados no sistema sejam aplicados de maneira uniforme e recubra toda a área superficial.

Agradecimentos: Primeiramente gostaria de agradecer ao CNPq pela disposição e comprometimento ao incentivar o desenvolvimento e criação de novas tecnologias e pesquisas de inovação científica no âmbito brasileiro. A comissão PIBIC, por apoiar a inserção de bolsas que possibilitem na imersão e aprimoramento profissional de futuros pesquisadores e a equipe do CTI ao abrir portas a inúmeras áreas de inovação e apoiar o desenvolvimento tanto profissional quanto pessoal ao se envolver cotidianamente com demais profissionais do meio científico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Batista, C. **Óxidos: o que são, classificação e exemplos** – Blog TodaMatéria.com, 2021. Disponível:<[Óxidos: o que são, classificação e exemplos - Toda Matéria \(todamateria.com.br\)](https://todamateria.com.br/oxidos-o-que-sao-classificacao-e-exemplos)>. Acesso: 30.01.2023.

Cardoso, N. F. **Remoção do corante azul de metileno de efluentes aquosos utilizando casca de pinhão in natura e carbonizada com adsorvente**. 2010. Disponível: <ufrgs.br>. Acesso: 14.01.2023.

Dias, D. L. **Hibridização sp³ do carbono** – Blog Mundo Educação, 2019. Disponível:<[Hibridização sp³ do carbono - Mundo Educação \(uol.com.br\)](https://mundoeducacao.uol.com.br/hibridizacao-sp3-do-carbono/)>. Acesso: 30.01.2023.

Druzian, D. M.; Da S., William L. **Síntese de um nanocatalisador metálico suportado para a degradação do corante rodamina G**. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 2, n. 14, 2022. Disponível:<https://ei.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/25311/etp2_resumo_expandido_25311.pdf>. Acesso: 30.01.2023.

Faria, L. F. S. **Síntese, caracterização e estudo do processo de adsorção de filmes de nanocompósitos de PVDF/argila**. 2015. Disponível: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/139493/faria_las_me_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso: 26.01.2023.

Ferreira, I. do Vale. **Modificação de superfícies e imobilização de nanopartículas semicondutoras para o desenvolvimento de novos materiais fotocatalíticos**. 2021. Tese de Doutorado. Disponível:<https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/48275/1/ulfc126352_tm_In%c3%aas_Ferreira.pdf>. Acesso: 10.04.2023.

Jorge, I. R.; Tavares, F. P.; Santos, Kássia G. dos. **Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em bagaço de cana de açúcar**. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 2, n. 1, p. 491-500, 2015. Disponível:<[301419624_REMOCAO_DO_CORANTE_AZUL_DE_METILENO_NO_TRATAMENTO_DE_EFLUENTES_POR_ADSORCAO_EM_BAGACO_DE_CANA_DE_ACU_CAR](https://www.blucher.com.br/ojs/blucher/article/view/301419624_REMOCAO_DO_CORANTE_AZUL_DE_METILENO_NO_TRATAMENTO_DE_EFLUENTES_POR_ADSORCAO_EM_BAGACO_DE_CANA_DE_ACU_CAR)>. Acesso: 29.11.2022.

Library. **Cinética de Adsorção**, p. 32-39, 2018. Disponível:<[Cinética de adsorção - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA \(library.org\)](https://www.library.org/)>. Acesso: 29.11.2022.

Martini, F. A.; Estevam, R. B.; Raul, J. **Estudo da influência de quantum dots de carbono modificados com nitrogênio na fabricação de células solares sensibilizadas por corante**. Disponível:<[TÍTULO DO RESUMO \(uepg.br\)](https://uepg.br/)>. Acesso: 30.01.2023.

Martins, C. V. C. et al. **Investigação de propriedades eletroquímicas de pontos quânticos de carbono obtidos a partir da biomassa de cana-de-açúcar.** 2021. Disponível: <[dissertação_Carlos_Vinicius.pdf \(ifgoiano.edu.br\)](#)>. Acesso: 30.01.2023.

Nascimento, R. F. do *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais.** 2020. Disponível: <[2020 liv_rfnascimento.pdf](#)>. Acesso: 03.04.2023.

QUEIROZ, P. José et al. **Microtomografia Computadorizada: Princípios de funcionamento e utilização em amostras biológicas.** ENCICLOPEDIA BIOSFERA, v. 16, n. 29, 2019.

Santos, Bruno Alexandre Alves. **Materias energeticamente eficientes para incorporação em sistemas de fotocatalise para remoção de poluentes.** 2020. Disponível: <[capa e rosto \(uminho.pt\)](#)>. Tese de Doutorado. Acesso: 26.01.2023.

Sauer¹, Ticiane et al. **Degradação fotocatalítica de corante e efluente têxtil.** 2002. Disponível: <[file:///C:/Users/lcsantos/Downloads/PENQ0088-D%20\(1\).pdf](#)>. Acesso: 30.01.2023.

Sauer², Ticiane et al. **Tratamento de efluentes de curtume através do processo combinado de degradação fotocatalítica seguida por adsorção em carvão ativado.** 2006. Disponível: <[file:///C:/Users/lcsantos/Downloads/PENQ0088-D.pdf](#)>. Acesso: 30.01.2023.

Schwendler, L. A. **Filmes compósitos de polihidroxibutirato-cohidroxivalerato aplicados à fotocatalise heterogênea.** 2021. Disponível: <[https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/234985/001134988.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)>. Acesso: 10.04.2023.

Singh, S.; Mahalingam, H.; Singh, Pramod K. **Fotocatalisadores de dióxido de titânio suportados por polímeros para remediação ambiental: uma revisão.** *Catálise Aplicada A: Geral*, v. 462, p. 178-195, 2013. Disponível: <[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926860X13002561](#)>. Acesso: 10.04.2023.

Souza, L. A. de. **Compostos aromáticos tóxicos – Mundo Educação,** 2023. Disponível: <[Compostos aromáticos tóxicos - Mundo Educação \(uol.com.br\)](#)>. Acesso: 26.01.2023.

Souto, D. E. M. et al. **Síntese e caracterização de nanocompósitos entre hexacianoferrato de zinco e estruturas de carbono visando a aplicação com catalisadores no processo de fotocatalise heterogênea do paracetamol.** 2023. Disponível: <[https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37214/1/S%c3%adnteseCaracteriza%c3%a7%c3%a3oNanocomp%c3%b3sitos.pdf](#)>. Acesso: 28.02.2023.

Zanrosso, C. D. **Filmes compósitos poliméricos desenvolvidos para a fotocatalise heterogênea.** 2020. Disponível: <[Filmes compósitos poliméricos desenvolvidos para a fotocatalise heterogênea \(ufrgs.br\)](#)>. Acesso: 27.01.2023.