

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BENJAMIM SILVA BERTOLO

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FOTOCATALISADOR À BASE DE ZINCO
RECICLADO E EMPREGO NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS LÍQUIDOS
ORGÂNICO**

FRANCISCO BELTRÃO

2025

BENJAMIM SILVA BERTOLO

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FOTOCATALISADOR À BASE DE ZINCO
RECICLADO E EMPREGO NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS LÍQUIDOS
ORGÂNICO**

**Evaluation of the production of recycled zinc-based photocatalyst and its use
in the treatment of organic liquid waste**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientadora: Prof^a. Dra. Ana Paula de Oliveira
Schmitz.

Coorientador: Prof. Dr. Wagner da Silveira

FRANCISCO BELTRÃO

2025

BENJAMIM SILVA BERTOLO

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FOTOCATALISADOR À BASE DE ZINCO
RECICLADO E EMPREGO NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS LÍQUIDOS
ORGÂNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 25/junho/2025

Ana Paula de Oliveira Schmitz
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Vilmar Steffen
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Patrícia Aline Bressiani
Mestrado em Engenharia Ambiental: Análise e Tecnologia Ambiental
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

FRANCISCO BELTRÃO

2025

RESUMO

BERTOLO, Benjamim Silva. **Avaliação da produção de fotocatalisador à base de zinco reciclado e emprego no tratamento de resíduos líquidos orgânicos**. 2025. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2025.

O descarte inadequado de pilhas representa um problema ambiental devido à presença de metais como o zinco. Este trabalho teve como objetivo produzir um fotocatalisador com grande percentual de óxido de zinco (ZnO) em sua composição, a partir da recuperação do zinco presente no ânodo de pilhas alcalinas exauridas e avaliar sua aplicação na degradação de poluentes orgânicos via fotocatalise heterogênea. Especificamente, buscou-se otimizar o processo de síntese por lixiviação ácida (usando ácido sulfúrico [H₂SO₄] e ácido oxálico [H₂C₂O₄]) e calcinação, caracterizar o material obtido e testar sua eficiência na degradação do corante azul reativo 5G. Foi avaliada ainda a potencialidade do fotocatalisador produzido na degradação do herbicida 2,4-D e o fármaco cloridrato de metformina. Utilizou-se um planejamento fatorial fracionário 3² para otimizar as concentrações dos ácidos e a temperatura de calcinação, visando maximizar a degradação fotocatalítica e o rendimento mássico. O fotocatalisador obtido nas condições otimizadas (FPOD) foi caracterizado por DRX, FTIR, MEV, TGA e fisissorção de N₂. Os ensaios fotocatalíticos foram realizados em sistema batelada com 200 mL de solução de corante azul reativo 5G (C₀ = 100 mg L⁻¹ e pH_{inicial} = 7) e 1 g L⁻¹ de fotocatalisador, sendo a mistura mantida sob agitação por 30 min no escuro e posteriormente por 3 h com exposição a luz UV. Foram retiradas alíquotas do meio reacional ao longo do tempo, submetidas a centrifugação (3000 rpm, 5 min) e análise em espectrofotômetro UV-Vis (614 nm). A partir da análise DRX foi confirmada a formação de ZnO, observando-se por FTIR a presença de ligações Zn-O. Pela análise TGA averiguou-se a pureza do material (aproximadamente 90,6% de ZnO) e a adequação da temperatura de calcinação sendo os últimos eventos de perda de massa em 374,67 °C e 409 °C, havendo então estabilização. A partir dos resultados do planejamento experimental, foi possível observar que as variáveis [H₂C₂O₄] e temperatura de calcinação apresentaram-se estatisticamente significativas ao nível de 5% de significância para a degradação fotocatalítica. O modelo quadrático ajustado foi validado (F_{calculado} = 86,2 > F_{tabelado} =

3,11) e o ponto ótimo (FPOD) definido como 0,4 mol L⁻¹ de H₂SO₄, 0,5 mol L⁻¹ de H₂C₂O₄ e calcinação a 381 °C. Os ensaios de fotocatalise, sob irradiação UV e luz solar, demonstraram alta eficiência na degradação do corante azul reativo 5G (96,5% e 98,8%, respectivamente), seguindo cinética de pseudoprimeira ordem ($k_{UV} = 0,019 \text{ min}^{-1}$ e $k_{sol} = 0,016 \text{ min}^{-1}$). A degradação do 2,4-D mostrou-se dependente do pH, sendo que em pH 7 a degradação foi superior (97,2%), não sendo observada degradação fotocatalítica significativa para o cloridrato de metformina. O teste de ecotoxicidade com *Eisenia fetida* indicou não haver toxicidade para esse bioindicador da solução de corante azul reativo 5G antes e após o tratamento por fotocatalise com FPOD. Conclui-se que a rota de recuperação de zinco de pilhas alcalinas para produção de fotocatalisadores de ZnO apresenta indicativo de viabilidade, gerando um material eficiente para a remediação de efluentes líquidos contendo diferentes poluentes orgânicos, contribuindo para a valorização de resíduos e a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: fotocatalise; óxido de zinco; pilhas alcalinas; tratamento de efluentes.

(X) Não autorizo a disponibilização de endereço de correio eletrônico para contato.

() Autorizo a disponibilização do seguinte correio eletrônico para contato.

ABSTRACT

BERTOLO, Benjamim Silva. **Evaluation of the production of recycled zinc-based photocatalyst and its use in the treatment of organic liquid waste.** 2025.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2025. Título original: Avaliação da produção de fotocatalisador à base de zinco reciclado e emprego no tratamento de resíduos líquidos orgânico.

The improper disposal of batteries represents an environmental problem due to the presence of metals such as zinc. This work aimed to produce a photocatalyst with a high percentage of zinc oxide (ZnO) in its composition, from the recovery of zinc present in the anode of spent alkaline batteries, and to evaluate its application in the degradation of organic pollutants via heterogeneous photocatalysis. Specifically, it sought to optimize the synthesis process by acid leaching (using sulfuric acid [H₂SO₄] and oxalic acid [H₂C₂O₄]) and calcination, characterize the obtained material, and test its efficiency in the degradation of the reactive blue 5G dye. The potential of the produced photocatalyst in the degradation of the herbicide 2,4-D and the drug metformin hydrochloride was also evaluated. A 3² fractional factorial design was used to optimize the acid concentrations and calcination temperature, aiming to maximize photocatalytic degradation and mass yield. The photocatalyst obtained under optimized conditions (FPOD) was characterized by XRD, FTIR, SEM, TGA, and N₂ physisorption. The photocatalytic tests were carried out in a batch system with 200 mL of reactive blue 5G dye solution (C₀ = 100 mg L⁻¹ and initial pH = 7) and 1 g L⁻¹ of photocatalyst, with the mixture kept under stirring for 30 min in the dark and subsequently for 3 h with exposure to UV light. Aliquots were taken from the reaction medium over time, subjected to centrifugation (3000 rpm, 5 min) and analyzed in a UV-Vis spectrophotometer (614 nm). From the XRD analysis, the formation of ZnO was confirmed, with the presence of Zn-O bonds observed by FTIR. The TGA analysis verified the purity of the material (approximately 90.6% ZnO) and the adequacy of the calcination temperature, with the last mass loss events at 374.67 °C and 409 °C, followed by stabilization. From the results of the experimental design, it was possible to observe that the variables [H₂C₂O₄] and calcination temperature were statistically significant at the 5% significance level for photocatalytic degradation. The adjusted quadratic model was validated (F_{calculated} = 86.2 > F_{tabulated} = 3.11) and the optimal point

(FPOD) defined as 0.4 mol L⁻¹ of H₂SO₄, 0.5 mol L⁻¹ of H₂C₂O₄, and calcination at 381 °C. Photocatalysis tests, under UV irradiation and sunlight, demonstrated high efficiency in the degradation of the reactive blue 5G dye (96.5% and 98.8%, respectively), following pseudo-first-order kinetics ($k_{UV} = 0.019 \text{ min}^{-1}$ and $k_{sol} = 0.016 \text{ min}^{-1}$). The degradation of 2,4-D was shown to be pH-dependent, with degradation being higher at pH 7 (97.2%), with no significant photocatalytic degradation observed for metformin hydrochloride. The ecotoxicity test with *Eisenia fetida* indicated no toxicity to this bioindicator from the reactive blue 5G dye solution before and after treatment by photocatalysis with FPOD. It is concluded that the route of zinc recovery from alkaline batteries for the production of ZnO photocatalysts shows indications of viability, generating an efficient material for the remediation of liquid effluents containing different organic pollutants, contributing to waste valorization and environmental sustainability.

Keywords: photocatalysis; zinc oxide; alkaline batteries; effluent treatment.