

OXIDAÇÃO ELETROQUÍMICA DE CORANTE AZO RECALCITRANTE UTILIZANDO ELETRODOS DE DIAMANTE DOPADO COM BORO: DESEMPENHO, OTIMIZAÇÃO E IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS

Fábio José Roca dos Santos¹

Marcelo Campos²

Cíntia da Silva Santos³

Mileidy Guarnieri⁴

Álefe de Oliveira Cáceres⁵

Carlos Nobuyoshi Ide⁶

RESUMO

A oxidação eletroquímica tem se destacado como uma alternativa eficiente para o tratamento de efluentes industriais contendo contaminantes recalcitrantes. Neste estudo, avaliou-se a degradação do corante azo Acid Black 2 (AB2) em efluente sintético de curtume por meio da oxidação eletroquímica utilizando eletrodo de diamante dopado com boro (DDB). Os experimentos foram conduzidos em sistema de batelada com recirculação, sendo investigada a influência da concentração inicial do corante, densidade de corrente elétrica, pH, concentração de eletrólito e tempo de reação por meio de planejamento experimental do tipo Taguchi (L25). As respostas analisadas incluíram remoção de cor, demanda química de oxigênio (DQO), carbono orgânico total (COT) e consumo específico de energia. Elevadas eficiências de remoção foram obtidas, alcançando até 95,7% para o corante AB2, 97,4% para DQO e 83,6% para COT. A otimização multiobjetivo via função desejabilidade indicou condições operacionais associadas a pH ácido, baixas concentrações iniciais de corante e densidades de corrente moderadas, conciliando alta eficiência de tratamento e menor consumo energético. Os estudos cinéticos revelaram mudança no mecanismo de degradação, com ajuste a modelo de segunda ordem em condições preliminares e primeira ordem sob condições otimizadas. Ensaios ecotoxicológicos com *Artemia salina* indicaram que o tratamento eletroquímico não promoveu aumento significativo da toxicidade do efluente tratado. Os resultados demonstram o elevado potencial da oxidação eletroquímica com eletrodo DDB como tecnologia avançada e ambientalmente segura para o tratamento de efluentes de curtume contendo corantes recalcitrantes.

Palavras-chave: Processos oxidativos avançados; Planejamento experimental de Taguchi; Ecotoxicidade aquática; Demanda química de oxigênio.

ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF A RECALCITRANT AZO DYE USING BORON-DOPED DIAMOND ANODES: PERFORMANCE, OPTIMIZATION AND ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS

ABSTRACT

Electrochemical oxidation has emerged as an efficient alternative for the treatment of industrial effluents containing recalcitrant contaminants. In this study, the degradation of the azo dye Acid Black 2 (AB2) in synthetic tannery wastewater was evaluated using electrochemical oxidation with a boron-doped diamond (BDD) anode. The experiments were carried out in a batch system with recirculation, investigating the influence of initial dye concentration, current density, pH, electrolyte concentration, and reaction time through a Taguchi experimental design (L25). The evaluated responses included color removal, chemical oxygen demand (COD) removal, total organic carbon (TOC) removal, and specific energy consumption. High removal efficiencies were achieved, reaching up to 95.7% for AB2, 97.4% for COD, and 83.6% for TOC. Multi-objective optimization using the desirability function indicated optimal operating conditions associated with acidic pH, low initial dye

¹ Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), com mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. Atualmente é doutorando no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PGTA/UFMS). fabio.roca@ufms.br

² Graduado em Gestão Ambiental pela Estácio de Sá (unidade Campo Grande/MS) e mestrando em Tecnologias Ambientais (PGTA/UFMS). marcelo.campos@ufms.br

³ cintia.s.santos@ufms.br

⁴ Egressa da UFMS. m.guarnieri@ufms.br

⁵ Engenheiro com atuação em saneamento e geotecnologias, vinculado à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. alefe.caceres@ufms.br

⁶ Professor doutor da UFMS, com dedicação exclusiva, vinculado à Faculdade de Engenharias (FAENG) e ao Curso de Engenharia Ambiental. carlos.ide@ufms.br

concentrations, and moderate current densities, allowing high treatment efficiency with reduced energy consumption. Kinetic studies revealed a shift in the degradation mechanism, with second-order behavior under preliminary conditions and first-order kinetics under optimized conditions. Ecotoxicological assays using *Artemia salina* showed no statistically significant increase in toxicity after electrochemical treatment. Overall, the results demonstrate that electrochemical oxidation using a BDD anode, combined with statistical optimization tools, represents a promising and environmentally safe advanced treatment technology for tannery effluents containing recalcitrant azo dyes.

Keywords: Advanced oxidation processes; Taguchi experimental design; Aquatic ecotoxicity; Chemical oxygen demand.

Recebido em 01 de fevereiro de 2026. Aprovado em 08 de abril de 2026

INTRODUÇÃO

A indústria de curtume apresenta expressiva relevância econômica no Brasil, com centenas de unidades produtivas, elevada geração de empregos e significativa participação no mercado internacional. De acordo com dados do Centro das Indústrias de Curtume do Brasil (2022), o setor conta com aproximadamente 250 curtumes em operação no país, além de milhares de indústrias associadas à cadeia produtiva do couro, movimentando bilhões de dólares anualmente. Entretanto, apesar de sua importância econômica, trata-se de um segmento industrial reconhecido pelo elevado potencial poluidor, uma vez que apenas parte da matéria-prima processada é incorporada ao produto final, resultando na geração de grandes volumes de resíduos e efluentes líquidos (PASCOAL et al., 2007).

Os efluentes gerados no processamento do couro apresentam composição complexa, caracterizada por elevadas concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos em suspensão, nitrogênio orgânico, sulfetos e metais potencialmente tóxicos (MELLA et al., 2015). Além disso, em determinadas etapas do processo produtivo, esses efluentes podem conter concentrações significativas de corantes sintéticos, com destaque para os azo corantes, que representam a classe mais amplamente utilizada pela indústria e são reconhecidos por sua elevada estabilidade química e toxicidade à saúde humana e aos organismos aquáticos (WAN et al., 2019).

Diante das limitações dos processos convencionais de tratamento na remoção desses contaminantes, tecnologias avançadas têm sido investigadas com o objetivo de promover a degradação de compostos orgânicos recalcitrantes presentes em efluentes industriais. Nesse contexto, os processos de oxidação eletroquímica avançada destacam-se como alternativas promissoras, sobretudo pela simplicidade operacional e alto desempenho na degradação de poluentes de difícil remoção (CAMPOS et al., 2023).

Entre os materiais empregados nesses processos, os eletrodos de diamante dopado com boro (DDB) têm recebido atenção crescente, uma vez que apresentam elevada estabilidade eletroquímica, ampla janela de potencial e elevada eficiência na geração de espécies oxidantes capazes de promover a mineralização de poluentes orgânicos. Estudos indicam que eletrodos de DDB são particularmente eficazes na degradação de compostos orgânicos refratários, incluindo corantes sintéticos, superando o desempenho de ânodos tradicionais (MIGLIORINI et al., 2014; CHEN et al., 2020). De acordo com Hamza et al. (2009), a elevada sobretensão desses eletrodos favorece a mineralização de compostos orgânicos, ampliando a eficiência do processo de oxidação eletroquímica.

Resultados experimentais em escala de bancada têm demonstrado elevados percentuais de remoção de corantes utilizando eletrodos de DDB, como observado por Campos et al. (2023), que reportaram eficiências superiores a 90% na degradação do corante *Procion Yellow*. No entanto, apesar dos resultados promissores, aspectos relacionados ao consumo energético do processo e à definição de condições operacionais ótimas ainda representam desafios

relevantes, especialmente quando se considera a viabilidade técnica e ambiental do tratamento, incluindo possíveis efeitos adversos, como a toxicidade residual do efluente tratado.

Nesse cenário, o uso de ferramentas de planejamento experimental surge como uma estratégia eficiente para a avaliação sistemática da influência das variáveis operacionais sobre o desempenho da oxidação eletroquímica. O método de Taguchi, aliado à função desejabilidade, tem sido amplamente empregado para a otimização de processos, permitindo a análise simultânea de múltiplos fatores com um número reduzido de experimentos e contribuindo para a obtenção de condições operacionais mais robustas (LAMY et al., 2018; MEHAT; KAMARUDDIN, 2012).

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a degradação eletroquímica do corante azo Acid Black 2 em efluente sintético de curtume por meio do uso de eletrodo de diamante dopado com boro, com ênfase na eficiência de remoção e no consumo energético do processo. Adicionalmente, busca-se otimizar as condições operacionais por meio da aplicação de planejamento experimental, contribuindo para o aprimoramento técnico da oxidação eletroquímica como alternativa avançada para o tratamento de efluentes industriais.

REFERÊNCIAL TEÓRICO

Corantes azo e efluentes de curtume

Corantes são substâncias capazes de absorver radiação na faixa do visível e conferir coloração a diferentes materiais, sendo utilizados em ampla escala industrial (Ortega; Lagunes & Trigos, 2020; Benkhaya, M'Rabet & El Harfi, 2020). A predominância de corantes sintéticos e sua elevada persistência ambiental têm sido associadas a riscos à saúde e impactos ecossistêmicos, uma vez que podem atuar como micropoluentes e serem detectados em diferentes compartimentos ambientais, incluindo água, sedimentos e organismos aquáticos (Srivastava & Sofi, 2020; Tkaczyk et al., 2020; Mota et al., 2023).

No setor coureiro, a presença de corantes nos efluentes se soma a uma matriz complexa, caracterizada por altas cargas orgânicas e inorgânicas, incluindo DBO, DQO, sulfetos, metais e sólidos em suspensão, o que dificulta o tratamento por rotas convencionais e amplia o potencial de impacto ambiental (Mella et al., 2015; Selvi et al., 2013; Sharma et al., 2023). Além disso, o uso de determinados corantes pode aumentar o risco ambiental do efluente, sobretudo quando associados a metais e complexos metálicos utilizados em formulações de tingimento e acabamento (Mutlu, 2009).

Entre as classes de corantes sintéticos, os corantes azo destacam-se por serem amplamente empregados em diferentes segmentos industriais, inclusive no curtume, e por apresentarem o grupo azo ($-\text{N}=\text{N}-$) como característica estrutural central (Ali et al., 2024). Durante operações de tingimento, uma fração relevante pode não ser fixada ao substrato e ser carregada para o efluente, contribuindo para coloração persistente e efeitos adversos ao meio aquático (Zhang & Wu, 2014; Kieu et al., 2024). Nesse contexto, o corante Acid Black 2 (AB2) é frequentemente utilizado como composto-modelo em estudos de degradação, inclusive em estudos envolvendo oxidação eletroquímica, por representar um contaminante recalcitrante de interesse ambiental (Wan et al., 2019).

Oxidação eletroquímica e eletrodos de diamante dopado com boro

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são definidos pela geração *in situ* de espécies fortemente oxidantes, como os radicais hidroxila, capazes de promover a degradação de compostos orgânicos persistentes em águas residuárias (Martínez-Huitl & Brillas, 2009). Diferentes aplicações indicam a eficácia desses processos em efluentes industriais e matrizes

complexas, com destaque para alternativas que combinam eficiência de oxidação e flexibilidade operacional (Andreozzi et al., 2000; Hassaan & El Nemr, 2017; Singh & Garg, 2021; Litter, 2020).

Dentro desse conjunto de tecnologias, a oxidação eletroquímica tem sido apontada como alternativa promissora no tratamento de efluentes, por permitir a geração de espécies oxidantes diretamente no sistema e possibilitar o controle operacional de parâmetros críticos, como densidade de corrente, eletrólito suporte e pH (Chen, 2004; Mohan, Subramanian & Balasubramanian, 2001; Woisetschläger et al., 2013). Em estudos aplicados a matrizes contendo poluentes orgânicos, técnicas eletroquímicas também têm demonstrado potencial de integração com outras rotas de tratamento, ampliando a eficiência e o espectro de aplicação (Costa et al., 2008; Asmussen, Tian & Chen, 2009).

O desempenho da oxidação eletroquímica depende fortemente do material anódico. Nesse sentido, eletrodos de diamante dopado com boro (DDB) destacam-se por apresentarem elevada estabilidade, ampla janela de potencial e alta eficiência na geração de espécies oxidantes, favorecendo a degradação e mineralização de compostos orgânicos refratários, incluindo corantes (Alfaro et al., 2006; Vasconcelos et al., 2016; Chen et al., 2020). A oxidação em DDB está associada à formação de radicais hidroxila adsorvidos na superfície do ânodo, que atuam na degradação de compostos orgânicos dissolvidos na solução (Veroli et al., 2017). Além disso, a elevada sobretensão desses eletrodos favorece condições que podem intensificar a mineralização, superando ânodos tradicionais em diferentes aplicações (Hamza et al., 2009).

Para o tratamento de efluentes contendo corantes, revisões e estudos experimentais indicam que a oxidação eletroquímica com ânodos avançados pode atingir elevadas eficiências de remoção, embora a viabilidade do processo dependa de condições operacionais adequadas, especialmente em relação ao consumo energético e à otimização conjunta de múltiplas respostas do tratamento (Brillas & Martínez-Huitle, 2009; Wan et al., 2019; Campos et al., 2023).

Planejamento experimental e otimização de múltiplas respostas

Processos eletroquímicos aplicados ao tratamento de efluentes envolvem múltiplas variáveis operacionais que podem influenciar simultaneamente a eficiência de remoção e o consumo energético, como concentração inicial do contaminante, densidade de corrente, pH, eletrólito suporte e tempo de reação (Mohan, Subramanian & Balasubramanian, 2001). Dessa forma, o emprego de planejamento experimental é relevante para avaliar a influência conjunta dos fatores e reduzir o número de ensaios necessários, mantendo consistência estatística e confiabilidade dos resultados (Kempthorne, 1983; Roy, 2001).

O método de Taguchi utiliza arranjos ortogonais para investigar múltiplos fatores com um número reduzido de experimentos, sendo amplamente aplicado para otimização de processos e aumento de robustez operacional (Taguchi, 1986; Taguchi, 1987; Taguchi, Chowdhury & Wu, 2005; Mehat & Kamaruddin, 2012). A análise pode ser complementada por ferramentas como ANOVA e razão sinal-ruído, permitindo identificar fatores mais influentes e níveis operacionais associados a melhor desempenho do processo (Taguchi, Chowdhury & Wu, 2005; Maranhão, 1996).

Quando associado a abordagens de otimização multiobjetivo, como a função desejabilidade, torna-se possível buscar simultaneamente condições que maximizem respostas de remoção e minimizem consumo de energia, permitindo maior aderência a critérios técnicos e operacionais do tratamento (Derringer & Suich, 1980; Lamy et al., 2018; Cho et al., 2022).

Ecotoxicologia como ferramenta complementar de avaliação

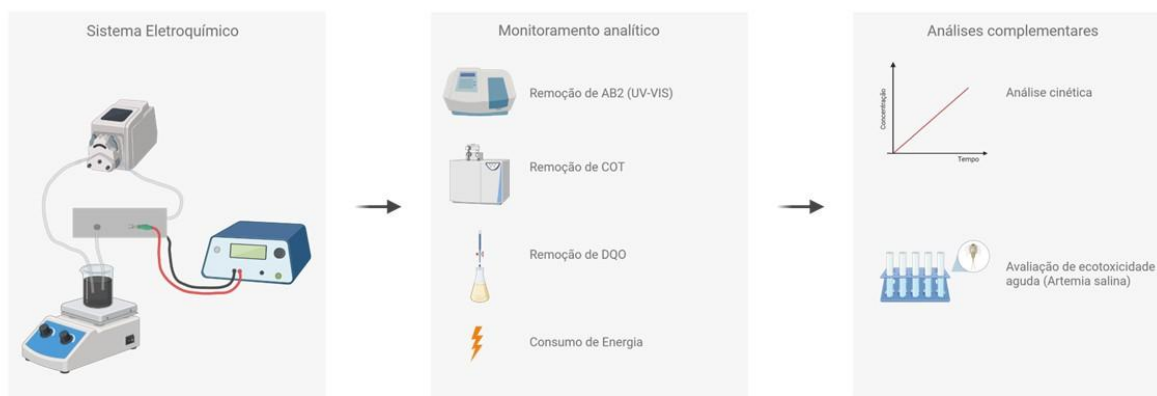
A caracterização de efluentes exclusivamente por parâmetros físico-químicos pode ser insuficiente para representar o risco ambiental, uma vez que a toxicidade pode depender de interações entre componentes, formas químicas e condições do meio (Goldstein et al., 1983; Costa et al., 2008). Nesse sentido, ensaios ecotoxicológicos constituem ferramentas complementares para avaliar os efeitos biológicos de amostras antes e após tratamentos, permitindo verificar se a degradação de compostos orgânicos reduz, mantém ou altera o potencial tóxico do efluente (Truhaut, 1977; Cunha, 2011).

Ensaio de toxicidade aguda são amplamente utilizados para avaliação de efeitos em curto período de exposição, fornecendo métricas como CL50/CE50, que sintetizam a resposta biológica frente a diferentes concentrações da amostra (Costa et al., 2008; Brentano et al., 2006). No contexto de efluentes contendo corantes, testes com organismos-teste como *Artemia salina* têm sido empregados como alternativa prática e padronizável para indicar efeitos agudos, contribuindo para uma avaliação mais abrangente do desempenho do tratamento além da remoção química do contaminante (ABNT NBR 16530, 2021; Costa et al., 2008).

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo é apresentada de forma esquemática na Figura 1, a qual sintetiza as principais etapas experimentais desenvolvidas, desde a preparação do efluente sintético até a avaliação ecotoxicológica do efluente tratado.

Figura 1 – Esquema representativo da metodologia experimental adotada no estudo.



Fonte: Autores (2026).

De forma geral, o trabalho envolveu a preparação de um efluente sintético contendo o corante azo Acid Black 2 (AB2), a aplicação da oxidação eletroquímica em sistema de batelada com recirculação utilizando eletrodo de diamante dopado com boro (DDB), a otimização das condições operacionais por meio de planejamento experimental do tipo Taguchi, o monitoramento analítico dos parâmetros físico-químicos, a análise cinética da degradação do corante e, por fim, a avaliação ecotoxicológica do efluente antes e após o tratamento.

Preparação do efluente sintético

O efluente sintético utilizado nos experimentos foi preparado a partir do corante azo Acid Black 2 (AB2), amplamente empregado na indústria de curtumes, cuja fórmula química é $C_{22}H_{14}N_6O_9S_2$. O sulfato de sódio (Na_2SO_4) foi utilizado como eletrólito suporte, com o objetivo de aumentar a condutividade elétrica da solução e favorecer a condução do processo eletroquímico. Todas as soluções foram preparadas com água ultrapura, sem tratamento adicional.

O ajuste do potencial hidrogeniônico (pH) das soluções foi realizado conforme as condições experimentais definidas, utilizando-se soluções de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH), ambos em grau analítico. As soluções sintetizadas foram preparadas imediatamente antes da realização dos experimentos, a fim de evitar alterações na composição do efluente.

Sistema eletroquímico e condições operacionais

Os experimentos de oxidação eletroquímica foram conduzidos em regime de batelada com recirculação, utilizando um sistema eletroquímico composto por uma célula de fluxo, um reservatório, uma bomba peristáltica e uma fonte de corrente contínua. A célula eletroquímica foi equipada com um eletrodo de diamante dopado com boro (DDB), utilizado como ânodo, e um eletrodo metálico como cátodo, dispostos de forma paralela e separados por espaçadores confeccionados em Viton® e Teflon®. A área efetiva de superfície do eletrodo DDB foi de 14 cm².

O sistema operou com recirculação contínua da solução a partir de um reservatório de 250 mL, garantindo a homogeneização do efluente durante o tratamento eletroquímico. A corrente elétrica aplicada foi fornecida por uma fonte de alimentação regulável, operando em corrente contínua, conforme os níveis definidos no planejamento experimental. A temperatura da solução foi monitorada ao longo dos experimentos, sem controle externo.

Planejamento experimental

O planejamento experimental foi desenvolvido com base no método de Taguchi, com o objetivo de avaliar a influência dos principais parâmetros operacionais no desempenho do processo de oxidação eletroquímica e otimizar as condições de tratamento. Foi empregada uma matriz ortogonal L25 (5^5), permitindo a avaliação de cinco fatores em cinco níveis distintos, totalizando 25 experimentos.

Os fatores investigados foram: concentração inicial do corante AB2, concentração de eletrólito suporte, densidade de corrente elétrica aplicada, pH da solução e tempo de reação. As respostas analisadas incluíram a remoção do corante AB2, a remoção da demanda química de oxigênio (DQO), a remoção do carbono orgânico total (COT) e o consumo específico de energia.

Os fatores e seus respectivos níveis avaliados no planejamento experimental são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fatores e níveis do planejamento experimental de Taguchi.

Parâmetros	Níveis				
	1	2	3	4	5
Concentração Inicial AB2 (mg L ⁻¹)	30	60	90	120	150
Concentração de eletrólito (M)	0,020	0,035	0,050	0,065	0,080
Densidade de corrente (mA cm ⁻²)	6	9	12	15	18
pH	6	7	8	9	10
Tempo (min)	20	40	60	80	100

Fonte: Autores (2026).

Determinação dos parâmetros físico-químicos

A concentração residual do corante Acid Black 2 (AB2) foi determinada por espectroscopia UV-Vis. Inicialmente, foi realizada uma varredura espectral em soluções padrão do corante, com o objetivo de identificar o comprimento de onda de máxima absorção (λ_{max}). Após a definição do λ_{max} , foi construída uma curva de calibração a partir de soluções padrão preparadas em água ultrapura, a qual foi utilizada para a quantificação do corante ao longo dos experimentos.

As análises de demanda química de oxigênio (DQO), carbono orgânico total (COT), pH, temperatura e condutividade elétrica foram realizadas conforme metodologias padronizadas descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). O pH foi determinado por método potenciométrico, a temperatura por termometria direta e a condutividade elétrica por condutivimetria.

Estudos cinéticos

Os estudos cinéticos foram conduzidos em duas etapas. Na primeira, foram realizados experimentos preliminares com diferentes condições operacionais, com o objetivo de determinar o tempo máximo necessário para a estabilização da concentração do corante durante o processo de degradação eletroquímica. Na segunda etapa, os estudos cinéticos foram realizados utilizando as condições operacionais otimizadas, obtidas a partir da aplicação do método de Taguchi.

A partir dos dados experimentais, foram avaliados modelos cinéticos de ordem zero, primeira ordem e segunda ordem, por meio do ajuste linear das equações correspondentes e da determinação dos coeficientes de correlação (R^2). A constante cinética aparente (k) foi calculada para o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais.

Cálculo das respostas do processo

A eficiência de remoção do corante AB2, da demanda química de oxigênio (DQO) e do carbono orgânico total (COT) foi calculada a partir das concentrações inicial e final de cada parâmetro, conforme a Equação (1):

$$\text{Remoção (\%)} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

em que C_0 é a concentração inicial e C_f é a concentração final do parâmetro avaliado (AB2, DQO ou COT).

O consumo específico de energia (CE), expresso em kWh m⁻³, foi calculado de acordo com Brillas e Martínez-Huitle (2015), conforme a Equação (2):

$$CE = \frac{E_{\text{cell}} \cdot I \cdot t}{V_s} \quad (2)$$

em que CE é o consumo específico de energia (kWh m⁻³), E_{cell} é a tensão média da célula durante a eletrólise (V), I é a corrente aplicada (A), t é o tempo de eletrólise (h) e V_s é o volume da solução tratado (m³).

Ensaio de ecotoxicidade

A avaliação ecotoxicológica foi realizada por meio de ensaio de toxicidade aguda utilizando o microcrustáceo *Artemia salina* como organismo-teste. Os ensaios foram conduzidos de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 16530, que descreve as condições experimentais, o preparo das soluções e os critérios de avaliação da toxicidade.

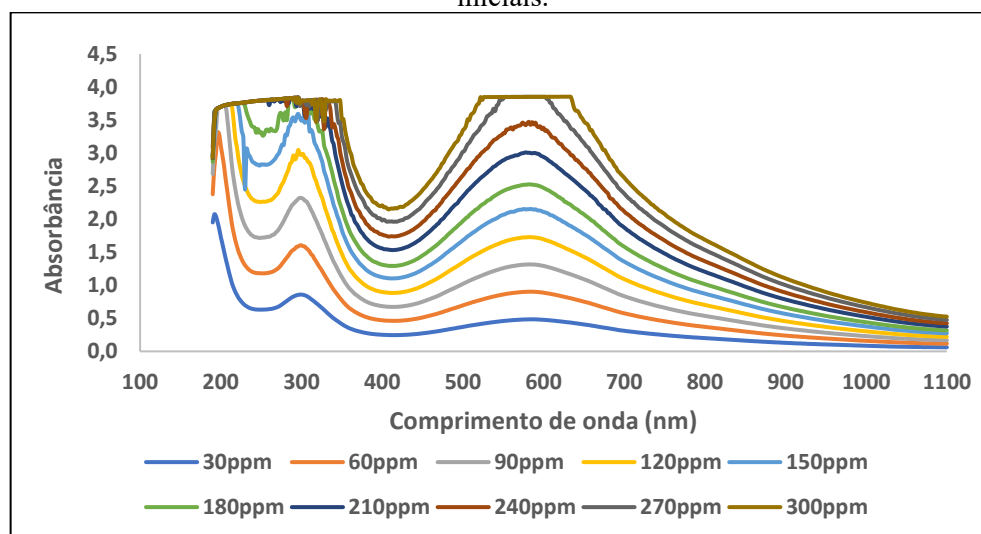
Os testes foram realizados com amostras do efluente antes e após o tratamento eletroquímico, sendo determinada a concentração letal capaz de provocar mortalidade em 50% dos organismos expostos (CL₅₀), após o período de exposição definido pela norma. Os resultados obtidos permitiram avaliar possíveis alterações na toxicidade do efluente decorrentes do processo de oxidação eletroquímica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização espectroscópica do corante Acid Black 2

A caracterização espectroscópica do corante Acid Black 2 foi realizada com o objetivo de identificar o comprimento de onda de máxima absorção (λ_{max}), assegurando maior sensibilidade e confiabilidade na quantificação do corante residual ao longo dos experimentos de oxidação eletroquímica.

Figura 2 – Espectros de absorção UV-Vis do corante Acid Black 2 para diferentes concentrações iniciais.



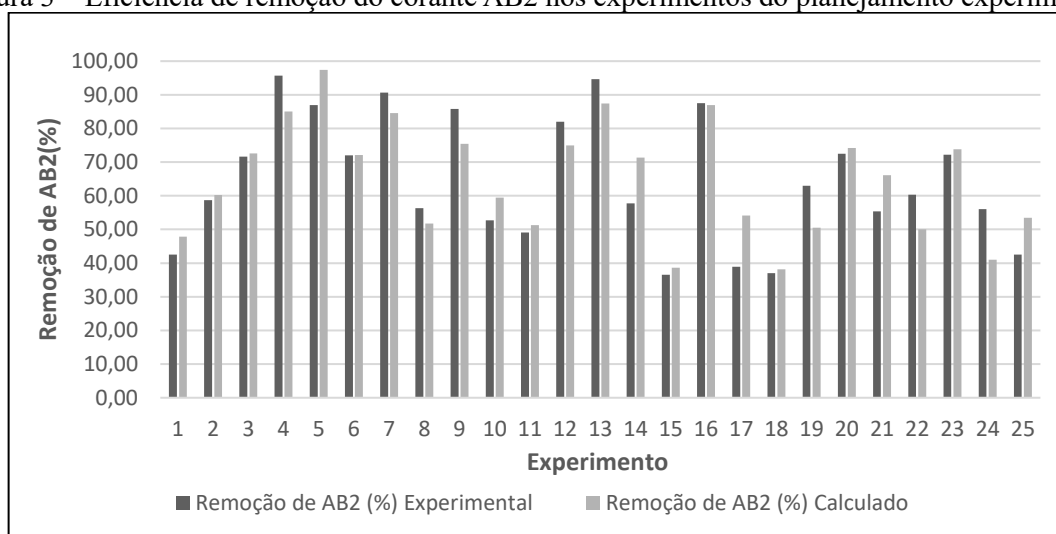
Fonte: Autores (2026).

A partir da varredura espectral, observaram-se dois picos característicos de absorbância, localizados aproximadamente em 300 nm e 584 nm. O comprimento de onda de 300 nm foi selecionado para as análises subsequentes, por apresentar maior intensidade de absorbância e melhor linearidade em relação à concentração do corante. Conforme amplamente reportado na literatura para corantes azo, que apresentam forte absorção na região do ultravioleta próximo, conforme amplamente reportado na literatura.

Remoção do corante Acid Black 2

A eficiência de remoção do corante Acid Black 2 foi avaliada a partir dos experimentos conduzidos segundo o planejamento experimental de Taguchi, considerando diferentes combinações das variáveis operacionais. Essa análise permitiu compreender a influência dos parâmetros de processo sobre a degradação do corante.

Figura 3 – Eficiência de remoção do corante AB2 nos experimentos do planejamento experimental.



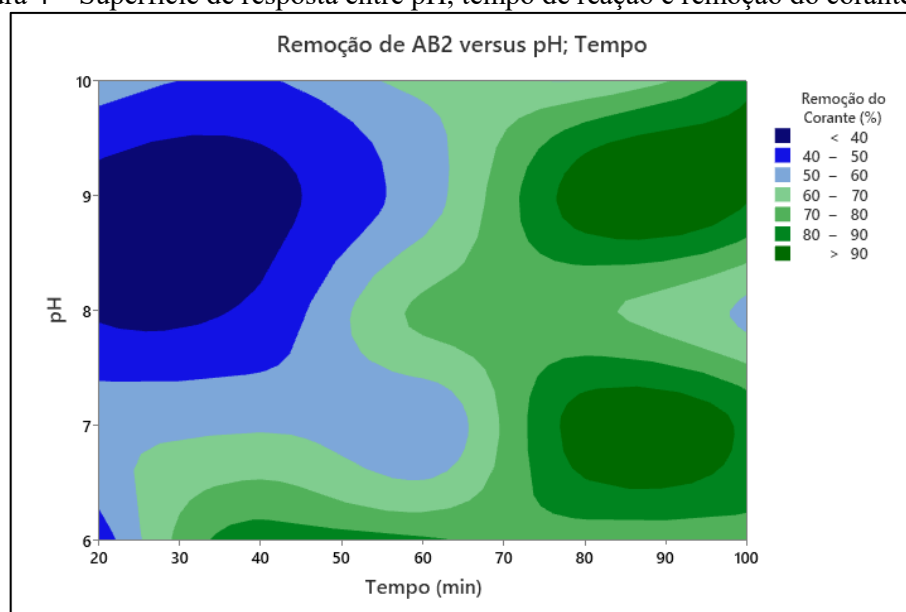
Fonte: Autores (2026).

Os resultados evidenciam elevadas eficiências de remoção, com valores superiores a 85% em diversas condições experimentais e remoções máximas de até 95,7%. Esses resultados confirmam a elevada capacidade do eletrodo de diamante dopado com boro em promover a degradação de compostos orgânicos recalcitrantes, atribuída à intensa geração de radicais hidroxila na superfície anódica.

A análise estatística indicou que o tempo de reação e a densidade de corrente elétrica foram os fatores mais significativos e com efeito positivo sobre a remoção do corante, enquanto a concentração inicial apresentou efeito inversamente proporcional. O pH e a concentração de eletrólito não demonstraram influência estatisticamente significativa dentro da faixa estudada.

A interdependência entre o pH e o tempo de reação sobre a remoção do corante é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Superfície de resposta entre pH, tempo de reação e remoção do corante AB2.



Fonte: Autores (2026).

Observa-se que valores de pH mais baixos favorecem significativamente a degradação do corante, permitindo atingir remoções superiores a 90% em tempos inferiores a 40 minutos. Em contraste, em condições mais alcalinas, tempos consideravelmente maiores são necessários para alcançar a mesma eficiência. Esse comportamento pode ser associado à maior estabilidade dos radicais hidroxila gerados no ânodo DDB em meio ácido, favorecendo os mecanismos de oxidação indireta do corante.

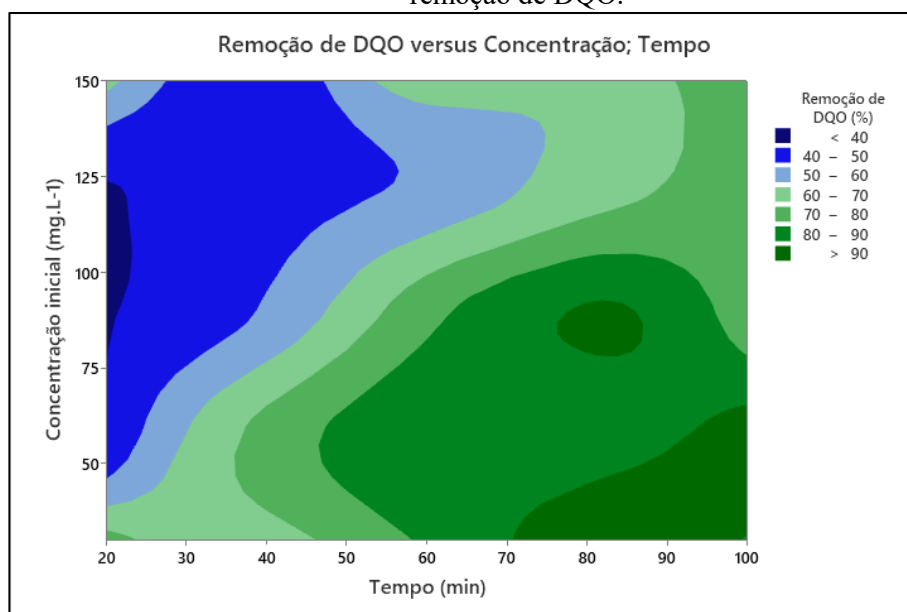
Remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A remoção da demanda química de oxigênio foi utilizada como parâmetro global para avaliar a degradação da carga orgânica do efluente sintético submetido ao tratamento eletroquímico.

De modo geral, observaram-se eficiências de remoção superiores a 85% em diversas condições experimentais, com valores máximos de até 97,4%, indicando elevada eficiência do processo na redução da carga orgânica.

A interdependência entre a concentração inicial do corante e o tempo de reação na remoção de DQO é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Superfície de resposta entre concentração inicial de AB2, tempo de reação e remoção de DQO.



Fonte: Autores (2026).

Observa-se que concentrações iniciais mais elevadas exigem tempos maiores para alcançar altas eficiências de remoção, enquanto concentrações inferiores a aproximadamente 50 mg L⁻¹ possibilitam remoções superiores a 90% em tempos inferiores a 60 minutos. Esse comportamento indica uma limitação cinética do processo em concentrações mais elevadas, possivelmente associada à maior competição por espécies oxidantes geradas no ânodo DDB.

Remoção do Carbono Orgânico Total (COT)

A remoção do carbono orgânico total foi avaliada com o objetivo de verificar o grau de mineralização do efluente sintético após o tratamento eletroquímico.

Os resultados indicaram remoções de COT superiores a 60% na maioria dos experimentos, com valores máximos de aproximadamente 83,6%. A análise estatística revelou

que o tempo de reação e a densidade de corrente elétrica foram os fatores mais significativos para essa resposta, enquanto a concentração inicial, o pH e a concentração de eletrólito não apresentaram influência estatisticamente relevante.

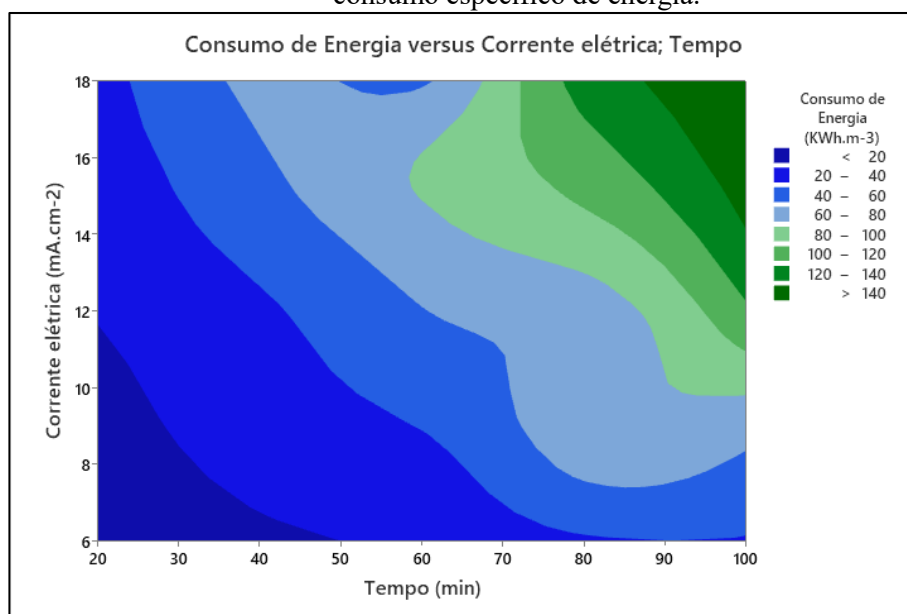
Esses resultados indicam que, embora a remoção de cor e DQO seja elevada, a mineralização completa do efluente demanda condições operacionais mais severas ou tempos de reação mais prolongados, comportamento típico de processos eletroquímicos aplicados à degradação de corantes azo.

Consumo específico de energia

O consumo específico de energia apresentou ampla variação entre os experimentos, refletindo a forte dependência desse parâmetro em relação às condições operacionais adotadas. Foram observados valores inferiores a 20 kWh m⁻³ em condições de baixa densidade de corrente e tempos reduzidos, enquanto consumos superiores a 140 kWh m⁻³ ocorreram em condições mais severas.

A relação entre o consumo específico de energia, a densidade de corrente elétrica e o tempo de reação é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Superfície de resposta entre densidade de corrente elétrica, tempo de reação e consumo específico de energia.



Fonte: Autores (2026).

Observa-se que o aumento simultâneo da densidade de corrente elétrica e do tempo resulta em elevação expressiva do consumo energético. A análise estatística indicou que o tempo de reação e a densidade de corrente elétrica foram os fatores mais influentes sobre o consumo energético, enquanto a concentração inicial apresentou efeito inversamente proporcional. O pH e a concentração de eletrólito não demonstraram influência estatisticamente significativa.

Otimização das condições operacionais por Taguchi e função desejabilidade

A otimização simultânea das respostas remoção de AB2, DQO, COT e consumo específico de energia foi realizada por meio do método de Taguchi associado à função desejabilidade, visando identificar condições operacionais que maximizassem a eficiência global do processo. Ressalta-se que os valores ótimos não correspondem necessariamente aos níveis discretos avaliados, pois foram obtidos a partir da otimização do modelo estatístico ajustado, podendo resultar em valores intermediários dentro do domínio experimental.

Tabela 2 – Condições operacionais e respostas previstas pelo modelo, associadas aos maiores valores de desejabilidade global.

Exp.	Conc. Inicial (mg L ⁻¹)	Eletrólito (M)	Corrente elétrica (mA cm ⁻²)	pH	Tempo (min)
1	30,0	0,020	6,00	6,00	100
2	30,0	0,064	6,00	6,00	96
3	30,0	0,029	6,00	6,00	76
4	30,0	0,020	9,89	6,00	64
5	30,0	0,020	13,90	6,00	63
6	30,0	0,020	9,15	6,00	64
7	69,0	0,031	9,77	6,10	87
8	73,3	0,023	12,66	6,00	80
9	30,0	0,020	6,00	6,00	63
Exp.	Remoção de COT (%)	Remoção de DQO (%)	Consumo de Energia (kWh m ⁻³)	Remoção de AB2 (%)	Desejabilidade
1	76,54	100,00	82,49	83,94	0,7633
2	69,15	100,00	75,33	81,96	0,7431
3	68,54	93,28	56,61	73,02	0,7272
4	69,73	89,43	65,10	74,93	0,7113
5	72,93	90,09	85,61	82,18	0,7089
6	69,04	89,14	60,96	73,43	0,7086
7	71,87	91,03	82,06	79,81	0,7078
8	73,47	88,72	90,17	81,89	0,6924
9	66,25	88,17	43,84	67,28	0,6915

Fonte: Autores (2026).

Observou-se que as condições ótimas tendem a ocorrer em valores mais baixos de pH dentro da faixa experimental, associados a baixas concentrações iniciais de corante e densidades de corrente moderadas. Os valores de desejabilidade foram próximos entre si, indicando robustez do modelo e consistência dos dados, além de reforçar as tendências observadas nas superfícies de resposta.

Com o objetivo de avaliar a confiabilidade do modelo estatístico, foi realizada a comparação entre os valores preditos e os resultados experimentais obtidos nas mesmas condições operacionais.

Tabela 3 – Comparação entre valores preditos e experimentais de remoção de AB2.

Exp.	AB2 Predito (%)	AB2 Experimental (%)
1	83,94	99,14
2	81,96	99,50
3	73,02	89,68
4	74,93	100,00
5	82,18	88,46
6	73,43	96,48
7	79,81	100,00
8	81,89	94,92
9	67,28	64,51

Fonte: Autores (2026).

Observa-se que os valores experimentais de remoção de AB2 foram, em sua maioria, superiores aos preditos pelo modelo, indicando uma tendência de subestimação. Ainda assim, o modelo apresentou boa capacidade de representar as tendências do sistema, evidenciando coerência na influência dos fatores operacionais.

Essa diferença pode ser atribuída à natureza do método de Taguchi, que considera predominantemente os efeitos principais, podendo não capturar integralmente interações e efeitos não lineares entre as variáveis. Além disso, os elevados valores experimentais de remoção reforçam a eficiência do processo na degradação do corante AB2 nas condições avaliadas.

Estudos cinéticos

Os estudos cinéticos foram conduzidos com o objetivo de compreender o mecanismo de degradação do corante Acid Black 2 sob diferentes condições operacionais.

Tabela 4 – Parâmetros cinéticos obtidos para os modelos de ordem zero, primeira e segunda ordem.

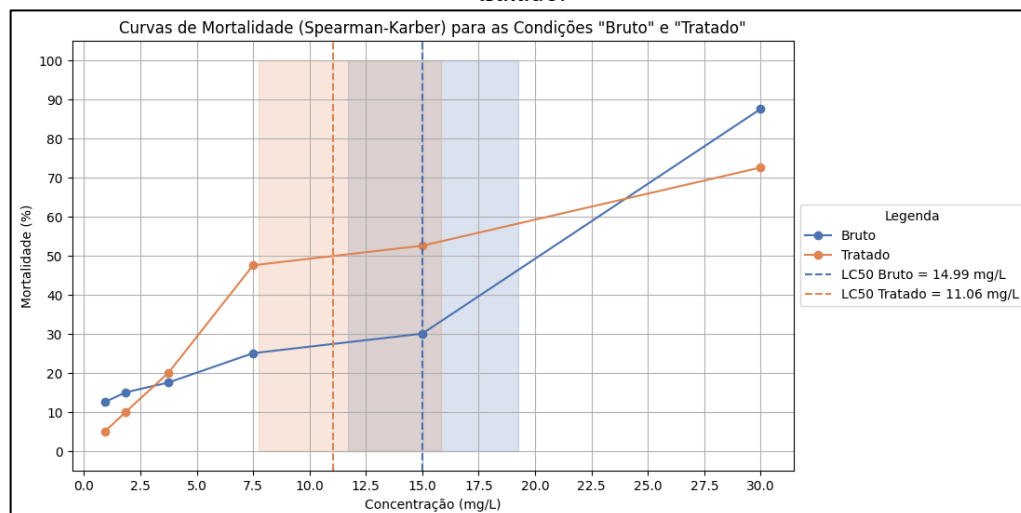
Experimento	Parâmetros	Ordem zero	Primeira ordem	Segunda ordem
CN1	R ²	0,9154	0,9695	0,9944
	k	-0,4739	-0,0063	0,00009
CN2	R ²	0,8359	0,9683	0,9861
	k	-0,9275	-0,0205	0,0006
Validação 01	R ²	0,9480	0,9619	0,6261
	k	-0,2674	-0,0311	0,0066

Fonte: Autores (2026).

Os resultados indicaram que, nas condições iniciais dos experimentos preliminares, a degradação do corante se ajustou predominantemente a um modelo cinético de segunda ordem. Entretanto, sob as condições ótimas determinadas pela função desejabilidade, observou-se melhor ajuste a um modelo de primeira ordem, evidenciando que as condições operacionais exercem influência direta sobre o mecanismo de degradação eletroquímica.

A avaliação ecotoxicológica foi realizada com o objetivo de verificar possíveis efeitos adversos do tratamento eletroquímico sobre a toxicidade do efluente tratado.

Figura 7 – Resultados dos ensaios de toxicidade aguda com *Artemia salina* para o efluente bruto e tratado.



Fonte: Autores (2026).

Os ensaios indicaram que o tratamento eletroquímico com eletrodo de diamante dopado com boro não promoveu aumento estatisticamente significativo da toxicidade do efluente tratado. As concentrações letais médias (CL_{50}) obtidas para o efluente bruto e tratado foram próximas, indicando que o processo não gerou subprodutos mais tóxicos que o efluente original.

No entanto, observa-se que também não houve redução significativa da toxicidade, sugerindo que, embora o tratamento tenha sido eficiente na remoção do corante, a mineralização completa dos compostos responsáveis pela toxicidade não foi alcançada. Esse resultado evidencia uma limitação do processo nas condições avaliadas, indicando a necessidade de etapas complementares de tratamento para redução efetiva da toxicidade.

Adicionalmente, observou-se aumento da temperatura e da condutividade elétrica ao final dos experimentos, fenômeno associado ao efeito Joule e à formação de espécies iônicas durante o processo de oxidação eletroquímica, comportamento típico de sistemas eletroquímicos operando sob corrente contínua.

CONCLUSÃO

Conclui-se que a oxidação eletroquímica utilizando eletrodos de diamante dopado com boro (DDB) constitui uma tecnologia eficiente para a degradação do corante azo Acid Black 2 em efluente sintético de curtume, promovendo elevadas remoções de cor, demanda química de oxigênio (DQO) e carbono orgânico total (COT). Em condições operacionais adequadas, foram alcançadas eficiências superiores a 95% na remoção do corante, evidenciando o elevado potencial oxidativo do sistema eletroquímico baseado em ânodos de DDB.

A aplicação do planejamento experimental de Taguchi associado à função desejabilidade mostrou-se uma ferramenta robusta para a otimização simultânea de múltiplas respostas do processo, permitindo a identificação de condições operacionais que conciliam alta eficiência de remoção com redução do consumo específico de energia. As condições ótimas estiveram predominantemente associadas a valores mais baixos de pH dentro da faixa investigada, além

de baixas concentrações iniciais de corante e densidades de corrente moderadas, em consonância com as tendências observadas nas análises de superfícies de resposta.

A análise estatística indicou que o tempo de reação e a densidade de corrente elétrica foram os fatores mais influentes no desempenho global do processo, afetando tanto as eficiências de remoção quanto o consumo energético. Observou-se ainda que concentrações iniciais de corante superiores a aproximadamente 50 mg L⁻¹ impõem limitações cinéticas ao processo, demandando tempos de reação mais longos para alcançar elevadas remoções, com impacto direto sobre a viabilidade energética do tratamento.

Os estudos cinéticos evidenciaram que o mecanismo de degradação do corante depende das condições operacionais adotadas. Enquanto os experimentos preliminares apresentaram melhor ajuste a um modelo cinético de segunda ordem, as condições otimizadas indicaram comportamento de primeira ordem, sugerindo maior eficiência na utilização das espécies oxidantes geradas no ânodo de DDB e alteração no regime reacional.

A avaliação ecotoxicológica por meio de ensaios com *Artemia salina* indicou que o tratamento eletroquímico não promoveu aumento estatisticamente significativo da toxicidade do efluente tratado. No entanto, também não foi observada redução significativa da toxicidade, sugerindo que, apesar da elevada remoção dos compostos orgânicos, a mineralização completa das espécies responsáveis pelos efeitos tóxicos não foi alcançada. Esse resultado indica a necessidade de etapas complementares de tratamento para efetiva mitigação da toxicidade.

De forma integrada, os resultados confirmam que a oxidação eletroquímica com eletrodos de diamante dopado com boro, aliada a ferramentas estatísticas de otimização, representa uma alternativa promissora e eficiente para o tratamento avançado de efluentes contendo corantes recalcitrantes, especialmente como etapa complementar em sistemas que demandam elevado desempenho de remoção aliado ao controle do consumo energético.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 16530: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade aguda — Método de ensaio com *Artemia salina*. Rio de Janeiro, 2021.

ALFARO, M. A. Q. FERRO, S. MARTÍNEZ-HUITLE, C. VONG, Y. M. Boron doped diamond electrode for the wastewater treatment. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 17, n. 2, p. 227–236, 2006. DOI: 10.1590/S0103-50532006000200003.

ALI, N. S. KHADER, E. H. KHUDHUR, R. H. ABDULRAHMAN, M. A. SALIH, I. K. ALBAYATI, T. M. Removal of anionic azo dye from wastewater using Fe₃O₄ magnetic nanoparticles adsorbents in a batch system. *Desalination and Water Treatment*, v. 317, p. 100033, 2024. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100033.

ANDREOZZI, R. CAPRIO, V. INSOLA, A. MAROTTA, R. SANCHIRICO, R. Advanced oxidation processes for the treatment of mineral oil-contaminated wastewaters. *Water Research*, v. 34, n. 2, p. 620–628, 2000. DOI: 10.1016/S0043-1354(99)00169-4.

APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington, DC, 2017.

ASMUSSEN, R. M. TIAN, M. CHEN, A. A new approach to wastewater remediation based on bifunctional electrodes. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 13, p. 5100–5105, 2009. DOI: 10.1021/es900582m.

BENKHAYA, S. M'RABET, S. EL HARFI, A. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, v. 115, p. 107891, 2020. DOI: 10.1016/j.inoche.2020.107891.

BRENTANO, D. M. Desenvolvimento e aplicação do teste de toxicidade aguda utilizando como organismo-teste *Daphnia magna*. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CAMPOS, M. HUSSAIN, S. KHAN, H. FRANÇA, A. S. GONÇALVES, F. V. OLIVEIRA, K. R. F. SILVA, J. B. IDE, C. N. Electro-oxidation: an effective alternative for the degradation of textile dyes and reduction of toxicity in industrial effluents. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 17, n. 6, e03429, 2023. DOI: 10.24857/rgsa.v17n6-030.

CENTRO DAS INDÚSTRIAS DE CURTUMES DO BRASIL (CICB). Dados do setor. Disponível em: <http://www.cicb.org.br>. Acesso em: 20 dez. 2023.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, v. 38, n. 1, p. 11–41, 2004. DOI: 10.1016/j.seppur.2003.10.006.

CHEN, W. LI, W. LIU, F. MIAO, D. MA, L. GAO, X. WEI, Q. ZHOU, K. YU, Z. YU, Y. Microstructure of boron doped diamond electrodes and studies on its basic electrochemical characteristics and applicability of dye degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 5, p. 104348, 2020. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104348.

CHO, J. S. LEE, D. H. SEO, G. J. KIM, D. B. SHIN, S. J. Optimizing the mean and variance of bead geometry in the wire + arc additive manufacturing using a desirability function method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 120, n. 11–12, p. 7771–7783, 2022. DOI: 10.1007/s00170-022-09237-6.

COSTA, C. R. BOTTA, C. M. R. ESPINDOLA, E. L. G. OLIVI, P. Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA® electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, v. 153, n. 1–2, p. 616–627, 2008. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.005.

CUNHA, B. M. D. Avaliação ecotoxicológica de distintos tipos de efluentes mediante ensaios de toxicidade aguda utilizando *Artemia salina* e *Lactuca sativa*. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DANG, V. L. KIEU, T. T. NGUYEN, T. T. T. TRUONG, T. T. T. HOANG, D. T. VU, T. L. C. NGUYEN, T. M. T. LE, T. S. DOAN, T. H. Y. PHAM, T. D. Surface modification of zeolite by cationic surfactant and the application on adsorptive removal of azo dye Ponceau 4R. *Journal of Molecular Structure*, v. 1304, p. 137619, 2024. DOI: 10.1016/j.molstruc.2024.137619.

DERRINGER, G. SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980. DOI: 10.1080/00224065.1980.11980968.

GOLDSTEIN, E. G. ZAGOTTO, P. A. ARAUJO, R. P. A. BERTOLETTI, E. Avaliação da toxicidade de despejos industriais por ensaios biológicos. *Revista DAE*, v. 132, p. 42–47, 1983.

HAMZA, M. ABDELHEDI, R. BRILLAS, E. SIRÉS, I. Comparative electrochemical degradation of the triphenylmethane dye Methyl Violet with boron-doped diamond and Pt anodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v. 627, n. 1–2, p. 41–50, 2009. DOI: 10.1016/j.jelechem.2008.12.017.

HASSAAN, M. A. EL NEMR, A. Advanced oxidation processes for textile wastewater treatment. *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, v. 2, n. 3, p. 85–93, 2017. DOI: 10.11648/j.ijpp.20170203.13.

KEMPTHORNE, O. *The Design and Analysis of Experiments*. New York: Wiley, 1983.

KIEU, T. T. et al. Surface modification of zeolite for azo dye removal. *Journal of Molecular Structure*, v. 1304, p. 137619, 2024.

LAMY, L. Aplicativo computacional para a função perda de qualidade, razão sinal-ruído e análise experimental de Taguchi. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, 2018.

LITTER, M. I. (2020). Introduction to oxidative technologies for water treatment. *Advanced Nano-Bio Technologies for Water and Soil Treatment*, 119-175.

MARTÍNEZ-HUITLE, C. A.; BRILLAS, Decontamination of Wastewaters Containing Synthetic Organic Dyes by Electrochemical Methods: A General Review. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 87, n. 3–4, p. 105–145, 2009. DOI: 10.1016/j.apcatb.2008.09.017.

MEHAT, N. M.; KAMARUDDIN, S. Quality control and design optimization using Taguchi method: A comprehensive review. *International Journal of Plastics Technology*, v. 16, p. 194–209, 2012. DOI: 10.1007/s12588-012-9037-1.

MELLA, B.; GLANERT, A. C.; GUTTERRES, M. Removal of chromium from tanning wastewater and its reuse. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 95, p. 195–201, 2015. DOI: 10.1016/j.psep.2015.03.007.

MOHAN, N.; BALASUBRAMANIAN, N.; SUBRAMANIAN, V. Electrochemical treatment of simulated textile effluent. *Chemical Engineering & Technology*, v. 24, n. 7, p. 749–753, 2001. DOI: 10.1002/1521-4125(200107)24:7%3C749::AID-CEAT749%3E3.0.CO;2-Y.

MOTA, I. G. C. et al. Artificial dyes: health risks and regulatory needs. *Food Reviews International*, v. 39, n. 3, p. 1578–1593, 2023. DOI: 10.1080/87559129.2021.1934694.

MUTLU, M. M. Determination of metal load in leathers dyed with metal-complex dyes. *Journal of Hazardous Materials*, 2009.

PASCOAL, S. D. A. et al. Aplicação de radiação UV no tratamento fotocatalítico de efluentes de curtume. *Química Nova*, v. 30, p. 1082–1087, 2007. 10.1590/S0100-40422007000500006.

ROY, R. K. Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 steps to product and process improvement. New York: Wiley, 2001. ISBN: 0-471-36101-1.

SELVI, A. T.; ARAVINDHAN, R.; MADHAN, B.; RAO, J. R. Studies on the application of natural dye extract from *Bixa orellana* seeds for dyeing and finishing of leather. *Industrial Crops and Products*, v. 43, p. 84–86, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.07.015.

SHARMA, V.; SHARMA, J. K.; KANSAY, V.; SHARMA, V. D.; SHARMA, A.; KUMAR, S.; SHARMA, A. K.; BERA, M. K. The effect of calcination temperatures on the structural and optical properties of zinc oxide nanoparticles and their influence on the photocatalytic degradation of leather dye. *Chemical Physics Impact*, v. 6, p. 100196, 2023. DOI: 10.1016/j.chphi.2023.100196.

SRIVASTAVA, R.; SOFI, I. R. Impact of synthetic dyes on health and environment. In: *Impact of Textile Dyes on Public Health and the Environment*. Hershey: IGI Global, 2020. p. 146–161. DOI: 10.4018/978-1-7998-0311-9.ch007.

TAGUCHI, G. Introduction to Quality Engineering. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.

TAGUCHI, G. System of experimental design: Engineering methods to optimize quality and minimize costs. New York: UNIPUB/Kraus International, 1987.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. Taguchi's Quality Engineering Handbook. Hoboken: Wiley, 2005. DOI: 10.1002/9780470258354.

TKACZYK, A.; MITROWSKA, K.; POSYNIK, A. S. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of the Total Environment*, v. 717, p. 137222, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137222.

TRUHAUT, R. Ecotoxicology: objectives, principles and perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 1, n. 2, p. 151–173, 1977. DOI: 10.1016/0147-6513(77)90033-1.

VASCONCELOS, V. M. Degradação eletroquímica/química dos corantes têxteis Reativo Azul 19 e Reativo Preto 5 utilizando eletrodos de diamante dopado com boro e H₂O₂ eletrogerado em eletrodo de carbono vítreo reticulado. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. DOI: 10.11606/T.75.2015.tde-25112015-092817.

VAZQUEZ-ORTEGA, F.; LAGUNES, I.; TRIGOS, A. Cosmetic dyes as potential photosensitizers of singlet oxygen generation. *Dyes and Pigments*, v. 176, p. 108248, 2020. DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108248.

VEROLI, A. B. Estudo da Eletro-oxidação do Paracetamol Utilizando Um Reator Eletroquímico em Fluxo com Eletrodo de Diamante Dopado com Boro. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2017.

WAN, J.; LIU, B.; JIN, C.; LI, J.; WEI, X.; DONG, H.; XU, Z.; GAO, M.; ZHAO, Y. Electrochemical Oxidation of Acid Black 2 Dye Wastewater Using Boron-Doped Diamond Anodes: Multiresponse Optimization and Degradation Mechanisms. *Environmental Engineering Science*, v. 36, n. 9, p. 1049–1060, 2019. DOI: 10.1089/ees.2019.0004.

WOISETSCHLÄGER, D.; HUMPL, B.; KONCAR, M.; SIEBENHOFER, M. Electrochemical oxidation of wastewater – opportunities and drawbacks. *Water Science and Technology*, v. 68, n. 5, p. 1173–1179, 2013. DOI: 10.2166/wst.2013.366.