

EMPREGO DE OXIDAÇÃO ANÓDICA NO ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DA MISTURA DE CORANTES ALIMENTÍCIOS AMARELO CREPÚSCULO E ROXO AÇAÍ

USE OF ANODIC OXIDATION IN THE STUDY OF DEGRADATION OF THE FOOD COLORING MIXTURE TWILIGHT YELLOW AND AÇAÍ PURPLE

DOI: 10.65747/conali2025v3c35

Lívia Barros Silva¹; Eccilha Franciely Gadelha Seabra de Lima²; Alex Leandro Andrade de Lucena³; Vanessa de Oliveira Marques Cavalcanti⁴; Marta Maria Duarte⁵; Daniella Carla Napoleão⁶.

¹Estudante do Curso de Engenharia de Alimentos - DEQ - UFPE; ²Estudante do Curso de Engenharia de Alimentos - DEQ - UFPE; ³Doutor em Engenharia Química, UFPE; ⁴Doutoranda pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Química, UFPE; ⁵Docente em Engenharia Química, UFPE; ⁶Docente em Engenharia Química, UFPE.

Contato: livia.barros@ufpe.br

Resumo: O crescimento urbano e industrial intensifica a poluição hídrica por efluentes contendo poluentes orgânicos persistentes (POP), como os corantes utilizados na indústria alimentícia, que possuem toxicidade e a baixa biodegradabilidade. Dessa forma, faz-se necessário a utilização de técnicas eficazes para o tratamento de efluentes que contém esses tipos de contaminantes. Desse modo, esse estudo visa tratar uma mistura de corantes alimentícios (amarelo crepúsculo e roxo-açaí) em solução aquosa pelo processo eletroquímico de oxidação anódica empregando o par de eletrodos de grafite (cátodo) e cobre (ânodo) e KCl como eletrólito. Parâmetros como voltagem, concentração de eletrólito e distância entre eletrodos foram investigados sequencialmente em tratamentos de 60 min. A quantificação foi feita por espectrofotometria de absorção molecular na região do UV/Vis, e os resultados avaliados pelo percentual de degradação. Além disso, os dados experimentais foram ajustados ao modelo cinético proposto por Chan e Chu. A partir dos resultados, observou-se que o processo de oxidação anódica conseguiu promover a degradação dos compostos, através de uma cinética de degradação de pseudo-primeira ordem.

Palavras-chave: estudo cinético; poluentes orgânicos persistentes (POP); oxidação anódica;

Abstract: Urban and industrial growth intensifies water pollution from effluents containing persistent organic pollutants (POPs), such as dyes used in the food industry, which present toxicity and low biodegradability. Therefore, it is necessary to use effective techniques for the treatment of effluents containing these types of contaminants. In this context, this study aims to treat a mixture of food dyes (Sunset Yellow and Açai Purple) in aqueous solution through the electrochemical process of anodic oxidation, using a graphite (cathode) and copper (anode) electrode pair, with KCl as the electrolyte. Parameters such as voltage, electrolyte concentration, and distance between electrodes were investigated sequentially in 60-minute treatments. Quantification was performed by molecular absorption spectrophotometry in the UV/Vis region, and the results were evaluated by degradation percentage. Furthermore, the experimental data were fitted to the kinetic model proposed by Chan and Chu. Based on the results, it was observed that the anodic oxidation process was able to promote the degradation of the compounds, following pseudo-first-order degradation kinetics.

Keywords: kinetic study; persistent organic pollutants (POPs); anodic oxidation;

INTRODUÇÃO

Desde a primeira revolução industrial, o crescimento urbano e populacional aumentou a demanda por água e a geração de efluentes, pressionando tanto a disponibilidade quanto a qualidade dos recursos hídricos globais. Fatores socioeconômicos, como expansão industrial e infraestrutura sanitária insuficiente, intensificam o lançamento de poluentes em rios e lagos, comprometendo seu uso para consumo, irrigação e preservação de ecossistemas. Esse cenário evidencia a necessidade urgente de estratégias de controle de poluição e de gestão sustentável dos recursos hídricos (1, 2).

Dentro desse contexto, existe uma preocupação relacionada com a grande geração de águas residuárias advindas de atividades industriais. Em especial, resíduos gerados pelo setor alimentício, caracterizados pelo alto volume e teor de carga orgânica, além da presença de corantes sintéticos cuja descarga sem o tratamento adequado aumenta a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e libera compostos tóxicos, resultando na diminuição do oxigênio dissolvido e no desequilíbrio dos ecossistemas aquáticos (3).

A produção de corantes sintéticos atinge hoje mais de um milhão de toneladas anuais, com mais de 100 000 compostos já descritos, dos quais menos da metade é biodegradável e solúvel, enquanto o restante persiste no ambiente aquático pela sua toxicidade e resistência à degradação. Esses corantes fazem parte dos Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) e são amplamente usados não só na indústria de alimentos, mas também na têxtil, farmacêutica e cosmética, o que eleva o risco de contaminação de águas residuárias e reforça a urgência de tratamentos avançados capazes de remover esses compostos refratários (4).

Além dos riscos ecológicos, como aumento da DBO e desequilíbrio dos ecossistemas, o uso crescente de corantes alimentícios está associado a efeitos adversos à saúde humana (distúrbios gástricos, reações alérgicas, problemas respiratórios e potencial carcinogênico). No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/1997) e as resoluções CONAMA 357/2005 e CONAMA 430/2011 estabelecem diretrizes para a qualidade da água e padrões de lançamento de efluentes, visando garantir que essas substâncias sejam lançadas nos corpos receptores somente após tratamento conforme os critérios legais (5, 6).

Considerando que parte significativa desses corantes é tratada em estações convencionais de tratamento de efluentes, por métodos físico, químicos ou biológicos insuficientes para a degradação completa de poluentes orgânicos persistentes. Se faz necessário buscar alternativas mais eficazes para tal, entre as existentes se destacam os processos oxidativos avançados (POA), especialmente os eletroquímicos (POAE) (7, 8).

Os processos oxidativos avançados (POA) englobam tratamentos físico-químicos que geram espécies altamente reativas de oxigênio *in situ*, em especial os radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), a

partir da combinação da presença de radiação ultravioleta, catalisadores e H₂O₂. Estes radicais reagem de forma não-seletiva com múltiplos tipos de poluentes orgânicos persistentes, sendo capazes de promover a degradação e mineralização destes (9).

Nos POA eletroquímicos, como a oxidação anódica e o processo eletro-Fenton, essa formação de oxidantes ocorre diretamente na superfície ou na interface de contato entre os eletrodos presentes e a solução em tratamento. Diferentemente dos POA convencionais, não há a necessidade de suprimento contínuo de reagentes, além de possibilitarem o controle preciso de variáveis como tensão, densidade de corrente, pH, o que as torna especialmente adequadas para efluentes industriais refratários (10).

Na oxidação anódica, a degradação de poluentes ocorre diretamente na superfície do ânodo, onde a aplicação de um potencial elétrico suficiente gera os radicais hidroxila (\bullet OH) a partir da água e de espécies presentes no eletrólito. O controle de parâmetros como a voltagem, a densidade de corrente, do potencial aplicado e da composição do eletrólito é essencial para otimizar o rendimento de mineralização sem a necessidade de reagentes químicos externos (11, 12).

Fatores como o tipo de eletrodo e de eletrólito utilizados no processo também são fundamentais para o seu rendimento. Eletrodos de grafite são amplamente utilizados para oxidação anódica devido às suas propriedades físico-químicas favoráveis, como boa condutividade elétrica, alta estabilidade química em ambientes oxidantes e custo relativamente baixo. Sua estrutura lamelar facilita a transferência de carga e a adsorção de espécies orgânicas na superfície, o que pode favorecer tanto reações diretas quanto a geração de oxidantes indiretos no meio, sendo eficazes na degradação de poluentes orgânicos persistentes, como corantes sintéticos (13).

Além disso, quando combinados com eletrólitos contendo cloretos (como o KCl), os eletrodos de grafite contribuem para a formação de oxidantes secundários, como ácido hipocloroso e íons hipoclorito, conforme Equações de 1 a 7, que complementam a ação direta da oxidação eletroquímica.





Contudo, é importante observar que o grafite pode sofrer desgaste ao longo do tempo, especialmente em processos prolongados ou sob alta densidade de corrente, o que limita sua vida útil em alguns sistemas. Ainda assim, seu uso se mantém popular em aplicações laboratoriais e em tratamentos de baixo custo devido à sua versatilidade e eficiência comprovada (13, 14).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo tratar a mistura aquosa de 2 corantes alimentícios, o amarelo crepúsculo (AC, $\text{C}_{16}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_7\text{S}_2$), corante do tipo azo com coloração amarela-alaranjada e o roxo-açaí, mistura composta pelos corantes vermelho bordeaux (VB, $\text{C}_{20}\text{H}_{15}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_7$) e azul brilhante (AB, $\text{C}_{37}\text{H}_{34}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_9\text{S}_3$), utilizando o processo de oxidação anódica.

MATERIAIS E MÉTODOS

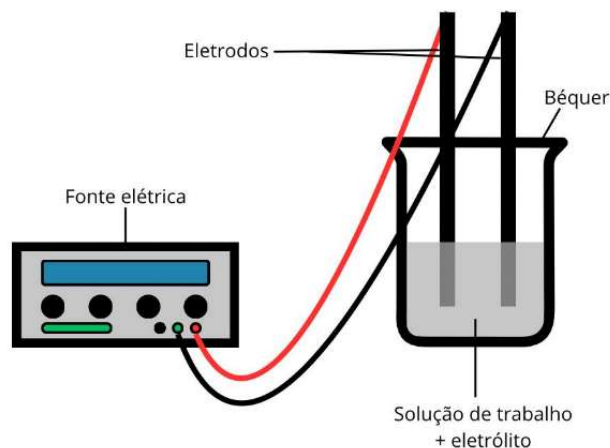
Solução de trabalho

Para a realização das análises dos analitos estudados neste trabalho, foi preparada uma solução aquosa a partir da mistura dos corantes alimentícios amarelo-crepúsculo (AC) e roxo-açaí (RA) a uma concentração de 10 mg.L^{-1} de cada. Em seguida, foi feita uma varredura espectral em um espectrofotômetro de absorção molecular na região do ultravioleta/visível (UV/Vis) (*Thermo Scientific*) de 200 a 800 nm afim de determinar os comprimentos de onda associados à mistura em estudo. Posteriormente, foram construídas curvas analíticas com faixa linear de 1 a 15 mg.L^{-1} .

Estudo de degradação

Foi utilizado um sistema eletroquímico composto por um béquer com capacidade de 200 mL, uma fonte de alimentação (Manipa) e eletrodos de grafite (cátodo) e cobre (ânodo), conforme demonstrado na Figura 1. Além disso, foi utilizado como eletrólito, o cloreto de potássio, KCl.

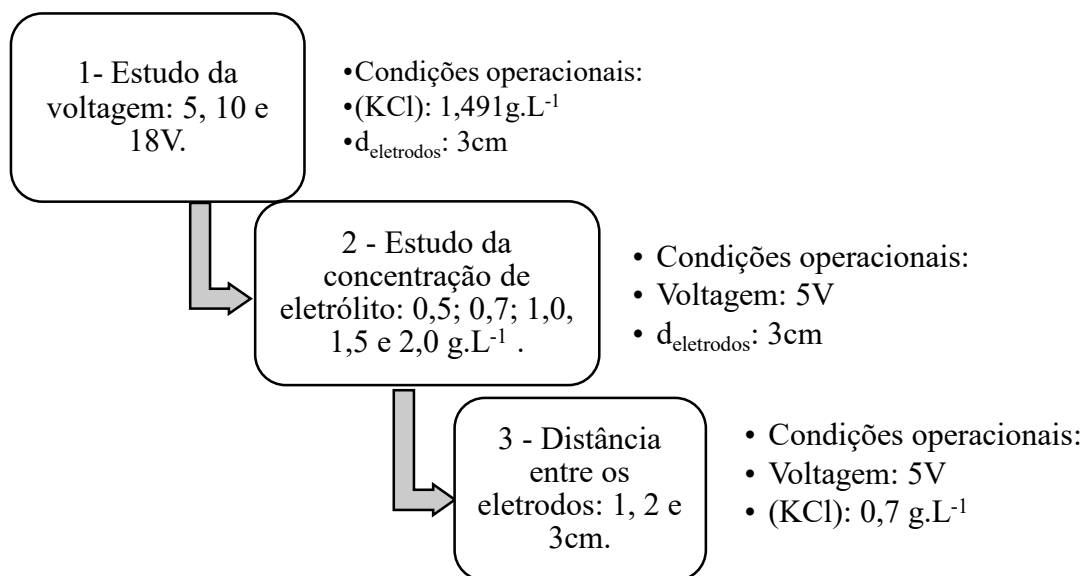
Figura 1 – Esquema do sistema eletroquímico de oxidação anódica.



Fonte: os Autores (2025).

De modo a obter a melhor condição de trabalho, diferentes parâmetros operacionais foram estudados de forma sequencial, Figura 2, sendo eles: voltagem, concentração de eletrólito e distância entre os eletrodos. O tratamento foi realizado por um período de 60 min, após o qual foi realizada a quantificação via espectrofotometria de ultravioleta/visível. Por fim, os dados experimentais foram avaliados por meio do percentual de degradação.

Figura 2 – Esquema da sequência dos parâmetros operacionais estudados.



Fonte: os Autores (2025).

Estudo da cinética de degradação

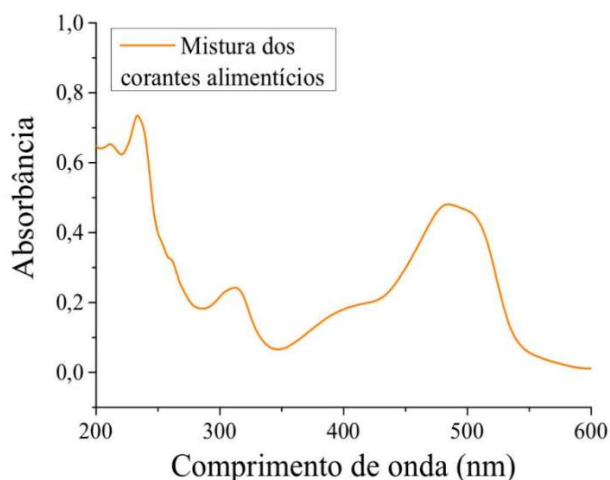
Definidas as melhores condições para cada variável estudada, procedeu-se com a avaliação cinética da degradação dos corantes via oxidação anódica. Para isso, foi feito um acompanhamento cinético com retiradas de alíquotas de 5 mL nos tempos de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150 e 180 min. Os dados experimentais foram avaliados quanto ao ajuste ao modelo cinético proposto por Chan e Chu (15).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Solução de trabalho

Para avaliar os comprimentos de onda característicos da mistura aquosa dos corantes alimentícios foi realizada uma varredura espectral entre 200 nm e 800 nm. O espectro obtido, revelou a presença de três comprimentos de onda característicos (λ), 234, 312 e 484 nm, como pode ser verificado na Figura 3.

Figura 3 – Espectro de absorção da mistura dos corantes amarelo crepúsculo e roxo açai.



Fonte: os Autores (2025).

Conforme apresentado na Figura 3, verifica-se os picos de 234 e 312nm na região do ultravioleta e 484nm na região do visível. Dessa forma, os picos na região do ultravioleta estão relacionados aos anéis aromáticos presentes nos corantes e o pico na região do visível relacionam-se com os grupos cromóforos presentes na molécula do corante. A importância do acompanhamento desses picos de comprimento de onda relaciona-se a verificação de quebra dessas moléculas e a degradação desses compostos durante o experimento. Além disso, também foram elaboradas as curvas analíticas referentes aos comprimentos de onda (λ) detectados, assim

foi aferido através do coeficiente linear, r , a linearidade do método, estando dessa forma, de acordo com as exigências previstas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária conforme a Resolução da diretoria colegiado (RDC) nº 166 de 2017.

Estudo de degradação

No estudo da degradação da mistura aquosa dos corantes foi avaliado a contribuição da voltagem no sistema eletroquímico. Foram avaliadas três diferentes voltagens, 5V, 10V e 18V, a fim de verificar a mais eficiente para degradação da mistura de corantes. Os resultados para a análise das voltagens estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Efeito da voltagem do sistema na degradação da mistura de corantes após 60 min de tratamento por oxidação. Condições experimentais: 3 cm de distância entre os eletrodos, 1,0 cm de profundidade (grafite) e 2,75 cm (cobre), 200 mL de volume da solução e 10 mg.L^{-1} de concentração inicial dos corantes.

Voltagem (V)	Degradação (%)		
	234 nm	312 nm	484 nm
18	55,33	34,74	99,65
10	47,62	53,77	99,57
5	68,40	57,81	99,27

Fonte: Autores, 2025

Conforme apresentado na Tabela 1, os valores percentuais para a degradação da mistura de corantes não apresentaram diferença significativa para o comprimento de onda de 484 nm ao se alterar a voltagem do sistema. Porém, o mesmo não foi identificado para 234 nm e 312 nm, com 5V apresentando os maiores valores de degradação.

Isso ocorreu tendo em vista que a 5V, existe energia suficiente no sistema para a geração de espécies oxidantes, como os radicais hidroxila, ($\bullet\text{OH}$), promovendo a degradação da solução aquosa dos corantes. Porém ao se fornecer quantidades maiores de energia, aumentando a voltagem, se ultrapassa excessivamente do potencial padrão de oxidação da água, 1,23V, causando eletrólise excessiva da água, o que libera O_2 no ânodo e H_2 no cátodo a partir de reações paralelas, reduzindo a disponibilidade de radicais hidroxila no sistema de forma a reagir com a mistura de corantes os degradando (16).

Já a ausência de variação na degradação observada em 484 nm está relacionada à alta suscetibilidade dos cromóforos à ação dos radicais hidroxila. Estes conseguem atacar com eficácia as ligações azo ($-\text{N}=\text{N}-$), comuns em corantes visíveis com absorvância em torno de 480–500 nm, promovendo degradação rápida e quase completa, mesmo sob voltagens mais baixas. Consequentemente, pequenas variações de tensão não alteram significativamente os valores de remoção, já que a degradação já ocorre com alta eficiência desde estágios iniciais (17, 18).

Em seguida foi realizado o estudo da massa adequada de eletrólito, isso porque o eletrólito contribui diretamente na mediação e condutividade elétrica da solução, levando a presença de íons

no sistema. O sal utilizado nesse estudo foi o KCl, sal esse que não contribui diretamente na degradação da mistura de corantes, mas que auxiliou na melhora do fluxo de corrente sob uma menor resistência, facilitando o transporte de carga e o K^+ tem papel de manter a estabilização da solução eletrolítica. Os resultados desta etapa estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 – Efeito da concentração de eletrólito no sistema na degradação da mistura de corantes após 60 min de tratamento por oxidação. Condições experimentais: 5 V de voltagem, 3 cm de distância entre os eletrodos, 1,0 cm de profundidade (grafite) e 2,75 cm (cobre), 200 mL de volume da solução e 10 mg.L^{-1} de concentração inicial dos corantes.

Concentração de eletrólito (g.L^{-1})	Degradação (%)		
	234 nm	312 nm	484 nm
0,5	22,60	37,39	52,72
0,7	40,21	65,34	86,62
1,0	33,55	45,32	66,72
1,5	38,50	61,24	81,16
2,0	34,13	53,54	72,29

Fonte: Autores, 2025

Da Tabela 2 nota-se que a concentração de $0,7 \text{ g.L}^{-1}$ de KCl proporcionou os melhores resultados de degradação em todos os comprimentos de onda analisados. Esse comportamento pode ser atribuído a uma condutividade elétrica ótima, que promove maior eficiência na geração de espécies oxidantes, como os radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) e espécies de cloro ativo (Cl_2 , HOCl), sem provocar efeitos colaterais indesejados (19).

Em concentrações menores, como $0,5 \text{ g.L}^{-1}$, a baixa disponibilidade iônica limita a transferência energética do sistema e conseqüentemente a geração dos radicais hidroxila. Por outro lado, concentrações mais elevadas, $\geq 1,0 \text{ g.L}^{-1}$, não necessariamente favorecem o processo, como observado na Tabela 2. Estas podem levar a um aumento excessivo da densidade iônica, favorecendo reações paralelas e a formação de espécies secundárias menos seletivas que o $\bullet\text{OH}$, o que reduz a eficiência do processo. Estes resultados são coerentes com outros estudos que apontam a existência de uma concentração ótima do eletrólito para maximizar a eficiência da degradação em sistemas de oxidação eletroquímica (20, 21)

Estabelecidas a voltagem e a massa adequadas para a eficiência do sistema, foi avaliada também a influência da distância entre os eletrodos, sendo eles o par cátodo-ânodo composto por grafite-cobre. Esses eletrodos foram utilizados para degradação da mistura aquosa de corantes devido a viabilidade econômica, disponibilidade, inércia química e atoxicidade, além de exibir alto potencial de evolução para H_2 e baixa atividade catalítica para decomposição de H_2O_2 . Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Efeito da distância entre os eletrodos no sistema na degradação da mistura de corantes após 60 min de tratamento por oxidação. Condições experimentais: 5 V de voltagem, 0,7 g.L⁻¹ de KCl, 1,0 cm de profundidade (grafite) e 2,75 cm (cobre), 200 mL de volume da solução e 10 mg.L⁻¹ de concentração inicial dos corantes.

Distância entre os eletrodos (cm)	Degradação (%)		
	234 nm	312 nm	484 nm
1,0	47,44	79,39	88,08
2,0	35,10	55,23	72,02
3,0	41,20	65,52	86,65

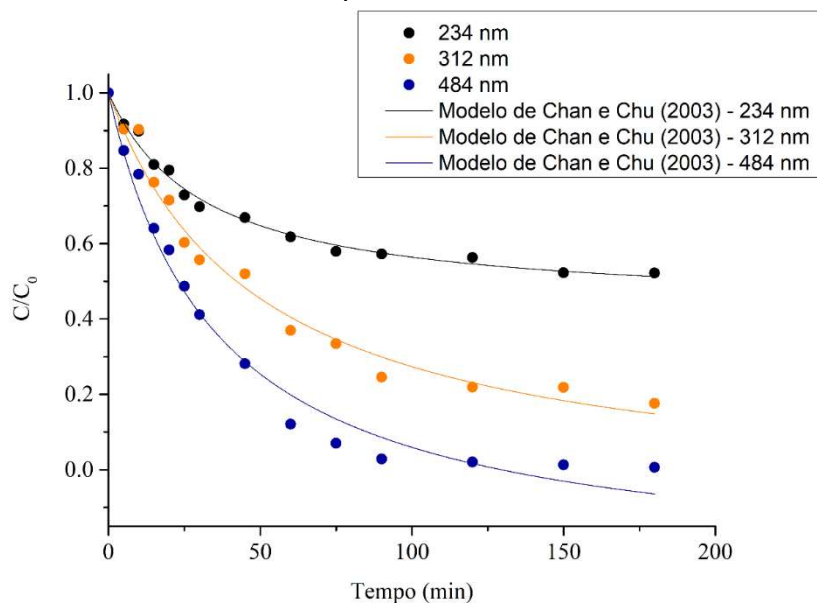
Fonte: Autores, 2025

Analisando a Tabela 3, percebe-se que entre as medidas estudadas, a distância de 1,0 cm entre os eletrodos foi a mais eficiente na degradação da mistura de corantes, apresentando valores significativos para os picos de comprimento de onda estudados. Resultado semelhante foi observado por Thor *et al.* (22) que avaliaram a distância e a configuração dos eletrodos para tratamento de corantes. Os autores, notaram que o aumento da degradação de cor ocorreu com a diminuição da distância entre os eletrodos. O aumento da distância entre os eletrodos pode ter promovido uma restrição na transferência de massa de H⁺ entre os eletrodos, ou seja, quando a distância entre os eletrodos é menor, os prótons produzidos na área anódica durante a oxidação percorrem uma distância menor para atingir o cátodo e garantir a redução do oxigênio, e assim gerar H₂O₂. Por outro lado, se a distância for grande, a transferência dos prótons é atrasada, aumentando eventualmente a resistência interna devido a disponibilidade mais lenta de prótons e consequentemente, diminuindo a eficiência do processo (23).

Estudo da cinética de degradação

De posse das condições operacionais que proporcionaram as maiores eficiências de degradação, foi realizado um estudo cinético, aumentando o tempo de degradação até 180 min. Os dados de degradação obtidos para os três comprimentos de onda estudados foram avaliados frente ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem proposto por Chan e Chu (15), conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Cinética de degradação da solução de corantes empregando POAE oxidação anódica por 180min.



Fonte: os Autores (2025).

Os perfis cinéticos presentes na Figura 4 permitiram verificar o impacto das variáveis otimizadas ao se estender o processo de degradação até 180 min. Sendo observados valores de degradação de 47,8% para 234 nm, 82,4% para 312 nm e 99,4% para 484 nm.

O ajuste ao modelo cinético proposto por Chan e Chu (15), seus parâmetros, os valores da taxa de degradação ($1/\rho$) e da capacidade oxidativa ($1/\sigma$), além dos valores dos coeficientes de regressão linear (R^2) e da soma residual dos quadrados (S_R^2), que estão expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do ajuste ao modelo proposto por Chan e Chu (15) para degradação dos corantes RA e AC via POAE. Condições: 5V de voltagem, 0,7 g.L⁻¹ de KCl, 1,0 cm de profundidade (grafite) e 2,75 cm (cobre), 200 mL de volume da solução e 10 mg.L⁻¹ de concentração inicial dos corantes.

λ (nm)	Degradação o após 180min	Modelo de Chan e Chu (15)			
		$\frac{1}{\rho}$ (min ⁻¹)	$\frac{1}{\sigma}$	R^2	S_R^2
234	47,8%	0,0185	0,531 4	0,9890	0,0026
312	82,4%	0,0219	1,086	0,9811	0,0015
484	> 99,4%	0,0360	1,019	0,9815	0,0022

Fonte: Autores, 2025.

A partir da Tabela 4 é possível verificar que o modelo cinético de pseudo-primeira ordem de Chan e Chu (15) descreve bem a degradação da mistura de corantes RA e AC pelo processo de oxidação anódica em 180 min de tratamento, com valores de R^2 superiores a 0,98 para todos os comprimentos de onda avaliados.

A análise da taxa de degradação corrobora com os resultados obtidos, com a maior delas sendo observada para 484 nm. Já as capacidades oxidativas indicam a tendência a degradação em cada um com comprimento de onda avaliados, com 312 nm mostrando o maior valor encontrado. O que permite assumir que aumentando-se ainda mais o tempo de reação, poderia ser possível atingir valores superiores a 82% para 312 nm (15).

CONCLUSÕES

A degradação da mistura de corantes RA e AC, em solução aquosa, pelo processo de oxidação anódica composto por um arranjo de eletrodos de grafite (cátodo) e cobre (ânodo), com adição de cloreto de potássio como eletrólito apresentou resultados satisfatórios em 60 min de degradação, operando a 5V, com concentração de $0,7 \text{ g.L}^{-1}$ de cloreto de potássio e com uma distância de 1cm entre os eletrodos.

Aumentando-se o tempo de degradação da mistura de corantes para 180 min durante o ensaio de cinética com os parâmetros operacionais fixados nas melhores condições, foram observadas degradações da ordem de 47,8% para 234 nm, 82,4% para 312 nm e 99,4% para 484 nm. Além disso, foi possível verificar que o modelo de pseudo-primeira ordem de Chan e Chu (15) descreveu bem o comportamento da mistura de corantes RA e AC, obtendo-se valores de R^2 superiores a 0,98.

AGRADECIMENTOS

À FADE/UFPE e à FACEPE.

REFERÊNCIAS

1. CERQUEIRA, T. C. et al. Effects of urbanization on water quality in a watershed in northeastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, Dordrecht, v. 192, p. 65, 2020. DOI: 10.1007/s10661-019-8020-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-8020-0>. Acesso em: 18 jul. 2025.
2. LIU, Z. et al. Scarcity and quality risks for future global urban water supply. *Landscape Ecology*, Dordrecht, v. 39, p. 10, 2024. DOI: 10.1007/s10980-024-01832-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10980-024-01832-0>. Acesso em: 18 jul. 2025.

3. PERVEZ, M. N. et al. Sustainable treatment of food industry wastewater using membrane technology: a short review. *Water*, Basel, v. 13, n. 23, p. 3450, 2021.
4. SEN, S. K.; RAUT, S.; RAUT, S. Mycoremediation of anthraquinone dyes from textile industries: a minireview. *Biotechnologia*, Poznań, v. 104, n. 1, p. 85–91, 2023.
5. MILLER, M. D. et al. Potential impacts of synthetic food dyes on activity and attention in children: a review of the human and animal evidence. *Environmental Health*, London, v. 21, p. 45, 2022.
6. OLIVEIRA, Z. B. et al. Synthetic Colors in Food: A Warning for Children's Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Basel, v. 21, n. 6, p. 682, 2024.
7. GANIYU, S. O.; MARTÍNEZ-HUITLE, C. A. Electrochemical advanced oxidation processes for wastewater treatment: Advances in formation and detection of reactive species and mechanisms. *Current Opinion in Electrochemistry*, Amsterdam, v. 21, p. 100678, 2020.
8. LEE, K. M. et al. Electrochemical oxidation processes for the treatment of organic pollutants in water: Performance evaluation using different figures of merit. *ACS ES&T Engineering*, Washington, DC, v. 2, n. 10, p. 1797–1824, 2022.
9. SATYAM, S.; PATRA, S. The evolving landscape of advanced oxidation processes in wastewater treatment: Challenges and recent innovations. *Processes*, Basel, v. 13, n. 4, p. 987, 2025.
10. FRIGULIO, M. A. P.; VALÉRIO, A. S.; FORTI, J. C. An Overview of Electrochemical Advanced Oxidation Processes for Pesticide Removal. *Processes*, v. 13, n. 7, art. 2227, 2025.
11. OTURAN, M. A.; AARON, J. J. Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Abingdon, v. 44, n. 23, p. 2577–2641, 2014.
12. DEHVARI, M.; JAMSHIDI, B.; MANSUROVNA, B. A.; BABAEI, A. A.; JORFI, S. Enhancement the stability of the titanium/graphite photo electrode in varying voltages for treatment of textile wastewater using reactive blue 19 as the model contaminant. *Scientific Reports*, (S. I.), v. 15, n. 14446, 25 abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97692-y>. Acesso em: 18 jul. 2025.
13. MARTÍNEZ-HUITLE, C. A.; BRILLAS, E. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, Amsterdam, v. 87, n. 3–4, p. 105–145, 2009.
14. RAJKUMAR, D.; PALANIVELU, K. Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, (S. I.), v. 113, n. 1–3, p. 123–129, 2004.
15. CHAN, K. H.; CHU, W. Modeling the reaction kinetics of Fenton's process on the removal of atrazine. *Chemosphere*, v. 51, n. 4, p. 305–311, 2003.
16. NAJAFINEJAD, M. S.; CHIANESE, S.; FENTI, A.; IOVINO, P.; MUSMARRA, D. Application of electrochemical oxidation for water and wastewater treatment: an overview. Preprints, (S. I.), v. 202304.0615, 20 abr. 2023. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202304.0615>. Acesso em: 18 jul. 2025.
17. SCHROEDER, C. M.; KOEHLER, T. M.; LEADBEATER, N. E. Real-time in situ monitoring as a tool for comparison of electrochemical advanced oxidation processes for the decolourisation of azo and indigoid dyes. *RSC Advances*, Cambridge, v. 14, n. 52, p. 38385–38390, 2024. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/ra/d4ra07657e>. Acesso em: 18 jul. 2025.
18. ALAM, M. M.; DAS, A.; ADAK, A. Hydroxyl and sulfate radicals-based electrochemical advanced oxidation process for treating dye-bearing wastewater – A review. *Water Practice & Technology*, London, v. 19, n. 12, p. 4816–4838, 12 nov. 2024.
19. SUNDARAPANDIYAN, S. et al. Mechanistic insight into active chlorine species mediated electrochemical degradation of recalcitrant phenolic polymers. *RSC Advances*, Cambridge, v. 4, n. 104, p. 59821–59830, 2014. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/ra/c4ra09069a>. Acesso em: 18 jul. 2025.

20. QIAN, Y. et al. Performance optimization and toxicity effects of the electrochemical oxidation of octogen. *Catalysts*, (S. I.), v. 12, n. 8, p. 815, 2022.
21. ALKHADRA, M. A. et al. Electrochemical Methods for Water Purification, Ion Separations, and Energy Conversion. *Chemical Reviews*, v. 122, n. 16, p. 13547–13635, 29 jul. 2022.
22. THOR, S. H. et al. Discovering the roles of electrode distance and configuration in dye degradation and electricity generation in photocatalytic fuel cell integrated electro-Fenton process. *Separation and Purification Technology*, Amsterdam, v. 278, p. 119652, 2021.
23. SANGEETHA, T.; MUTHUKUMAR, M. Influence of electrode material and electrode distance on bioelectricity production from sago-processing wastewater using microbial fuel cell. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Hoboken, v. 32, n. 2, p. 390-395, 2013.