

DEGRADAÇÃO DO CORANTE ALIMENTÍCIO VERDE RÁPIDO ATRÁVES DE PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO ELETROQUÍMICO

DEGRADATION OF FAST GREEN FOOD COLOR THROUGH ELECTROCHEMICAL ADVANCED OXIDATIVE PROCESS

DOI: 10.65747/conali2025v3c34

Gabriel Paiva Ourem¹; Lucas Lapa de Albuquerque²; Kyara Gonçalves Santa Rosa²; Alice Maria Zeferino dos Santos²; Maria Clara Barbosa Nascimento³; Daniella Carla Napoleão⁴

¹Mestrando em Engenharia Química- CTG – UFPE; ²Estudante do curso de Engenharia Química-CTG – UFPE; ³Estudante do curso de Ciências Biológicas – UFRPE; ⁴Docente/pesquisador do Depto de Engenharia Química – CTG – UFPE.
Contato: gabriel.paiva@ufpe.br

Resumo: O elevado consumo de alimentos industrializados tem crescido nos últimos anos, devido ao aumento populacional. O ramo industrial de alimentos tem como estratégia a utilização de corantes alimentícios para maior atratividade da população, conseqüentemente gerando mais efluente industrial com esse material específico e de difícil tratamento devido às suas características de estabilidade química, que lhes confere baixa biodegradação. Devido a essas dificuldades, tratamentos alternativos para degradar esse contaminante, como os processos oxidativos avançados eletroquímicos (POAE) via oxidação anódica vêm sendo estudados. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi aplicar esse tipo de tratamento para degradar o corante verde rápido em solução aquosa. Testes preliminares foram realizados com 10 mg·L⁻¹ do corante, volume de 200 mL de amostra, densidade de corrente de 10 mA·cm⁻² e 3 cm de distância entre os eletrodos, em que foi obtida uma degradação de 88,40%. Buscando melhorar a eficiência do tratamento, foram realizados testes variando parâmetros operacionais como densidade de corrente, distância entre os eletrodos e ensaios de volumes. Após obter a melhor condição de trabalho, foi realizado um acompanhamento cinético ao longo de 120 min e atingiu-se uma máxima degradação de 95,79% do corante alimentício. Os dados experimentais se ajustaram bem a modelos cinéticos disponíveis na literatura, mostrando seguir um perfil de pseudo-primeira ordem.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes; Oxidação Anódica; Verde Rápido.

Abstract: The high consumption of processed foods has increased in recent years due to population growth. The food industry has adopted the use of food dyes as a strategy to enhance product appeal, consequently generating greater volumes of industrial effluents containing these specific and hard-to-treat substances. This is largely due to their chemically stable nature, which confers low biodegradability. Owing to these challenges, alternative treatment methods—such as electrochemical advanced oxidation processes (EAOPs) via anodic oxidation—have been investigated for the degradation of such contaminants. Therefore, the objective of this study was to apply this type of treatment to degrade fast green dye in aqueous solution. Preliminary tests were conducted using a dye concentration of 10 mg·L⁻¹, a sample volume of 200 mL, a current density of 10 mA·cm⁻², and an electrode spacing of 3 cm, resulting in a degradation efficiency of 88.40%. In an effort to improve treatment efficiency, additional tests were carried out by varying operational parameters such as current density, electrode spacing, and sample volume. After determining the optimal operating conditions, kinetic monitoring was performed over 120 minutes, achieving a maximum dye degradation of 95.79%. The experimental data fit well to kinetic models found in the literature, indicating a pseudo-first-order reaction profile.

Keywords: Effluent treatment; Anodic oxidation; Fast Green.

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por alimentos industrializados, impulsionado pelo crescimento populacional e pela urbanização, tem exigido da indústria de alimentos a utilização de aditivos capazes de garantir a aparência, estabilidade e aceitabilidade sensorial dos produtos. Dentre os aditivos mais utilizados, os corantes alimentícios desempenham um papel fundamental na atratividade dos alimentos processados, contribuindo significativamente para a preferência ou não do consumidor. Entre eles, destaca-se o Verde Rápido FCF (*Fast Green*), um corante sintético amplamente empregado em confeitos, bebidas, sobremesas e outros produtos industrializados, devido à sua alta solubilidade em água, estabilidade térmica e resistência à luz (Alegbe; Uthman, 2024).

Apesar de sua ampla aceitação e utilização no meio industrial, a presença de corantes sintéticos em efluentes industriais representa um dos principais desafios ambientais da atualidade. Esses compostos são reconhecidos por sua estrutura complexa e estabilidade química, que lhes confere baixa biodegradação, dificultando sua remoção por meio de métodos convencionais de tratamento de efluentes industriais (físicos e/ou químicos e/ou biológicos). Em ambientes aquáticos, a presença do corante altera propriedades físico-químicas da água, como turbidez e pH, reduzindo a penetração de luz e comprometendo processos biológicos essenciais, como a fotossíntese de organismos autótrofos (1, 2). Além disso, estudos apontam que muitos corantes podem apresentar efeitos tóxicos, mutagênicos e potencial carcinogênico, especialmente em populações mais vulneráveis como crianças, tornando seu controle ambiental uma questão de saúde pública (3, 1).

Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias alternativas para o tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos tem se tornado uma área estratégica para a engenharia ambiental e de processos. Visto isso, os processos oxidativos avançados (POA) surgem como alternativas tecnológicas eficazes para a degradação de poluentes orgânicos persistentes (POP). Tais processos se baseiam na geração de espécies reativas de oxigênio, especialmente o radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$), que possui alto potencial de oxidação ($E^\circ = 2,80 \text{ V}$). Estes radicais são capazes de oxidar uma ampla gama de compostos orgânicos até produtos como CO_2 e H_2O (4, 2). Os POA englobam diferentes mecanismos de degradação, podendo ser subdivididos em vários tipos como ozonização, que utiliza ozônio e radiação; processos fotoquímicos como o foto-Fenton, que faz uso de peróxido de hidrogênio, uma fonte de radiação como a ultravioleta (UV) e uma fonte de ferro; fotocatalise heterogênea, que combina o uso de um semicondutor e uma radiação, dentre outros (5).

Apesar de sua eficiência, muitos dos POA clássicos apresentam limitações relacionadas à necessidade de reagentes auxiliares, como catalisadores metálicos ou adição de agentes oxidantes como o H_2O_2 , além de custos operacionais elevados e risco de formação de subprodutos tóxicos (6). Diante disso, os processos oxidativos avançados eletroquímicos (POAE) têm se destacado como uma alternativa que consegue aliar eficiência e sustentabilidade. Esses processos consistem

na aplicação de corrente elétrica a um sistema eletroquímico, onde espécies oxidantes são geradas *in situ*, principalmente na interface eletrodo/solução. O radical hidroxila é formado diretamente na superfície do ânodo a partir da oxidação da água (7,8).

A utilização do POAE no tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos tem se mostrado eficaz, apresentando vantagens operacionais como controle preciso das condições reacionais, ausência de etapas químicas adicionais e possibilidade de integração com outras tecnologias, como a adsorção ou filtração por membranas. Outro ponto favorável é sua aplicação em reatores compactos, que demandam menor área física e permitem escalabilidade em processos industriais (9).

No entanto, a performance do processo eletroquímico está intrinsecamente relacionada a fatores operacionais, como o tipo de eletrodo, a composição/concentração do eletrólito, a geometria da célula, além de variáveis específicas como densidade de corrente, volume da solução e distância entre os eletrodos. A densidade de corrente afeta diretamente a taxa de geração dos radicais hidroxila e a velocidade da reação de oxidação, sendo necessário balancear esse parâmetro para evitar o consumo excessivo de energia ou a formação de subprodutos secundários (4). O volume de solução, por sua vez, influencia a razão entre área superficial dos eletrodos e o volume útil do reator, afetando a eficiência do tratamento, uma vez que interfere diretamente no contato entre poluente e agente oxidante. Por outro lado, a distância entre os eletrodos impacta na resistência elétrica da célula, interferindo no consumo energético e na eficiência global do processo (7).

Além da análise da remoção do corante, torna-se essencial avaliar a cinética reacional, através do ajuste dos dados a modelos cinéticos que descrevam com precisão a dinâmica da degradação ao longo do tempo. A modelagem cinética permite compreender os mecanismos envolvidos, otimizar condições operacionais e prever o comportamento do sistema em diferentes escalas. Dentre os modelos mais utilizados para descrever a degradação de corantes por POAE, destacam-se os modelos de pseudo-primeira ordem, como os propostos por Nichela *et al.*, (10) e Chan e Chu (11), que possuem caráter empírico, sendo utilizados para ajustes em sistemas mais complexos.

Neste cenário, a aplicação de POAE na degradação do corante Verde Rápido se apresenta como uma alternativa ambientalmente viável e potencialmente eficaz, alinhando-se aos princípios da química verde, à busca por processos limpos e ao desenvolvimento de soluções sustentáveis para o setor alimentício. Assim, faz-se necessária a realização de estudos que avaliem a influência de variáveis operacionais não apenas para o avanço do conhecimento científico, mas também para a consolidação do POAE como uma metodologia prática para a mitigação da poluição industrial.

Com isto, o objetivo deste trabalho é avaliar a degradação do corante alimentício Verde Rápido por meio de processo oxidativo avançado eletroquímico, considerando a influência de parâmetros operacionais e a cinética reacional do sistema.

MATERIAIS E MÉTODOS

IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO ANALITO

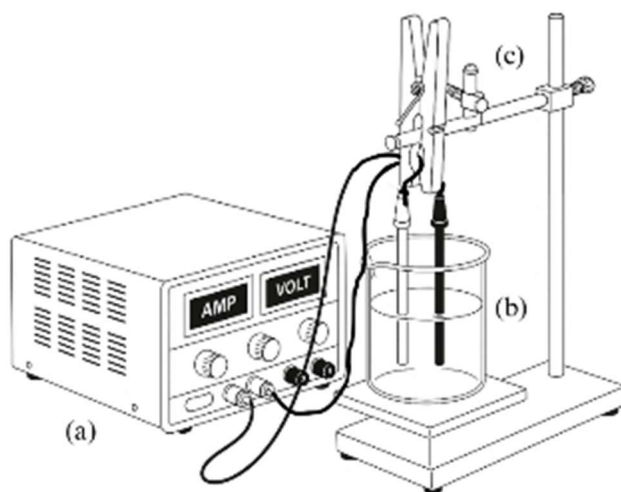
Primeiramente para se iniciar o estudo do corante verde rápido FCF (*Colour Index* (CI) 42053), foi preparada uma solução estoque de água destilada e o corante alimentício, na concentração de $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e a partir desta, realizadas todas as diluições necessárias. Com o objetivo de determinar o comprimento de onda característico (λ), realizou-se uma varredura espectral na faixa de 200 a 700 nm, utilizando um espectrofotômetro de absorção molecular na região do ultravioleta/visível (UV/Vis) (Metash, modelo UV-5100). O comprimento de onda com maior absorbância foi selecionado para o monitoramento da degradação.

Após determinar o comprimento de onda característico, foi construída uma curva analítica com faixa linear de 1 a $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para seguir com a quantificação do contaminante antes e após o tratamento empregado.

TRATAMENTO VIA PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS ELETROQUÍMICOS

Os testes de degradação eletroquímica foram conduzidos usando eletrodos de grafite como ânodo e cátodo, conectados a uma fonte de alimentação (Manipa, Modelo OS-6000) em um suporte para os eletrodos como demonstrado na Figura 1.

Figura 1- Aparato eletroquímico formado por: Fonte de alimentação (a), reator de 250 mL (b) e suporte de eletrodos (c)



Fonte: os Autores (2025).

Inicialmente, foi preparada uma solução trabalho de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ do corante alimentício em estudo para uso nos ensaios de degradação. Para tal, foram utilizados béqueres de 250 mL e um volume de solução de 200 mL. Alguns parâmetros foram fixados para esse teste, sendo eles: a distância entre os eletrodos (3 cm), cloreto de sódio (NaCl) a $0,05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ como eletrólito suporte e profundidade de imersão dos eletrodos na solução (2 cm). Todos os testes foram realizados em duplicata por um período de 60 min.

Verificada a eficiência do tratamento proposto para o teste inicial, foram avaliadas as influências dos parâmetros eletroquímicos, com o objetivo de definir a melhor a condição experimental, variando uma variável por vez e fixando as demais. Assim, avaliou-se a influência da densidade de corrente ($5, 10$ e $15 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$), em seguida, a distância entre os eletrodos (1, 3 e 5 cm) e por fim, o volume de solução a ser tratada (200, 500 e 1000 mL), cada ensaio teve uma duração de 60 min. Em todos os ensaios experimentais, foram retiradas alíquotas de 2 mL nos tempos de 0, 15, 30 e 60 min. As amostras foram analisadas pela técnica analítica de espectrofotometria ultravioleta/visível, no comprimento de onda característico previamente determinado, como descrito no item anterior. A avaliação da eficiência do processo foi realizada por meio do cálculo do percentual de degradação do corante. Uma vez definidas as condições experimentais que favorecem a degradação do corante, pôde-se seguir para o estudo cinético.

ESTUDO CINÉTICO DA DEGRADAÇÃO

Com as melhores condições operacionais definidas (densidade de corrente, distância entre os eletrodos e volume), foi conduzido o estudo cinético do processo. Para isso, foram realizadas duas bateladas de um volume de 200 mL da solução, sendo retiradas alíquotas de 2 mL em intervalos regulares de tempo: 0, 2, 5, 8, 10, 15, 20, para a primeira batelada e 25, 30, 45, 60, 75, 90 e 120 min, para a segunda batelada. Esses ensaios foram assim realizados de modo a não comprometer o volume de amostra tratado. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos cinéticos descritos por Chan e Chu (11) e Nichela *et al.* (10), que podem ser descritos pelas Equações 1 e 2, respectivamente, com auxílio do *Origin*.

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \frac{t}{\rho + \sigma t} \quad (1)$$

Sendo, C é a concentração em um dado instante de tempo; C_0 , a concentração no tempo zero; ρ , a cinética reacional em minutos e σ é a capacidade oxidativa.

$$\frac{(C)}{(C_0)} = \frac{1-a.t-D}{1+(\frac{t}{b})^C} + D \quad (2)$$

Em que: (C) é a concentração do corante ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) no tempo t (min), (C_0) é a concentração no tempo zero ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), a (min^{-1}) é a taxa média de oxidação (taxa inicial aparente), b (min) é o tempo necessário para atingir metade da concentração inicial (meia-vida aparente), C a inclinação média durante a fase rápida e D o valor residual final.

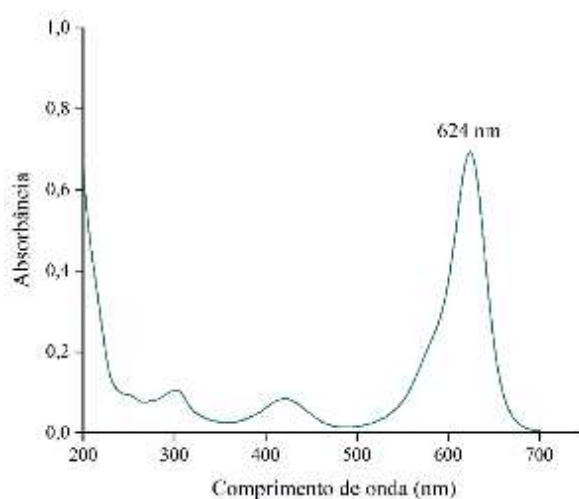
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, estão os resultados encontrados da degradação do corante alimentício por tratamento eletroquímico que posteriormente foram discutidos.

IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO ANALITO

Foi realizada uma varredura espectral de 200 a 700 nm pela técnica de espectrofotometria de absorção molecular ultravioleta/visível, cujo espectro está apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Espectro de UV/Vis da solução do corante verde rápido (*Fast Green*)

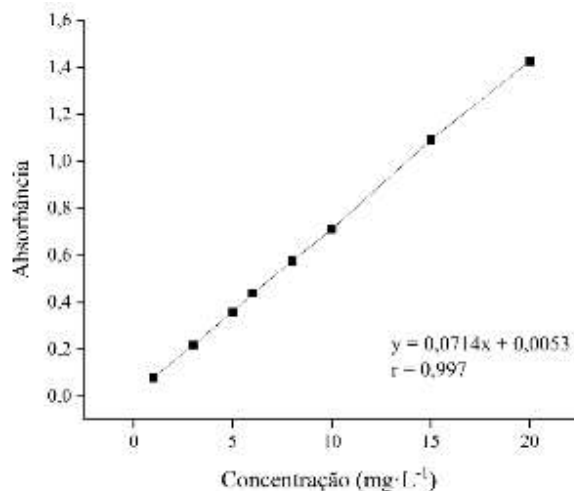


Fonte: os Autores (2025).

De acordo com a Figura 2, verifica-se que o pico de maior absorbância se deu no comprimento de onda (λ) de 624 nm, com absorbância máxima de 0,6913. De acordo com Barboza; Merlo; Pazinatoa (12), a faixa entre 400 e 720 nm refere-se aos grupamentos cromóforos, ou seja, aqueles responsáveis por conferir cor ao produto. A partir deste resultado, todas as análises foram realizadas com este λ .

Após determinar o λ característico, foi construída uma curva analítica com faixa de trabalho entre 1 e 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ que está demonstrada na Figura 3.

Figura 3 – Curva analítica do corante alimentício em 624 nm.



Fonte: os Autores (2025).

Ao avaliar a Figura 3, pode-se verificar um coeficiente de correlação linear (r) igual a 0,997, o qual se enquadra na faixa de confiabilidade do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e da Agência Nacional de vigilância Sanitária (ANVISA) que solicita o valor de $r > 0,99$. A partir destes dados, pôde-se seguir para a degradação do contaminante por processos oxidativos avançados eletroquímicos.

TRATAMENTO VIA PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS ELETROQUÍMICOS

Para os testes preliminares, foram variados diferentes parâmetros experimentais, primeiramente foi testado a densidade de corrente e fixando os outros parâmetros, como distância entre os eletrodos e volume da solução trabalho. A degradação do contaminante variando as densidades de correntes estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Degradação com variações de densidade de corrente

Densidade de corrente ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Degradação (%)
5	67,42
10	88,40
15	92,64

Fonte: Autores, 2025

A partir dos dados da Tabela 1, pode-se verificar que, quanto maior a densidade de corrente, maior a degradação. Este fato está associado a maior quantidade de corrente passando pela solução, que conseqüentemente, aumenta o fluxo de elétrons no sistema, gerando assim mais agentes oxidantes. Ao se avaliar a degradação entre 10 e 15 mA.cm⁻², ocorreu uma variação menor do que 5% entre os dados e a partir desse resultado, seguiu-se com a menor densidade de corrente mantendo a eficiência do processo e reduzindo o gasto energético. Essa escolha foi feita tendo em vista que outros parâmetros operacionais também serão avaliados, permitindo elevar a eficiência do tratamento proposto.

Após selecionar a densidade de corrente mais adequada (10 mA.cm⁻²), pôde-se fixar esse parâmetro e seguiu-se para a variação da distância entre os eletrodos, variando em 1, 3 e 5 cm. Os valores de degradação estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Degradação com variações de distância entre os eletrodos

Distância entre os eletrodos (cm)	Degradação (%)
1	90,16
3	89,72
5	88,40

Fonte: Autores, 2025

Ao analisar a Tabela 2, pode-se concluir que a variação da distância entre os eletrodos para este contaminante é menor do que 5%, se mantendo a eficiência do tratamento. Por questões operacionais, optou-se por trabalhar com 3 cm de distância entre eles. No estudo realizado por Khan *et al* (13), pode-se observar comportamento semelhante, optou-se a trabalhar com 3 cm para degradar corante Azul reativo 19 (RB19), em que foi determinada uma degradação máxima de 82,5% do contaminante.

Após determinar a densidade de corrente e a distância entre os eletrodos, foram feitos estudos com volumes de 200, 500 e 1000 mL, cujos resultados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Degradação com variações de volume

Volume de solução trabalho (mL)	Degradação (%)
200	89,10
500	80,43
1000	82,42

Fonte: Autores, 2025

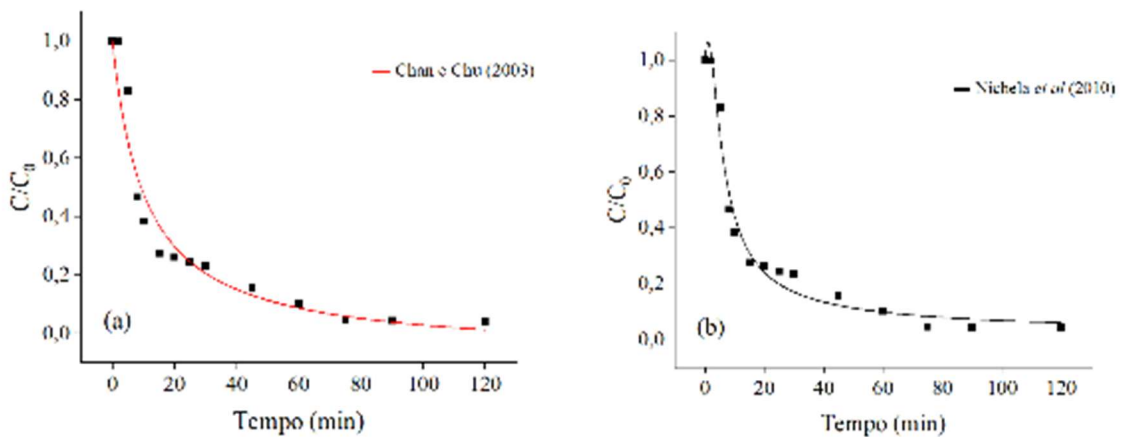
No estudo de volume descrito na Tabela 3, pode-se observar que houve uma variação em torno de 7,5% ao se comparar com o estudo de 200 mL, indicando não ser possível aumentar o volume de amostra a ser tratado para as condições operacionais estabelecidas. Sabe-se que nos

POAE a degradação do contaminante ocorre na superfície do eletrodo, o que mostra a necessidade de em trabalhos futuros avaliar a influência da razão entre a profundidade de imersão dos eletrodos e o volume de amostra (14). A partir deste resultado, seguiu-se com o estudo da cinética de degradação do corante.

ESTUDO CINÉTICO DA DEGRADAÇÃO

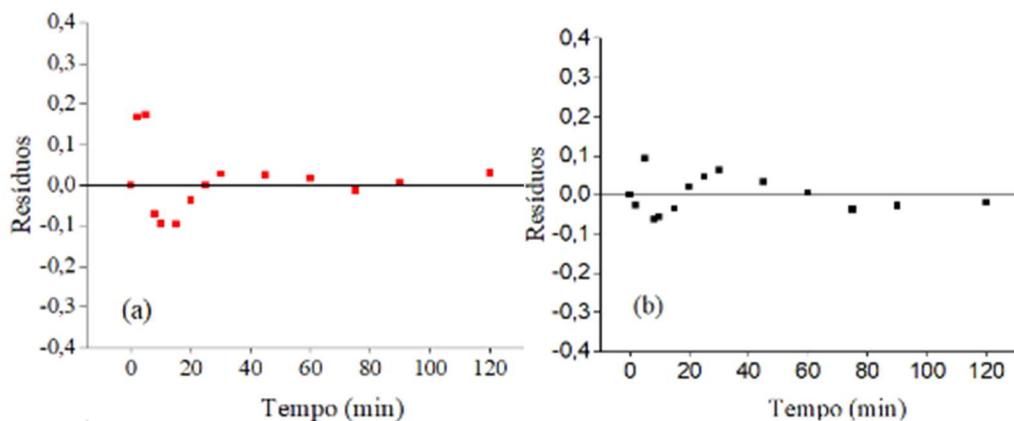
Na avaliação cinética, os ensaios foram realizados com 200 mL em tempo reacional de 120 min, empregando $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ e 3 cm de distância entre os eletrodos. Os dados obtidos foram avaliados quanto ao ajuste aos modelos cinéticos de Chan e Chu (11) e Nichela *et al.* (10) (Figura 4 e 5).

Figura 4 – (a) Ajuste cinético ao modelo de Chan e Chu (11); (b) Nichela *et al.* (10). Condições operacionais: $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 3 cm de distância entre os eletrodos, $p = 1 \text{ atm}$, $T = 25\pm 3^\circ\text{C}$.



Fonte: Autores, 2025

Figura 5 – (a) Resíduos gerados pelo ajuste cinético ao modelo de Chan e Chu (11); (b) Resíduos gerados pelo ajuste cinético ao modelo de Nichela *et al.* (10). Condições operacionais: $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 3 cm de distância entre os eletrodos, $p = 1 \text{ atm}$, $T = 25\pm 3^\circ\text{C}$.



Fonte: Autores, 2025

A partir da Figura 4, observa-se que os resultados obtidos para ambos os modelos cinéticos apresentam uma taxa de decaimento rápida nos primeiros 20 min, seguido de uma etapa lenta que atinge o equilíbrio a partir de 90 min, quando se obtém uma degradação máxima de 95,79% do corante. Enquanto a Figura 5, demonstra os resíduos gerados pelos modelos, ocorrendo uma flutuação inicial e se estabilizando em torno do eixo central ao decorrer do tratamento. De modo a complementar a análise da Figura 4, a Tabela 4 com os parâmetros de cada modelo.

Tabela 4 – Parâmetros dos modelos cinéticos testados

Modelo	Parâmetro	
Chan e Chu (2003)	R^2	0,94
	Sr^2	$7,14 \times 10^{-3}$
	$1/\sigma$	$1,073 \pm$
		0,05373
	$1/\rho$ (min^{-1})	$0,103 \pm 1,668$
Nichela <i>et al.</i> (2010)	R^2	0,98
	a (min^{-1})	$-0,15 \pm 0,1453$
	b (min^{-1})	$4,096$
		$\pm 1,6845$
	c	$1,1778 \pm 0,2198$
	d	$0,01326 \pm 0,0670$

Fonte: Autores, 2025

De acordo com a Tabela 4, pode-se verificar que os dados se ajustam bem para ambos os modelos estudados, devido aos valores de R^2 iguais a 0,94 e 0,98 para o modelo de Chan e Chu (11) e Nichela *et al.* (10), respectivamente. Para o modelo proposto por Chan e Chu (11), a taxa reacional (ρ) com valor de 0,103 (min^{-1}) e uma capacidade oxidativa (σ) de 1,073 é compatível para o modelo, pois foram observados dois estágios reacionais, com uma etapa rápida inicialmente, seguida por outra lenta, que é característico do modelo testado.

No modelo proposto por Nichela *et al.* (10), o parâmetro a (min^{-1}) apresentou valor negativo, possivelmente decorrente de flutuações experimentais observadas nos primeiros minutos do tratamento, o que compromete a representação inicial da cinética. No entanto, ao longo do tempo, os dados experimentais se adequaram ao modelo. O parâmetro $b=4,096$ de valor elevado, indica uma etapa inicial rápida da reação, característica dos primeiros instantes do processo. Já os

parâmetros $c=1,1778$ e $d=0,01326$ ambos com valores relativamente baixos, justificam a desaceleração do processo ao longo do tempo, refletindo a transição para uma fase mais lenta e estável, especialmente após 120 min de reação.

CONCLUSÕES

O uso do processo oxidativo avançado eletroquímico via oxidação anódica se mostrou aplicável para a degradação do corante alimentício verde rápido. Ao se avaliar as condições operacionais, a densidade de corrente definida foi de $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, tendo em vista o gasto energético. De modo a garantir elevados valores de degradação ($> 90\%$) foi possível tratar 200 mL. A partir dos dados cinéticos confirmou-se que, existe uma etapa rápida do processo, nos primeiros 20 min, seguida por uma etapa lenta que alcança o equilíbrio após 90 min de tratamento; indicando um perfil de degradação de pseudo primeira-ordem. Diante disto, pode-se constatar que o tratamento via POAE para o corante alimentício verde rápido é eficiente e pode ser aplicado. Para aumento de volume de tratamento novos estudos devem ser realizados.

AGRADECIMENTOS

À FADE/UFPE e à FACEPE.

REFERÊNCIAS

1. LIN, J. *et al.* Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 4, n. 11, p. 785–803, 2023. DOI: 10.1038/s43017-023-00489-8.
2. INNOCENZI, V.; COLANGELI, A.; PRISCIANDARO, M. Advanced oxidation process for the removal of dyes from synthetic industrial wastewaters. *Desalination and Water Treatment*, v. 259, p. 315–320, 2022. DOI: 10.5004/dwt.2022.28629.
3. AMCHOVA, P.; SISKA, F.; RUDA-KUCEROVA, J. Food safety and health concerns of synthetic food colors: an update. *Toxics*, v. 12, n. 7, p. 466, 2024. DOI: 10.3390/toxics12070466.
4. IQBAL, A. *et al.* Insight into the degradation of different classes of dyes by advanced oxidation processes: a detailed review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, v. 104, n. 17, p. 5503–5537, 2024. DOI: 10.1080/03067319.2022.2125312.
5. GUO, K. *et al.* UV/chlorine process: an efficient advanced oxidation process with multiple radicals and functions in water treatment. *Accounts of Chemical Research*, v. 55, n. 3, p. 286-297, 2022.
6. MANNA, M.; SEN, S. Advanced oxidation process: a sustainable technology for treating refractory organic compounds present in industrial wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 10, p. 25477-25505, 2023.
7. BRILLAS, E.; SIRÉS, I.; OTURAN, M. A. Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. *Chemical Reviews*, v. 109, n. 12, p. 6570–6631, 2009. DOI: 10.1021/cr900136g
8. MAGDALENO, A. L. *et al.* Comparison of electrochemical advanced oxidation processes for the treatment of complex synthetic dye mixtures. *Separation and Purification*

- Technology*, v. 345, p. 127295, 2024. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127295.
9. FU, R. *et al.* Wastewater treatment by anodic oxidation in electrochemical advanced oxidation process: advance in mechanism, direct and indirect oxidation detection methods. *Chemosphere*, v. 311, p. 136993, 2023.
 10. NICHELA, D. *et al.* Degradation kinetics of hydroxy and hydroxynitro derivatives of benzoic acid by fenton-like and photo-fenton techniques: a comparative study. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 98, n. 3–4, p. 171–179, 2010.
 11. 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. DOI: 10.1016/S0045-6535(02)00882-7.
 12. BARBOZA, D. A. P.; MERLO, A. A.; PAZINATO, M. S. Plano orientador "Grupos cromóforos e sua relação com a cor": produto educacional para uma abordagem experimental investigativa da Química Orgânica no Ensino Médio. *Revista Virtual de Química*, v. 13, n. 3, p. 650-660, 2021.
 13. KHAN, H. *et al.* Multiple design and modelling approaches for the optimisation of carbon felt electro-Fenton treatment of dye laden wastewater. *Chemosphere*, v. 338, p. 139510, 2023.