

ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DE CORANTES ALIMENTÍCIOS POR MEIO DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS CLÁSSICOS

FROM COLORFUL TO TRANSPARENT: STUDY OF DYE DEGRADATION THROUGH ADVANCED OXIDATIVE PROCESSES

DOI: 10.65747/conali2025v3c36

Eccilha Franciely Gadelha Seabra de Lima¹, Livia Barros Silva², Vanessa de Oliveira Marques Cavalcanti³, Alex Leandro Andrade de Lucena⁴, Daniella Carla Napoleão⁵

¹Estudante do Curso de Engenharia de Alimentos - DEQ - UFPE, eccilhaf@gmail.com;

²Estudante do Curso de Engenharia de Alimentos - DEQ - UFPE, livia.barros@ufpe.br;

³Doutoranda pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Química, UFPE, vanessaom.cavalcanti@ufpe.br;

⁴Doutor em Engenharia Química, UFPE, lucenaalex3@gmail.com;

⁵Docente em Engenharia Química, UFPE, daniella.napoleao@ufpe.br.

Resumo: A água é um recurso natural essencial para a vida humana, a procura por água potável, aliada à intensificação da poluição dos recursos hídricos, torna cada vez mais desafiador garantir o fornecimento de água de qualidade para a população. A presença de corantes oriundos dos resíduos gerados pelas indústrias alimentícias, acaba apresentando altas concentrações de matéria orgânica e forte coloração. Dentre as alterações causadas, a principal é a inibição da passagem de luz solar, que afeta no teor do oxigênio dissolvido representando uma das principais fontes de poluição dos corpos d'água. Entre esses corantes estão o amarelo crepúsculo e roxo açáí, que quando descartados de forma incorreta, podem causar efeitos tóxicos em organismos aquáticos e riscos à saúde humana. Neste sentido, este trabalho visa avaliar a eficiência da degradação da mistura dos corantes roxo açáí e amarelo crepúsculo empregando diferentes processos oxidativos avançados (POA). Após realizar testes com diferentes métodos, constatou-se que o processo foto-Fenton apresentou o melhor resultado, conseguindo degradar completamente os grupos cromóforos. A partir dos resultados, observou-se que o processo foto-Fenton/UV-C a cinética de degradação dos compostos seguiu um perfil de pseudo primeira ordem, adequando-se ao modelo proposto por Chan e Chu. No que diz respeito as análises de toxicidade, nenhuma das soluções analisadas apresentaram diminuição nos índices de germinação e de crescimento radicular das sementes de alface, indicando que o tratamento empregado conduziu a uma amostra não tóxica para este organismo.

Palavras-chave: Foto-Fenton; POA; Tratamento de efluentes.

Abstract: Water is a natural resource essential to human life. The demand for drinking water, combined with the intensification of water pollution, makes ensuring a quality water supply for the population increasingly challenging. The presence of dyes from waste generated by the food industry results in high concentrations of organic matter and strong coloration. Among the changes caused, the main one is the inhibition of sunlight, which affects dissolved oxygen levels, representing one of the main sources of pollution in water bodies. These dyes include sunset yellow and açai purple, which, when disposed of improperly, can cause toxic effects on aquatic organisms and pose risks to human health. Therefore, this study aims to evaluate the degradation efficiency of the açai purple and sunset yellow dye mixture using different advanced oxidative processes (AOPs). After conducting tests with different methods, it was found that the photo-Fenton process presented the best results, managing to completely degrade the chromophore groups. The results showed that the photo-Fenton/UV-C degradation kinetics of the compounds followed a pseudo-first-order profile, consistent with the model proposed by Chan and Chu. Regarding toxicity analyses, none of the solutions analyzed showed a decrease in the germination and root growth rates of lettuce seeds, indicating that the treatment produced a sample that was non-toxic to this organism.

Keywords: AOP; Effluent treatment; Photo-Fenton.

INTRODUÇÃO

Segundo a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 306 de 2002 define-se o meio ambiente como condições químicas, físicas, biológicas e climáticas que permitem abrigar e reger a vida em todas as suas formas, não sendo formado apenas por animais e plantas, mas também por ações antrópicas (1). O crescimento populacional, aliado ao aumento da demanda por alimentos e bens de consumo, faz com que o homem transforme cada vez mais a matéria-prima, gerando quantidades maiores de resíduos, tanto no processo de produção industrial quanto no de consumo. Assim, a poluição ambiental, sobretudo da água, vem sendo identificada como um dos maiores problemas da sociedade moderna, passando a ser um assunto de interesse público, visto que o problema tem se agravado ao longo dos anos, colocando em risco a saúde da comunidade e comprometendo as gerações futuras (2).

A água é um recurso natural essencial para a vida humana e para o desenvolvimento socioeconômico. No entanto, a procura por água potável, aliada à intensificação da poluição dos recursos hídricos, torna cada vez mais desafiador garantir o fornecimento de água de qualidade para a população. A detecção frequente de poluentes orgânicos persistentes (POP) nos diferentes compartimentos ambientais, e em particular nos meios aquáticos, tem levado a uma crescente preocupação devido ao potencial danoso que estas substâncias podem apresentar tanto para o meio ambiente como para a saúde humana. Para garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e do saneamento para todos, quatro anos após a assinatura da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentáveis, os países tomaram medidas para integrar os objetivos e metas em seus planos nacionais de desenvolvimento e alinhar os regulamentos e instituições que os apoiam. A maioria dos países do mundo reconheceu a importância de coordenar melhor o uso dos recursos hídricos e implementar planos integrados para sua gestão (3).

Dentre as principais classes de POP estão: compostos fenólicos, fármacos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, agrotóxicos e corantes sintéticos (têxteis, sanitizantes e alimentícios). A presença de corantes, oriundos dos resíduos gerados pelas indústrias alimentícias, pode conduzir a produção de efluentes com forte coloração, que pode afetar a passagem de luz solar, que afeta no teor do oxigênio dissolvido disponível nos corpos d'água. Os corantes alimentícios, em sua maioria, são compostos orgânicos utilizados principalmente para realçar a coloração de alimentos e bebidas. Os principais corantes desta classe, são os orgânicos sintéticos artificiais, presentes em alimentos consumidos diariamente. Essawy *et al.* indicam em seu trabalho que aproximadamente 12% dos corantes sintéticos são perdidos durante as operações de fabricação e processamento, onde 20% desses corantes perdidos chegam nas estações de tratamento de efluentes (4).

Como exemplo desses corantes tem-se o amarelo crepúsculo, que ajuda a aumentar a aceitação dos consumidores, sendo utilizado na formulação bebidas, doces e outros alimentos processados, conferindo cor e estabilidade (5). Ele apresenta vantagens como cor mais brilhante, maior estabilidade e menor preço quando comparado aos corantes naturais. Devido às suas características, apresenta resistência aos tratamentos convencionais aplicados em estações de tratamento de efluentes (ETE). O roxo açai é uma mistura composta pelos corantes vermelho bordeaux (VB, $C_{20}H_{15}N_2Na_2O_7S_2$) e azul brilhante (AB, $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$), sendo o VB proibido em países como Estados Unidos da América, Japão, Canadá, Noruega e Finlândia devido sua toxicidade (6).

De modo geral existem diversos mecanismos para tratamento de poluentes, que podem ser classificados em três naturezas distintas: física, química e biológica. Os POP são resistentes aos tratamentos convencionais, sendo assim, outros métodos estão sendo estudados como uma alternativa aos processos físico-químicos e biológicos, ou como um processo complementar para aumentar a degradação dos poluentes. Os processos oxidativos avançados (POA) são tratamentos capazes de mineralizar os poluentes, convertendo-os a água, dióxido de carbono e sais inorgânicos (7).

Os POA vem reduzindo os impactos ambientais de radicais hidroxilas, podem ser divididos em dois grupos, os que envolvem reações heterogêneas, na presença de catalisadores sólidos metálicos, e os que envolvem reações homogêneas, como os processos que utilizam H_2O_2 , radiação visível ou UV e uso de O_3 (8). Existem diversos tipos de POA, que podem ser divididos de diferentes formas (homogêneos e heterogêneos; fotolíticos e não fotolíticos) sendo os mais conhecidos Fenton, foto-Fenton e a fotoperoxidação.

A utilização de corantes alimentícios vai além da indústria alimentícia, esses corantes servem como aditivos em uma ampla gama de produtos, incluindo suco de laranja, geleia de laranja, rocambole suíço, geleia de damasco e outros. Sua prevalência também se estende a confeitaria, sobremesas, salgadinhos, molhos e frutas em conserva, entretanto, esses corantes alimentares sintéticos também têm consequências negativas para o meio ambiente. Órgãos reguladores permitem o uso de corantes sintéticos como aditivos em alimentos e produtos farmacêuticos, desde que estejam presentes em concentrações mais baixas para melhorar a aparência, a uniformidade da cor e a textura. A Lei de Prevenção à Adulteração de Alimentos (1954) na Índia aprova especificamente corantes sintéticos como tartrazina, azul brilhante, amarelo-sol, ponceau-4r, carmoisina, eritrosina e índigo carmim para consumo. Para superar este problema, o tratamento químico, especialmente o processo de oxidação avançada (POA), foi adotado por Tsungom Mulai *et. al.*(9).

Embora os POA demonstrem elevada eficiência, por vezes eles não conseguem promover a completa degradação dos contaminantes, levando a formação de subprodutos que podem apresentar características indesejáveis, como toxicidade. A toxicologia está ligada ao estudo dos efeitos adversos de substâncias. Os testes de toxicidade expõem organismos representativos durante um período determinado a uma ou várias concentrações de uma ou mais substâncias e avaliar os efeitos causados. Através de estudos foi comprovado que a utilização de sementes vegetais como alface (*Lactuca sativa*), permite determinar a toxicidade de efluentes. As sementes de alface submetidas a hidratação entram em seu processo de germinação, no qual sofrem mudanças fisiológicas de forma rápida (10).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo promover a degradação de uma mistura aquosa dos corantes alimentícios amarelo crepúsculo e roxo açai por meio de POA-foto-Fenton. Para tal, foram avaliados diferentes tipos de POA de modo a identificar o que melhor eficiência, e para este determinar o perfil cinético de degradação e a toxicidade das soluções antes e após o tratamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item estão descritos todos os materiais e metodologias utilizados ao longo da pesquisa, tanto no que diz respeito a elaboração de metodologia para detecção e quantificação dos corantes alimentícios, quanto da degradação deles via POA e do estudo de toxicidade. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Ambiental e da Qualidade da Universidade Federal de Pernambuco (Recife, PE, Brasil) no período de março a junho de 2025.

Solução de trabalho e metodologia de quantificação

Inicialmente, foi preparada uma solução aquosa contendo os corantes amarelo crepúsculo (AC) e roxo açai (RA) a 10 mg.L^{-1} , de cada (ST). Os padrões utilizados foram obtidos da F.Trajano Aromas & Ingredientes. Essa amostra foi submetida a análise varredura espectral de 200 a 600 nm, utilizando um espectrofotômetro de absorção molecular na região do ultravioleta/visível (UV/Vis) (Metash UV-5100). Em seguida, foram determinado(s) o(s) comprimentoo(s) de onda característico(s) e construída(s) a(s) curva analítica(s) com faixa linear de 1 a 15 mg.L^{-1} . Para tal, foram realizadas leituras de triplicatas de cada ponto da curva (foram utilizados 2 analistas), sendo esta obtida da média de cada um deles.

Estudo de degradação

Antes dos ensaios utilizando o processo foto-Fenton (FF), foram avaliados os contributos dos processos de fotólise e Fenton tratamento dos corantes em solução aquosa. Ressalta-se que todos os processos foram realizados em 60 min, utilizando 50 mL da ST, e quando aplicável, 1 mg.L^{-1} de ferro. As soluções foram quantificadas antes e após submissão a cada um dos processos, e suas eficiências determinadas através do percentual de degradação dos contaminantes. Concluída esta etapa, foram conduzidos os ensaios de degradação por meio do processo FF, empregando radiação UV-C (sendo a câmara de irradiação composta por 3 lâmpadas dispostas em paralelo de 30W cada, totalizando 90 W, Osram, com 90 cm de comprimento) em câmara de

irradiação fechada, revestidas com folha de alumínio de modo a aumentar sua eficiência. O desenho esquemático do sistema empregado pode ser visualizado na Figura 1, vale ressaltar que todos os ensaios foram realizados em duplicata e por 2 analistas.

Considerando que processos à base de ferro exibem maior eficiência em meio ácido, foram realizados ensaios com a ST em seu pH natural e em pH ajustado (entre 2 e 3). Para acidificar a amostra, utilizou-se uma solução de H_2SO_4 $5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, e o pH foi medido com pH-metro de bancada (Quimis). Em ambos os ensaios, utilizaram-se 50 mL de ST, $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 35% v/v (Êxodo) devidamente padronizado e $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Fe. Ressalta-se que o tempo de tratamento adotado foi de 60 min, sendo cada ensaio realizado em duplicata (foram utilizados 2 analistas).

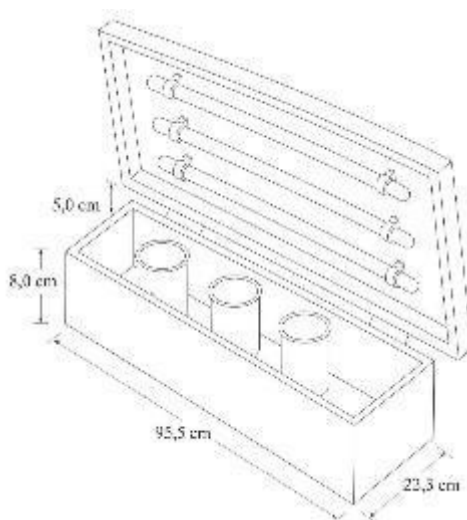


Figura 1 - Câmara de radiação equipada com lâmpadas UV-C.

Fonte: adaptado de Charamba et al. (2018) (11).

Ajuste de parâmetros operacionais

Após estudos iniciais foram avaliadas as variáveis que podem influenciar na eficiência dos processos, sendo as concentrações de H_2O_2 e do catalisador. O pH da solução foi mantido na melhor condição selecionada na etapa anterior. Assim, fixou-se o valor da concentração do catalisador em $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de FeSO_4 e a concentração do agente oxidante foi variada em 20, 40, 60, 80 e $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Posteriormente, estabelecida a melhor (H_2O_2), avaliou-se a influência da concentração de catalisador no sistema, variando-a em 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e $5,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Em todos os casos, foram utilizados 50 mL da solução aquosa dos corantes com tempo de experimento de 60 min. Todos os ensaios foram realizados em duplicata por 2 analistas. A câmara de irradiação apresentou uma emissão de fótons em torno de $7,0 \times 10^3 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Feito isto, visando a garantia da eficiência do processo, foi realizado o estudo da variação de volume da solução tratada. Desta forma, os volumes 50 mL, 100 mL, 250 mL, 500 mL, 750 mL e 1 L, foram testados, sendo cada ensaio realizado em duplicata (foram utilizados 2 analistas).

Estudo da cinética de degradação dos corantes e acompanhamento do consumo de H₂O₂

O estudo da cinética de degradação dos corantes em estudo e o acompanhamento do consumo de H₂O₂ foram realizados nas melhores condições experimentais obtidas nas etapas anteriores. Os ensaios foram realizados com a retirada de alíquotas em intervalos de tempo de 0, 3, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 e 90 min. A partir dos resultados obtidos, os dados experimentais foram avaliados quanto ao ajuste ao modelo cinético proposto por Chan e Chu (2003) (12) (Equação 1).

$$\frac{(C)}{(C)_0} = 1 - \frac{t}{\rho + \sigma * t} \quad (1)$$

Em que: C é a concentração do contaminante (mg·L⁻¹) ao término do tratamento; C₀ é a concentração do contaminante (mg·L⁻¹) no início do tratamento; t é o tempo reacional (min); ρ : constante cinética de reação (min) e σ é a capacidade de oxidação.

O ajuste dos dados experimentais ao modelo cinético descrito foi realizado com auxílio do Origin. Os ensaios de bancada foram realizados por 2 analistas, enquanto o ajuste no *software* foi feito por eles e revisado por um terceiro analista.

Além da quantificação dos corantes, após o estudo cinética a concentração residual de H₂O₂ também foi determinada com o mesmo intervalo de tempo descrito para cinética de degradação dos corantes. Para tal, utilizou-se o método colorimétrico descrito por Santana *et al.* (13), que empregou o equipamento de espectrofotometria de UV/Vis (Metash UV-5100).

Toxicidade

A toxicidade foi acompanhada por um período total de 120 h, submetendo as sementes de alface (*Lactuca sativa*; Isla) antes e após o POA foto-Fenton. Para tal, foram colocadas 20 sementes sobre papel de filtro qualitativo em placas de Petri (diâmetro = 9 cm) contendo 4 mL de cada amostra e dos controles negativo (água destilada) e positivo (ácido bórico), ensaios em quintuplicata (estes ensaios foram realizados por 2 analistas e revisado por um terceiro analista). Após o período de incubação, foram avaliadas a germinação das sementes e o comprimento das radículas. O procedimento experimental seguiu o descrito por Santana *et al.* (14) e o nível de toxicidade foi determinado através do índice de germinação (IG) e do índice de crescimento relativo (ICR), conforme (15). O procedimento experimental está ilustrado na Figura 2.

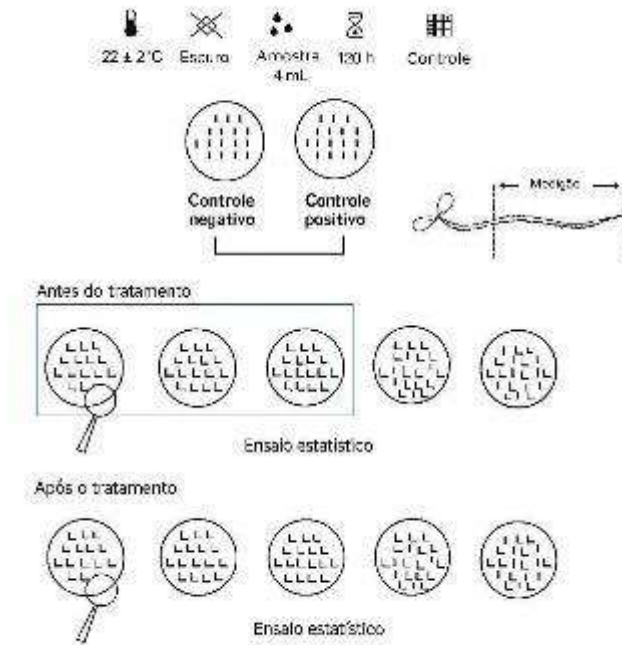


Figura 2 – Ensaio toxicidade com *Lactuca sativa*.

Fonte: (16).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Solução Trabalho

Como ponto de partida foi realizada uma varredura espectral da mistura aquosa dos corantes amarelo crepúsculo (AC) e roxo açaí (RA) com concentração de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de cada corante, para identificação dos picos característicos. O resultado obtido está apresentado na Figura 3.

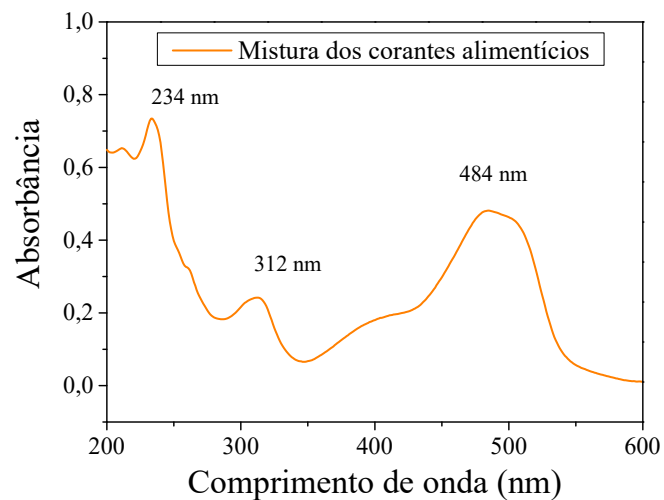


Figura 3 - Espectro da solução dos corantes amarelo crepúsculo e roxo açaí em solução aquosa, com concentração de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de cada corante.

Fonte: as autoras (2025).

Como ilustrado na Figura 3 é possível identificar três picos característicos, sendo eles 234, 312, 484 nm. É possível perceber que na região do visível, um pico em 484 nm a cor, que este pode ser atribuído à transição $n-\pi^*$ dos grupos cromóforos presentes nas moléculas dos corantes. Os picos observados na região do ultravioleta estão relacionados aos anéis aromáticos ligados ao corante (Nascimento et al., 2020) (17).

Assim, as curvas analíticas foram construídas para cada λ selecionado, sendo verificados valores de coeficiente de correlação(r) foi maiores que 0,99. Estes resultados atendem à exigência da Agência Nacional de Vigilância Sanitária conforme a Resolução da diretoria colegiada (RDC) n°166 de 2017 (18).

Estudo de degradação

Para o estudo de degradação dos corantes AC e RA em solução, inicialmente avaliou-se a contribuição da fotólise, Fenton e foto-Fenton conforme pode ser observado na Figura 4.

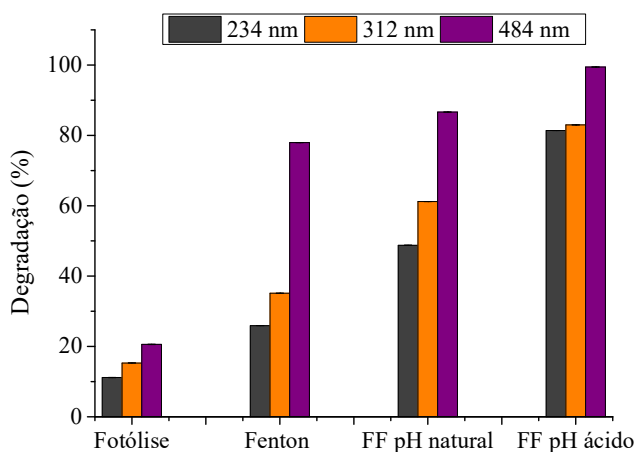


Figura 4- Estudo de degradação dos corantes alimentícios amarelo crepúsculo e roxo açai em solução aquosa. FF = foto-Fenton.

Fonte: as autoras (2025).

Os resultados apresentados na Figura 4, mostram que a fotólise, conduziu a uma degradação mínima, igual a 11, 15 e 20% de degradação para os grupamentos monitorados nos λ de 234, 312 e 484 nm, respectivamente. Isso indica que o uso exclusivo de irradiação não foi suficiente para degradar os corantes. A aplicação do processo Fenton, elevou a eficiência, alcançando degradações em torno de 25, 35 e 78% nos λ 234, 312 e 484 nm, nesta ordem. Esse ganho deve-se à geração contínua de radicais hidroxila na zona de reação, que atacam de forma mais eficaz as moléculas dos corantes (Mulai *et al.* 2025) (19).

Ainda analisando a Figura 4, constata-se que ao acrescentar a radiação UV-C no sistema Fenton, obteve-se os maiores percentuais de degradação, variando entre 48 e 86 % ao fazer uso de pH natural e atingindo 80, 82 e 100% de degradação ao monitorar os λ de 234, 312 e 484 nm, respectivamente. Neste caso, o sistema promoveu a fotorredução de Fe^{3+} a Fe^{2+} , ampliando o ciclo de geração de radicais $\bullet OH$ (Pinoargote-Chang *et al.* 2022) (20). Em meio ácido a produção de espécies oxidantes foi então maximizada, favorecendo a eficiência dos processos (Suhan et al. 2021)(21).

Sabendo que o processo foto-Fenton foi o mais eficiente, passou-se a etapa de avaliação dos seus parâmetros operacionais.

Ajuste de parâmetros operacionais

Visto que o sistema FF apresentou os melhores resultados ao utilizar pH ácido, passou-se para o ajuste dos demais parâmetros operacionais (concentração de peróxido de hidrogênio e concentração de ferro). Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.

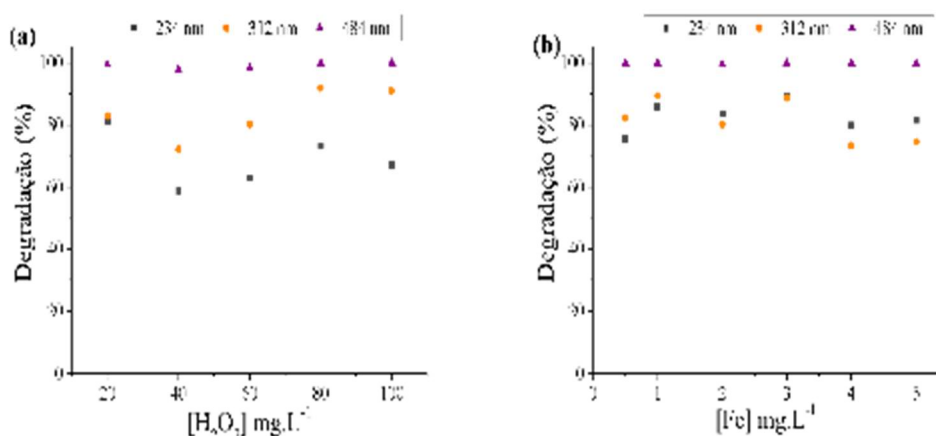


Figura 5 – Estudo dos parâmetros operacionais do processo foto-Fenton para degradação dos corantes alimentícios amarelo crepúsculo e roxo açai em solução aquosa
Fonte: aa autoras (2025).

Conforme mostrado na Figura 5(a), o aumento da concentração de H₂O₂ de 20 para 100 mg·L⁻¹ não promoveu ganhos na degradação dos grupos monitorados em 484 nm, sugerindo que, para este λ , o sistema já opera próximo ao seu limite de eficiência mesmo com pequenas doses de oxidante. Por outro lado, o melhor desempenho de degradação dos grupos monitorados em 234 nm ocorreu com as menores concentrações de H₂O₂, reforçando que, para esse comprimento de onda, quantidades menores de oxidante são suficientes para atingir degradações maiores. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que o excesso de H₂O₂ pode atuar como competidor na reação com os radicais gerados, formando espécies menos reativas, como radicais superóxidos ou hidroperoxilas, por exemplo (Wang *et al.* 2022) (22).

Por outro lado, ao analisar a variação da concentração de ferro (Fe), Figura 5 (b), de 0,5 mg·L⁻¹ até 5,0 mg·L⁻¹, nota-se um crescimento rápido da degradação entre 0,5 e 1,0 mg·L⁻¹, passando de cerca de 75% para 90% em 234 nm, de 80% para 95% em 312 nm e de 98% para 100% em 484 nm. Entretanto, os resultados obtidos entre a concentração de 2,0 e 5,0 mg·L⁻¹ apresentaram ganhos sutis e pouco significativos, sugerindo que o excesso de Fe pode levar à formação de espécies de menor reatividade o que diminui a eficiência do tratamento proposto (Lin *et al.* 2025) (23).

Desta forma, optou-se por seguir com a concentração de 1 mg·L⁻¹ de Fe. Resultados semelhantes foram obtidos por Shen, Wang e Xiao (2016) e Benjelloun *et al.* (2017) (24), e que também investigaram o efeito do aumento da quantidade de H₂O₂ para concentrações fixas de corante e catalisador na degradação de amarelo crepúsculo e roxo açai utilizando o processo foto-Fenton. Foi possível analisar que quanto maior a

quantidade de H_2O_2 maior a eficiência do processo de degradação de corantes, tendo em vista que, o H_2O_2 é o precursor dos radicais hidroxila, quanto mais radicais hidroxila são gerados, conseqüentemente acelera e intensifica a degradação.

Considerando que o aumento do volume da solução tratada pode influenciar significativamente a eficiência do processo, realizou-se um ensaio cujos resultados estão apresentados na Figura 6.

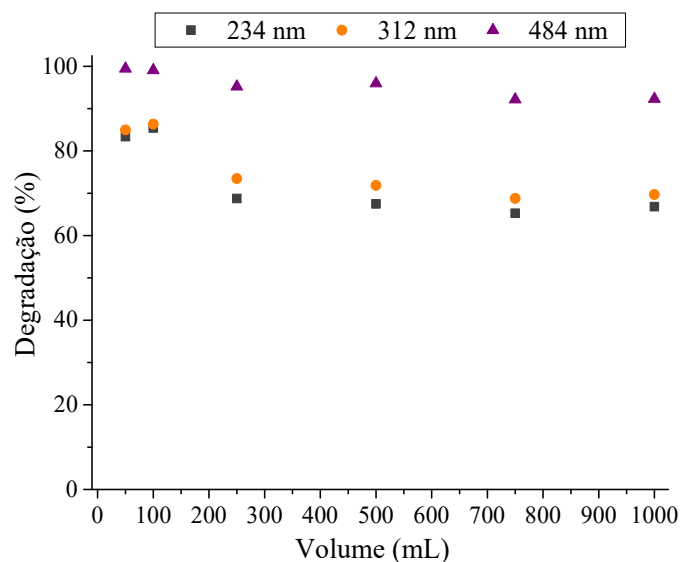


Figura 6 – Estudo da variação do volume da solução tratada com os corantes alimentícios amarelo crepúsculo e roxo açai em solução aquosa.

Fonte: as autoras (2025).

A Figura 6 evidencia que, ao elevar o volume da solução de 50 para 100 mL, a eficiência de degradação se manteve praticamente inalterada em todos os comprimentos de onda avaliados. Nos volumes superiores (200, 500, 750 e 1000 mL), observou-se uma redução nos percentuais de degradação, principalmente nos λ de 234 e 312 nm, indicando perda de desempenho do sistema em escalas maiores. Por essa razão, optou-se por realizar o estudo cinético com o volume de 100 mL, garantindo um balanço adequado entre representatividade do processo e eficiência de degradação.

Estudo da cinética de degradação e acompanhamento do consumo de H_2O_2

Com base nas condições operacionais selecionadas na etapa anterior, foi realizado o acompanhamento cinético da degradação dos corantes em solução aquosa. Sendo assim, a adequação dos dados experimentais ao modelo proposto por Chan; Chu (2010) (26), assim como os resíduos gerados pelo modelo, podem ser visualizados na Figura 7.

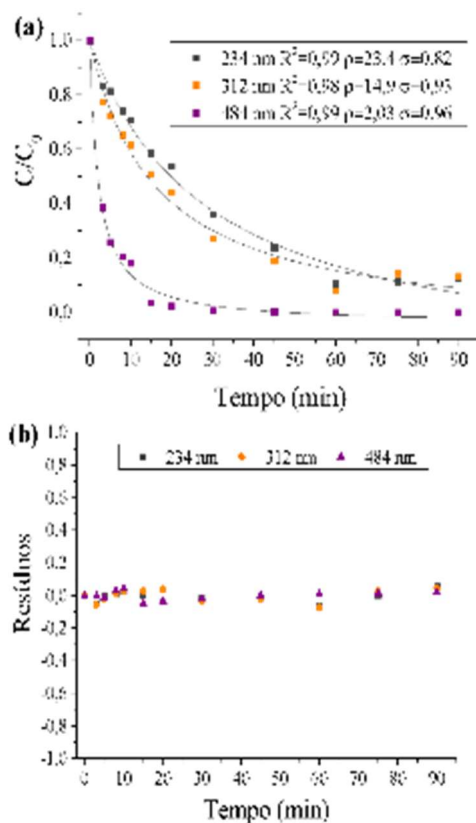


Figura 7 – (a) Acompanhamento cinético da degradação dos corantes alimentícios amarelo crepúsculo e roxo açai em solução aquosa e (b) gráfico de resíduos dos dados experimentais ao modelo de Chan; Chu (2003). Condições experimentais: $V = 100 \text{ mL}$; $(\text{H}_2\text{O}_2) = 20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $(\text{Fe}) = 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{pH} = 2\text{-}3$; $T = 29 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 1 \text{ atm}$
 Fonte: as autoras (2025).

Por meio do perfil de degradação apresentado na Figura 7 (a), verifica-se que o decaimento da concentração no λ de 484 nm aconteceu de maneira mais rápida quando comparado com os outros λ analisados, atingindo 100% de percentual de degradação nos primeiros 20 min de reação. Por outro lado, para os λ de 234 e 312 nm constatou-se cerca de 50% de degradação após 20 min. Após esse período, a degradação aconteceu de forma mais lenta seguida por uma fase de estabilização. Nota-se ainda um bom ajuste dos dados experimentais ao modelo de Chan; Chu (2003) (26), fato justificado pelos altos valores de R^2 . Corroborando com esse fato, os gráficos de resíduos (Figura 7 (b)), indicaram que os resíduos obtidos oscilaram aleatoriamente em torno da linha média, apresentando baixa dispersão.

Com o objetivo de compreender o comportamento do agente oxidante ao longo do processo de degradação, realizou-se o acompanhamento de seu consumo durante os tempos estabelecidos no ensaio cinético. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 8.

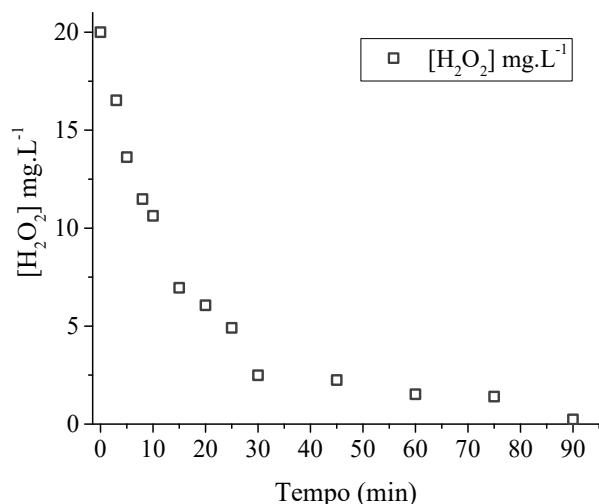


Figura 8 – Acompanhamento do consumo da (H₂O₂) mg.L⁻¹ durante a degradação dos corantes alimentícios amarelo crepúsculo e roxo açai em solução aquosa.
Fonte: as autoras (2025).

Tendo em vista os dados apresentados na Figura 8, nota-se que o H₂O₂ foi amplamente consumida ao longo do tempo reacional e que o valor utilizado (20 mg·L⁻¹) foi adequado para o processo, visto que a degradação não foi interrompida pelo consumo total do agente oxidante. Assim, é explicado o consumo mais acelerado do agente oxidante ao utilizar a radiação UV-C (26). Em seguida, foi investigada a toxicidade da solução de corantes antes e após o emprego do processo foto-Fenton.

Toxicidade

Para realização dos testes de toxicidade foram utilizadas sementes de alface (*Lactuca sativa*). Para isto, foram analisadas as soluções aquosas da mistura dos corantes amarelo crepúsculo e Roxo açai antes e após a submissão aos sistemas selecionados. Para tal, calculou-se os índices de germinação (IG) e de crescimento radicular (ICR) das amostras, cujos resultados estão apresentados na Figura 9.

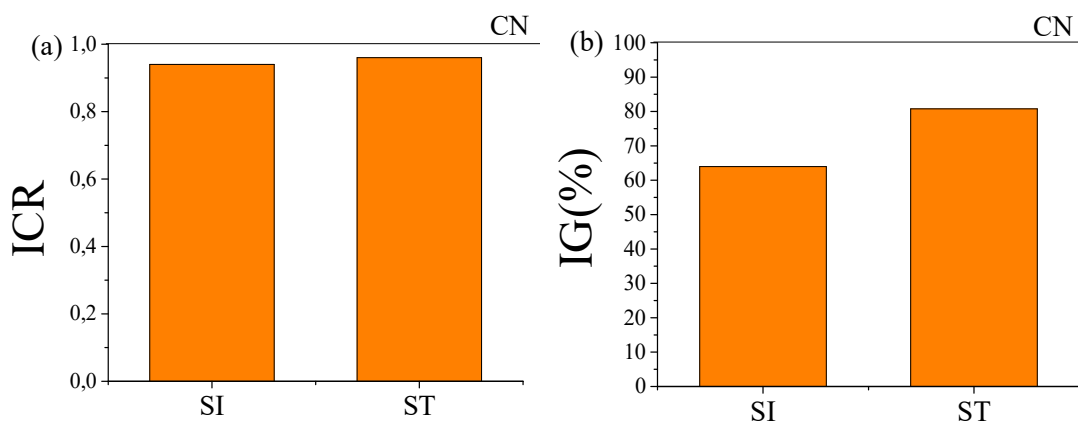


Figura 9 - Valores de (a) ICR e (b) IG (%) para o controle negativo (CN), solução inicial (dos corantes) para as amostras tratadas através do foto-Fenton/UV-C com (H₂O₂) de 20mg.L⁻¹. SI = solução inicial; ST = solução após tratamento Foto-Fenton com (H₂O₂) igual a 20 mg.L⁻¹.

Fonte: as autoras (2025).

Na Figura 9, observa-se que, antes e após o tratamento, nenhuma das soluções avaliadas provocou redução significativa no índice de crescimento radicular das sementes, indicando ausência de toxicidade sobre o desenvolvimento das raízes. Em contraste, a solução bruta de corantes apresentou diminuição acentuada no índice de germinação, sugerindo a presença de compostos tóxicos nessa amostra. Esse comportamento corrobora estudos prévios em que sistemas avançados de oxidação não apenas promovem a quebra de moléculas cromóforas, mas também reduzem significativamente a toxicidade de efluentes contendo corantes orgânicos (2).

Além disso, segundo Young e colaboradores (2012) (27), os valores de ICR podem ser classificados em três categorias, de acordo com os efeitos de toxicidade observados. São elas: 1) a inibição do alongamento da raiz ($0 < \text{ICR} < 0,8$), 2) sem efeitos significativos ($0,8 < \text{ICR} < 1,2$) e 3) estimulação do alongamento da raiz ($\text{ICR} > 1,2$). Diante disso, após o tratamento pode-se afirmar que as sementes de alface não apresentaram efeitos tóxicos significativos. Desse modo, constata-se que o tratamento reduziu a toxicidade das soluções, tornando-o menos agressivo às sementes, reforçando seu potencial como alternativa sustentável no tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos.

CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu observar que a fotólise isolada utilizando radiação UV-C, e o processo de Fenton sem irradiação apresentaram baixa eficiência na degradação dos corantes amarelo crepúsculo e roxo açai em solução aquosa, enquanto o foto-Fenton em reator de bancada com UV-C, combinando ferro como catalisador e H_2O_2 como agente oxidante, mostrou-se mais eficaz. Estes resultados foram obtidos ao fazer uso de uma (H_2O_2) de 20 mg.L^{-1} e 1 mg.L^{-1} de Fe. Durante a avaliação da cinética a degradação, percebeu-se que os grupamentos observados no λ de 484 nm foram tratados de maneira mais rápida quando comparado com os outros λ analisados (234 e 312 nm). Foi visto que os dados experimentais se ajustaram bem ao modelo proposto com Chan; Chu (2003), seguindo um perfil cinético de pseudo primeira-ordem. A concentração H_2O_2 residual após 90 min foi de $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$. Por fim, constatou-se através dos testes de toxicidade que a solução após o tratamento foto-Fenton/UV-C não apresentou toxicidade frente a semente de alface.

AGRADECIMENTOS

À FADE/UFPE e à FACEPE.

REFERÊNCIAS

1. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 306, de 5 de julho de 2002.**
2. NEVES, LUDMILA CARVALO et al. Phytotoxicity indexes and removal of color, COD, phenols and ISA from pulp and paper mill wastewater post-treated by UV/H₂O₂ and photo-Fenton. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 202, p. 110939, 2020.

3. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Relatório de Progresso dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 2022*. Nova York: ONU, 2022. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/>. Acesso em: 11 jul. 2025.
4. ESSAWY, A. A.; ALI, A. E.-H.; ABDEL-MOTTALEB, M. **Application of novel copolymerTiO₂ membranes for some textile dyes adsorptive removal from aqueous solution and photocatalytic decolorization**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 157, p. 547–552, 2008.
5. LIDON, F.; SILVESTRE, M. M. *Indústrias Alimentares. Aditivos e Tecnologia*. Portugal: Editora Ed., 2007.
6. GANIYU, S. O.; ARAUJO COSTA, E. C.; MARTINEZ-HUITLE, C. A.; SANTOS, E. V. Electro-Fenton catalyzed by Fe-rich lateritic soil for the treatment of food colorant Bordeaux Red (E123): Catalyst characterization, optimization of operating conditions and mechanism of oxidation. *Separation and Purification Technology*, 242, 116776, 2022
7. GERBER, M. D.; LUCIA, T. J.; CORREA, L.; PEREIRA, J. E. N.; CORREA, E. K.. Phytotoxicity of effluents from swine slaughterhouses using lettuce and cucumber seeds as Bioindicators. **Science of the Total Environment**, Amsterdã, v.592, p.86-90, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.075>
8. DUQUE, CARLOS HENRIQUE et al. Processos oxidativos avançados (POA) no ensino de Cinética Química: proposta de ferramenta metodológica envolvendo a Química e a Educação Ambiental. 2023.
9. MULAI, TSUNGOM, John Elisa Kumar, Ashutosh Tripathy, Mihir Kumar Sahoo, Degradation of higher concentration of food colouring dye by classical fenton oxidation: A statistical optimization, **Next Research**, Volume 2, Issue 3, 2025, 100535, ISSN 3050-4759, <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100535>.
10. CAVALCANTI, V. D. O., SANTANA, R. M. R., NEVES, N. D. C., DE LUCENA, A. L. A., DE OLIVEIRA, M. A. S., DO NASCIMENTO, G. E., & NAPOLEÃO, D. C. Treatment of the drugs atenolol and propranolol by advanced oxidation processes, a kinetic approach, toxicity effects on seeds, and chromatographic analysis. 75(8), 4391-4403, 2021.
11. CHARAMBA, L. V. C., SANTANA, R. M. R., NASCIMENTO, G. E., CHARAMBA, B. V. C., MOURA, M. C., COELHO, L. C. B. B., OLIVEIRA, J. G. C., DUARTE, M. M. M. B., NAPOLEÃO, D. C. Application of the advanced oxidative process on the degradation of the green leaf and purple açai food dyes with kinetic monitoring and artificial neural network modelling. **Water Sci Technol**. 2018; 78:1094-1103.
12. 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.
13. SANTANA, R. M. R.; NAPOLEÃO, D. C.; DUARTE, M. M. M. B. Treatment of textile matrices using Fenton processes: influence of operational parameters on degradation kinetics, ecotoxicity evaluation and application in real wastewater. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 56, n. 10, p. 1165-1178, 2021.
14. SANTANA, R. M. D. R.; NAPOLEÃO, D. C.; DUARTE, M. M. M. B. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, 56(10), 1165-1178, 2021.

15. YOUNG, B. J.; RIERA, N. I.; BEILY, M. E.; BRES, P. A.; CRESPO, D. C.; RONCO, A. E. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 76(2), 182-186, 2012.
16. GARCIA J. C.; SIMIONATO J. I.; ALMEIDA V. C.; PALÁCIO S. M.; ROSSI F. L.; SCHNEIDER M. V.; SOUZA N. E.. Evolutive Follow-up of the Photocatalytic Degradation of Real Textile Effluents in TiO₂ and TiO₂/H₂O₂ Systems and their Toxic Effects on Lactuca sativa Seedlings. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 9, p. 1589-1597, 2009.
17. NASCIMENTO, G. E.; CAVALCANTI, V. O. M.; SANTANA, R. M. R.; Sales, D. C. S.; Rodríguez-Díaz, J. M.; Napoleão, D. C.; Duarte, M. M. M. B. Degradation of a sunset yellow and tartrazine dye mixture: optimization using statistical design and empirical mathematical modeling. **Water, Air, & Soil Pollution**, 231, 1-17, 2020.
18. BRASIL, Ministério da Saúde. Resolução RDC nº166, de 24 de julho de 2017. Agência Nacional de Vigilância Sanitária - (ANVISA). Brasília, DF, 2017.
19. MULAI, TSUNGOM et al. Degradation of Higher Concentration of Food Colouring Dye by Classical Fenton Oxidation: A Statistical Optimization. **Next Research**, p. 100535, 2025.
20. INOARGOTE-CHANG, MILTON HORACIO et al. Photo-Fenton process for the degradation of blue 1 dye and estradiol benzoate hormone in binary system: application of sunlight and UV-C radiation. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 6, p. 100226, 2022.
21. SUHAN, Md Burhan Kabir et al. Sudan black B dye degradation in aqueous solution by Fenton oxidation process: Kinetics and cost analysis. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 4, p. 100126, 2021.
22. WANG, Fu-Xue et al. Efficient removal of emerging organic contaminants via photo-Fenton process over micron-sized Fe-MOF sheet. **Chemical Engineering Journal**, v. 429, p. 132495, 2022.
23. LIN, YIMIN et al. The profound review of Fenton process: What's the next step?. **Journal of Environmental Sciences**, v. 147, p. 114-130, 2025.
24. SHEN, Y.; WANG, W.; XIAO, K. Synthesis of three-dimensional carbon felt supported TiO₂ monoliths for photocatalytic degradation of methyl orange. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1259–1266, 2016.
25. CHAN, Kwai Hing; CHU, Wei. Modeling the reaction kinetics of Fenton's process on the removal of atrazine. **Chemosphere**, v. 51, n. 4, p. 305-311, 2003.
26. MORAES, N. F.; SANTANA, R. M.; GOMES, R. K.; JÚNIOR, S. G. S.; DE LUCENA, A. L.; ZAIDAN, L. E.; NAPOLEÃO, D. C. Performance verification of different advanced oxidation processes in the degradation of the dye acid violet 17: reaction kinetics, toxicity and degradation prediction by artificial neural networks. **Chemical Papers**. v. 75 n. 2, p. 539-552, 2020.
27. YOUNG, B. J.; RIERA, N. I.; BEILY, M. E.; BRES, P. A.; CRESPO, D. C.; RONCO, A. E. Toxicity of the effluent from an anaerobic bioreactor treating cereal residues on Lactuca sativa. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 76, n. 2, p. 182-186, 2012.