

# DEGRADAÇÃO DA MISTURA DOS CORANTES ALIMENTÍCIOS VERMELHO BOURDEAUX E VERDE RÁPIDO POR PROCESSO FOTO-FENTON HETEROGÊNEO

## DEGRADATION OF THE FOOD COLORING MIXTURE BOURDEAUX RED AND FAST GREEN BY HETEROGENEOUS PHOTO-FENTON PROCESS

DOI: 10.65747/conali2025v1c12

Maria Clara Barbosa Nascimento<sup>1</sup>; Marina Gomes Silva<sup>2</sup>; Alice Maria Zeferino dos Santos<sup>3</sup>, Gabriel Paiva Ourem<sup>4</sup>, Glória Maria Vinhas<sup>5</sup>, Daniella Carla Napoleão<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Estudante do Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas, UFRPE; <sup>2</sup>Pesquisador do Depto de Engenharia Química, UFPE; <sup>3</sup>Estudante do Curso de Engenharia Química, UFPE; <sup>4</sup>Pesquisador do Depto de Engenharia Química, UFPE; <sup>5</sup>Docente do Depto de Engenharia Química, UFPE; <sup>6</sup>Docente do Depto de Engenharia Química, UFPE.

Contato: mariaclara.nascimento@ufrpe.br

**Resumo:** Os aditivos utilizados em alimentos industrializados como conservantes e corantes estão entre os contaminantes que têm causado problemas ambientais, visto que apresentam estruturas complexas que lhes conferem alta estabilidade físico-química, tornando-os persistentes no meio ambiente. Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência da degradação da mistura de corantes vermelho bordeaux e verde rápido a partir do processo foto-Fenton heterogêneo, empregando magnetita sintetizada como catalisador e radiação do tipo UV-C. Inicialmente foi avaliada a capacidade adsorptiva do catalisador, durante 60 min, obtendo-se valores irrelevantes para a remoção dos poluentes. Em seguida, avaliou-se a influência da concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> na degradação dos contaminantes, em que 90 mg·L<sup>-1</sup> conduziu ao maior percentual de degradação (27, 86 e 92% para os grupamentos monitorados em 213, 529 e 624 nm). Posteriormente, foi verificada a influência da concentração do catalisador em que 0,5 g·L<sup>-1</sup> foi o valor selecionado que promoveu maior eficiência do tratamento. Por fim, os dados obtidos do acompanhamento cinético apresentaram um ajuste satisfatório ao modelo proposto por Nichela *et al.*, (33), sugerindo uma cinética de pseudo-primeira ordem. Desse modo, fica evidente que o processo foto-Fenton heterogêneo, empregando magnetita, apresenta potencial para degradação dos corantes alimentícios em estudo.

**Palavras-chave:** Magnetita, Modelos cinéticos, POA.

**Abstract:** Additives used in processed foods, such as preservatives and colorants, are among the contaminants that have caused environmental problems. Their complex structures confer high physical and chemical stability, making them persistent in the environment. Therefore, the objective of this study was to evaluate the degradation efficiency of a mixture of Bordeaux red and Fast Green dyes using the heterogeneous photo-Fenton process, using synthesized magnetite as a catalyst and UV-C radiation. Initially, the adsorptive capacity of the catalyst was evaluated for 60 min, yielding values that were irrelevant for pollutant removal. Subsequently, the influence of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration on contaminant degradation was evaluated, with 90 mg·L<sup>-1</sup> leading to the highest degradation rates (27, 86, and 92% for the groups monitored at 213, 529, and 624 nm). Subsequently, the influence of the catalyst concentration was verified, with 0.5 g·L<sup>-1</sup> being the value selected to promote greater treatment efficiency. Finally, the data obtained from the kinetic monitoring presented a satisfactory fit to the model proposed by Nichela *et al.*, (33), suggesting pseudo-first-order kinetics. Thus, it is evident that the heterogeneous photo-Fenton process, using magnetite, has the potential to degrade the food dyes under study.

**Keywords:** Magnetite, Kinetic Models, AOP.

## INTRODUÇÃO

O crescimento populacional acelerado, especialmente no último século, proporcionou o aumento da demanda por bens de consumo, alimentos processados, medicamentos, vestuário e embalagens, que ocasionou a expansão e diversificação do parque industrial mundial (1). Essa realidade, colaborou para a expansão das linhas de produção que adotaram processos automatizados e eficientes a fim de não apenas aumentar a fabricação, mas também oferecer produtos com durabilidade, alto valor agregado, estética agradável e aceitação dos consumidores diante de um setor cada vez mais competitivo e diversificado (2).

Nesse contexto, destaca-se a indústria de alimentos que acompanha a evolução do parque industrial por meio da complexidade e diversidade de seus processos que englobam desde alimentos frescos minimamente processados, até produtos ultraprocessados com vida útil longa (3). Essa amplitude reflete a capacidade de atender às necessidades do mercado, mas também à evolução tecnológica que envolve, por exemplo, técnicas de conservação e incorporação de aditivos como corantes e antioxidantes na busca pela padronização sensorial e estabilidade físico-química (4).

Em contrapartida, a utilização dessas substâncias tem gerado preocupações com relação à saúde pública e seus impactos ambientais. Apesar da eficiência na manutenção do alimento como na aparência e sabor, muitos desses compostos apresentam baixa degradabilidade (5). Em casos de despejos de efluentes, podem se acumular no ambiente e causar problemas como distúrbios metabólicos, mas também no ecossistema natural de corpos hídricos, que promove a morte de animais e o desequilíbrio ambiental (6). Estas águas residuais, por sua vez, têm apresentado em sua constituição compostos orgânicos sintéticos como pesticidas, fármacos e corantes sintéticos, que são responsáveis por essa problemática (7).

Dentre os poluentes citados, destacam-se os corantes. Esses, são substâncias naturais, sintéticas ou artificiais produzidas quimicamente a partir de derivados petroquímicos como a tartrazina (E 102) e o amarantho (E 123), que se destacam pela alta estabilidade térmica, solubilidade, intensidade de cor e baixo custo (8). Além disso, existem também os extraídos de fontes naturais como os vegetais, animais ou minerais como a beterraba e a cúrcuma que vêm ganhando espaço devido à crescente demanda por produtos mais saudáveis e sustentáveis (9).

Outros corantes que se destacam na indústria alimentícia são o vermelho de bordeaux (VB) e o verde rápido (VR), que apresentam características químicas e propriedades que possibilitam a estabilidade físico-química dos produtos alimentícios a fim de conferir as necessidades desejadas pela indústria e seus consumidores (10). Esses compostos apresentam características como boa solubilidade em água, resistência a luz e calor, que os tornaram úteis na formulação de produtos como doces, xaropes, bebidas e balas (11).

O corante VB, pertence à classe dos corantes tipo azo (N=N) obtido pela diazotação do ácido 4-amino-1-naftaleno sulfônico com o ácido 3-hidroxi-2,7-naftaleno dissulfônico com coloração vermelho-púrpura intenso, tornando-se rosado em soluções diluídas (12). O VR, por sua vez, é um corante do tipo triarilmetano de tonalidade azul-esverdeada que apresenta em sua cadeia central três anéis aromáticos ligados a um átomo de carbono central (C-tri-substituído) (13). Este é obtido a partir da síntese química orgânica, no qual os anéis são funcionalizados com grupos sulfonatos ( $-\text{SO}_3\text{Na}$ ) para torná-lo solúvel em água, e com grupos amino ( $-\text{NH}_2$ ) ou substituintes que conferem cor e estabilidade (14). Nesse contexto, o VR é valorizado, especialmente, para produtos que sofrem variações durante o armazenamento, devido a sua alta estabilidade à luz e pH. No entanto, assim como o vermelho de bordeaux, é alvo de restrições regulatórias como os da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (15). Dentre elas, destaca-se a Resolução RDC nº 778/2023 que autoriza sua utilização de forma restrita e específica para alimentos como confeitos e balas com limite máximo de 50 mg por quilograma do produto (16).

Além dessas características, os corantes, especialmente o verde rápido, são considerados um poluente recalcitrante, ou seja, resistente a métodos biológicos tradicionais de degradação devido às suas estruturas complexas que dificultam a remoção por processos de digestão aeróbica, filtração e coagulação (17). Nesse sentido, a presença desses em efluentes exige de tecnologias e tratamentos avançados capazes de romper com suas ligações e reduzir seus potenciais tóxicos (18).

Dentre as tecnologias existentes, destacam-se os processos oxidativos avançados (POA) que se baseiam na geração de agentes oxidantes altamente reativos e não seletivos como o radical hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) capazes de interagir com diferentes tipos de poluentes e promover sua degradação total ou parcial em tempos relativamente curtos (19). Esses processos envolvem uma série de tecnologias que rompem as ligações químicas de moléculas complexas em substâncias mais simples ou completamente mineralizadas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e sais inorgânicos) (20). Dentre os principais tipos de POA, destacam-se o foto-Fenton que utiliza peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e íons ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) para gerar radicais hidroxila, na presença de radiação, para reagir com poluentes em meio aquoso (21). Dessa forma, os POA são técnicas alternativas que vêm sendo exploradas visto que apresentam alta eficiência na destruição de poluentes, bem como devido à sua versatilidade aos diferentes tipos de corantes presentes em efluentes distintos (22).

Esse tipo de POA apresenta grande relevância por substituir catalisadores homogêneos, como o íon ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), por sólidos heterogêneos, que também podem ser empregados de forma conjunta com o peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Isso se dá por meio da aplicação de materiais como os óxidos de ferro (como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) na presença de radiação ultravioleta (UV) ou luz visível (23). Assim, a luz promove a excitação do ferro, provocando a geração de espécies reativas que agem nos poluentes orgânicos, degradando-os (24).

Dentre as principais vantagens do sistema foto-Fenton, destacam-se a redução de custos operacionais e do impacto ambiental, visto que possibilitam a recuperação e reutilização do catalisador, bem como a menor toxicidade residual devido à separação do catalisador sólido com o meio tratado por processos simples como a filtração (25). Zhang e colaboradores (26), por exemplo, obtiveram a degradação de 92% de corante laranja de metila presente em efluentes têxteis ao utilizar catalisador heterogêneo por pirólise. Além desses, o estudo de Castro *et al.*, (27) promoveu a otimização de dose de catalisador, concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e pH, e obteve 100% de degradação em pH 4 e 91% em pH 10. Dessa forma, fica evidente a importância e contribuições desse processo oxidativo avançado na busca por processos industriais mais sustentáveis e seguros.

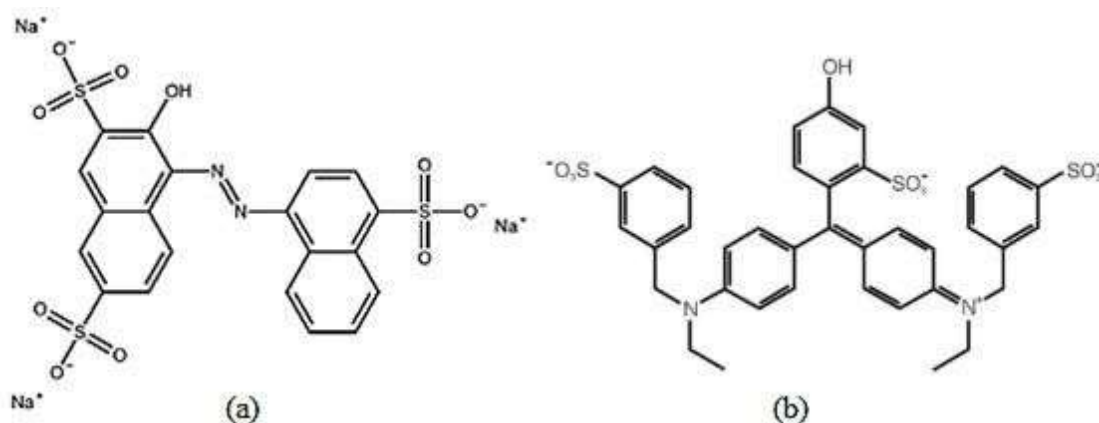
Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência de degradação da mistura dos corantes alimentícios vermelho de bordeaux e verde rápido em solução aquosa, empregando a magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) como catalisador no processo foto-Fenton heterogêneo como alternativa para o tratamento dos resíduos das indústrias alimentícias.

## METODOLOGIA

### IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS ANALITOS

Inicialmente, foi preparada uma solução estoque da mistura dos corantes vermelho bordeaux e verde rápido, com estruturas químicas apresentadas na Figura 1, a uma concentração de 1000 mg·L<sup>-1</sup>. A partir disso, os contaminantes foram identificados e quantificados pela técnica de espectrofotometria de absorção molecular na região do ultravioleta/visível (UV/Vis) (Metash UV-5100). Vale ressaltar que a varredura espectral foi realizada na faixa de 200 a 700 nm, com intuito de identificar os picos característicos ( $\lambda$ ).

Figura 1 – Estrutura química do corante (a) vermelho bordeaux e (b) verde rápido



Fonte: adaptado de Andrade *et al.* (28) e Xu *et al.* (29).

Após identificar os  $\lambda$ , foram construídas as curvas analíticas com faixa linear de 1 até 20 mg·L<sup>-1</sup>

<sup>1</sup> para realizar a quantificação dos analitos antes e após os tratamentos.

## TRATAMENTO VIA FOTO-FENTON HETEROGÊNEO

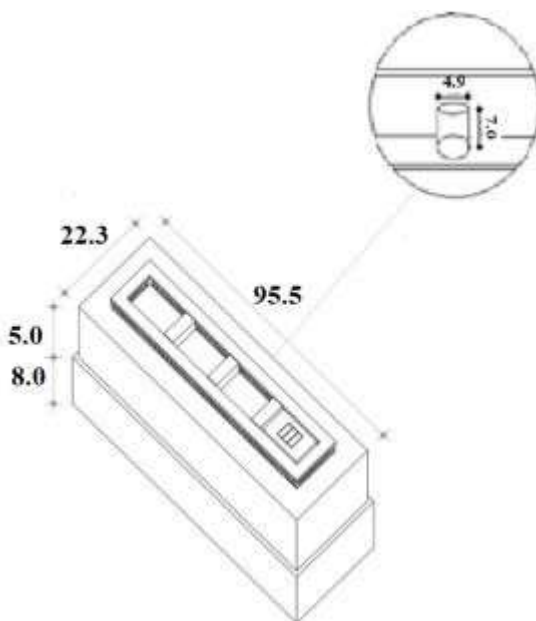
O estudo preliminar consistiu em preparar uma solução aquosa da mistura de corantes em estudo com concentração de  $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de cada. Para essa etapa do tratamento, os reagentes utilizados foram peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 30% V/V e magnetita sintetizada ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) como fonte de ferro.

A síntese da magnetita foi realizada com base na metodologia descrita por Unal *et al.* (30). Esta emprega uma mistura de soluções de cloreto férrico hexa-hidratado ( $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (Neon) ( $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) e sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) (Dinâmica) ( $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) (F Maia), preparado em ácido clorídrico (HCl) (Merck)  $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , em uma proporção de 4:1 (V:V), respectivamente. Em seguida, a mistura das soluções supracitadas foi transferidas para a solução de hidróxido de amônio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) (Química Moderna, 30%) ( $0,7 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , pH 11), sob agitação, a uma temperatura de  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , durante 1 h, empregando agitador magnético (Tecnal) com bastão magnético (2 cm). Após esse período, a solução foi filtrada para separação do catalisador da fase líquida.

De posse do catalisador, verificou-se o contributo do processo adsorptivo na estrutura da magnetita durante o tratamento da mistura dos corantes via Foto-Fenton. Para isso, béqueres contendo 50 mL da solução aquosa da mistura de corantes e  $0,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de catalisador foram mantidos sob ausência de radiação durante 60 min. Por fim, os contaminantes foram identificados e quantificados pela técnica de espectrometria na região ultravioleta/visível (UV/Vis) (Metash UV-5100).

Além disso, também foi verificado o contributo da fotólise na degradação dos contaminantes. Dessa forma, os experimentos foram realizados em batelada, em béqueres, durante 60 min e volume de solução de 50 mL. A radiação empregada nesse estudo foi UV- C, a qual estava inserida em uma câmara de radiação revestida com folha de alumínio equipada com três lâmpadas UV-C, 30 W e 90 cm cada (Philips, dispostas em paralelo) (Figura 2).

Figura 2 – Desenho esquemático da câmara de radiação equipados com lâmpadas UV-C, com cotas em cm.



Fonte: adaptado de Cavalcanti *et al.* (31).

A câmara de radiação apresentada na Figura 2 foi utilizada para os tratamentos de fotólise e foto-Fenton heterogêneo. Inicialmente, a concentração do catalisador ((catalisador)) foi fixada em  $0,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  e a concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) variada de 30 a  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , com pH da solução aquosa natural (5), tendo em vista que os sistemas heterogêneos visam expandir a faixa de pH de trabalho. Após selecionar a ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) que conduziu ao maior percentual de degradação, seguiu-se para avaliação da influência da (catalisador) no processo. Sendo assim, a (catalisador) foi variada em 0,25; 0,50; 0,75 e  $1,00 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Diante disso, foi possível selecionar as condições experimentais que promoveram as maiores eficiências de tratamento. Em seguida, foi realizado o acompanhamento cinético de degradação dos corantes.

## ESTUDO CINÉTICO

A partir das condições experimentais selecionadas foi realizado o acompanhamento cinético, o qual foi feito utilizando um reator (béquer) com 50 mL de solução para cada tempo da cinética (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 45, 60, 90 e 120 min). Em seguida, os dados obtidos durante o acompanhamento da cinética de degradação foram testados para os modelos cinéticos de Chan e Chu (32) e Nichela *et al.*, (33), conforme as Equações 1 e 2, respectivamente.

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

$$\frac{[C]}{[C_0]} = \frac{1 - a \cdot t - D}{1 + \left(\frac{t}{b}\right)C} + D \quad (2)$$

Em que:  $C$  é a concentração num instante de tempo,  $C_0$  é a concentração inicial,  $\rho$  é a reacional (min),  $\sigma$  é a capacidade oxidativa (adimensional),  $a$  ( $\text{min}^{-1}$ ) a taxa média de oxidação (taxa inicial aparente),  $b$  (min) 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.

## RESULTADO E DISCUSSÃO

### IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO ANALITO

Inicialmente, a fim de verificar os comprimentos de onda característicos ( $\lambda$ ) para a solução aquosa contendo a mistura dos corantes VB e VR, realizou-se uma varredura espectral de 200 a 700 nm. O espectro obtido está apresentado na Figura 3.

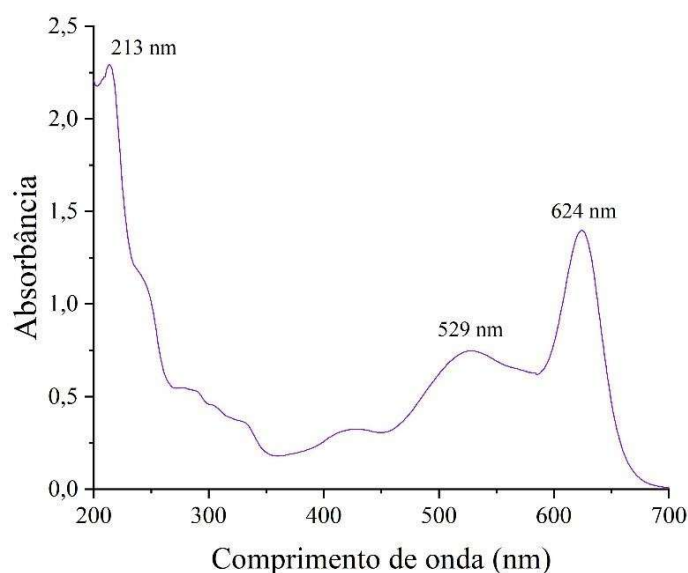


Figura 3 – Espectro de UV/Vis da solução contendo a mistura dos corantes vermelho bourdeaux e verde rápido

Fonte: Autores, 2025.

Diante da Figura 3, nota-se a presença de três picos nos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) de 213, 529 e 624 nm. O primeiro  $\lambda$  é referente aos grupos dos aromáticos, enquanto os outros dois representam os grupamentos cromóforos (34). Dessa forma, foram selecionados os 3  $\lambda$  supracitados para serem acompanhados durante a degradação da mistura dos corantes alimentícios VB e VR.

Diante disso, foram construídas curvas analíticas para quantificar as concentrações nos determinados  $\lambda$ , cujos coeficientes de correlação ( $r$ ) foram, respectivamente, 0,99; 0,99 e 0,98 para 266, 337 e 664 nm. Segundo o INMETRO (35) valores de  $r$  elevados são um bom indicativo de que a equação da reta é adequada como modelo matemático, atestando a linearidade do

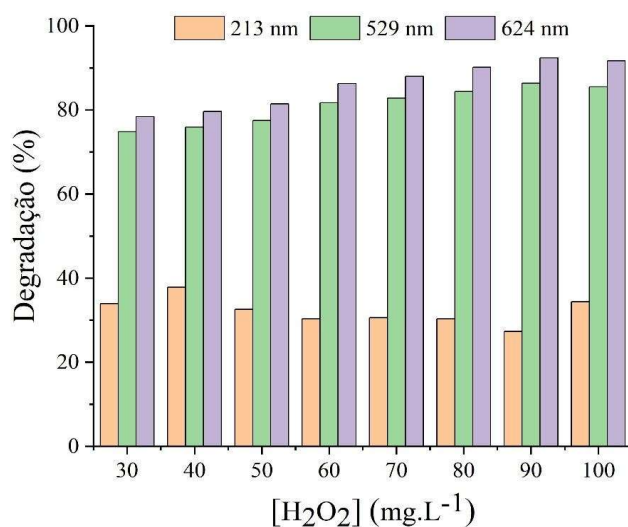
método.

## TRATAMENTO VIA FOTO-FENTON HETEROGÊNEO

Após a produção do catalisador, verificou-se que a magnetita apresentou baixa capacidade adsortiva para os corantes VB e VR, após 60 min, com porcentagens de remoção de 7,84; 7,37 e 9,47% para os respectivos  $\lambda$  de 213, 529 e 624 nm. Além disso, avaliou-se o contributo da fotólise na degradação dos contaminantes, também durante 60 min, com porcentagens de degradação de 7,46; 14,29 e 12,86 % para os grupos monitorados nos  $\lambda$  de 213, 529 e 624 nm respectivamente.

Diante disso, seguiu-se para a avaliação da influência da ( $H_2O_2$ ) na degradação da mistura de corantes pelo processo foto-Fenton heterogêneo empregando magnetita como catalisador na concentração fixa de  $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ . Ademais, os estudos foram conduzidos no pH natural da solução ( $\text{pH} = 5$ ), uma vez que os POA heterogêneos visam ampliar a faixa de pH de degradação a fim de evitar o uso de ácidos e bases nos sistemas, reduzindo assim os custos dos tratamentos propostos (31). Os resultados obtidos, após 60 min de degradação sob radiação UV-C, estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Estudo da influência da ( $H_2O_2$ ) para degradação da mistura de corantes VB e VR



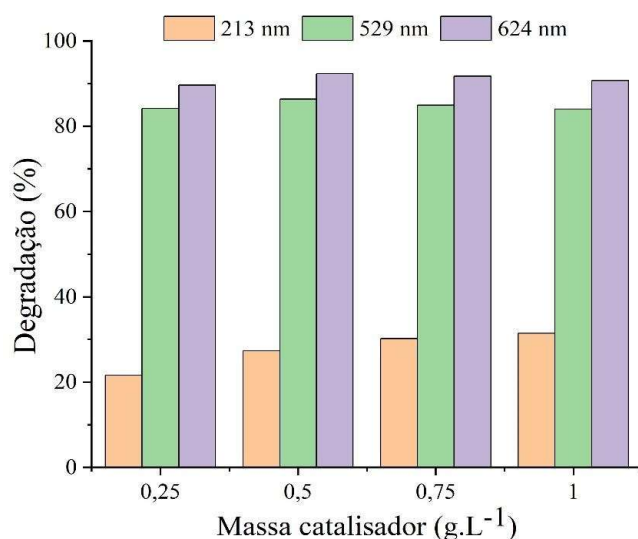
Fonte: Autores, 2025.

De acordo com a Figura 4, nota-se que as porcentagens de degradação crescem à medida que se aumenta a ( $H_2O_2$ ), atingindo seu máximo em  $90 \text{ mg.L}^{-1}$  para o grupamento dos cromóforos. Esta concentração conduziu a degradações de, aproximadamente, 27, 86 e 92% para os  $\lambda$  de 213, 529 e 624 nm, respectivamente. Isto pode ser atrelado ao aumento de radicais  $HO\cdot$  no sistema que favorece a degradação dos contaminantes VB e VR (36). Entretanto, ao aumentar a concentração para  $100 \text{ mg.L}^{-1}$ , percebeu-se uma queda na eficiência de degradação, especificamente para os grupamentos cromóforos. Esse comportamento pode

estar relacionado com o fato de a adição de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em excesso beneficiar a formação de radicais hidroxilas (HO<sub>2</sub>•), que atuam sequestrando os radicais HO• e têm menor potencial oxidativo (Ayed *et al.*, 2021), indicando que a concentração de 90 mg.L<sup>-1</sup> é a dita concentração limite de oxidante para o tratamento dos corantes em estudo.

Após selecionar a (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) que conduziu ao maior percentual de degradação dos corantes alimentícios VB e VR, avaliou-se a influência da concentração do catalisador (magnetita) no processo. Para esse estudo, foram mantidas as condições de pH natural da solução (pH = 5) e (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) de 90 mg.L<sup>-1</sup>, com duração de 60 min, cujos resultados estão apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Degradação da mistura dos corantes VB e VR em diferentes concentrações de catalisador



Fonte: Autores, 2025.

Diante da Figura 5, é possível observar um aumento na eficiência de degradação dos contaminantes à medida que se aumenta a concentração da magnetita de 0,25 para 0,5 g.L<sup>-1</sup>. Esse crescimento na eficiência catalítica foi de aproximadamente 6,2 e 3% para os  $\lambda$  de 213, 529 e 624 nm, respectivamente. Isso pode ser atribuído ao aumento do número de sítios ativos disponíveis na superfície do catalisador para ativação de agente oxidante (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (23).

Em contrapartida, ao comparar a eficiência catalítica dos sistemas contendo 0,5 e 1,0 g.L<sup>-1</sup>, observa-se que a degradação dos corantes VB e VR passou de 27, 86 e 92% para 31, 84 e 90%, respectivamente, para os  $\lambda$  de 213, 529 e 624 nm. Ou seja, é possível perceber que à medida que se aumentou ainda mais a concentração do catalisador houve uma diminuição na degradação dos contaminantes. Isso possivelmente ocorreu devido ao excesso de catalisador no sistema que levou ao aumento da turbidez e reduziu a absorção e o espalhamento de luz pelo catalisador (37). Li *et al.* (1) também utilizaram a concentração de 0,5 g.L<sup>-1</sup> de um catalisador

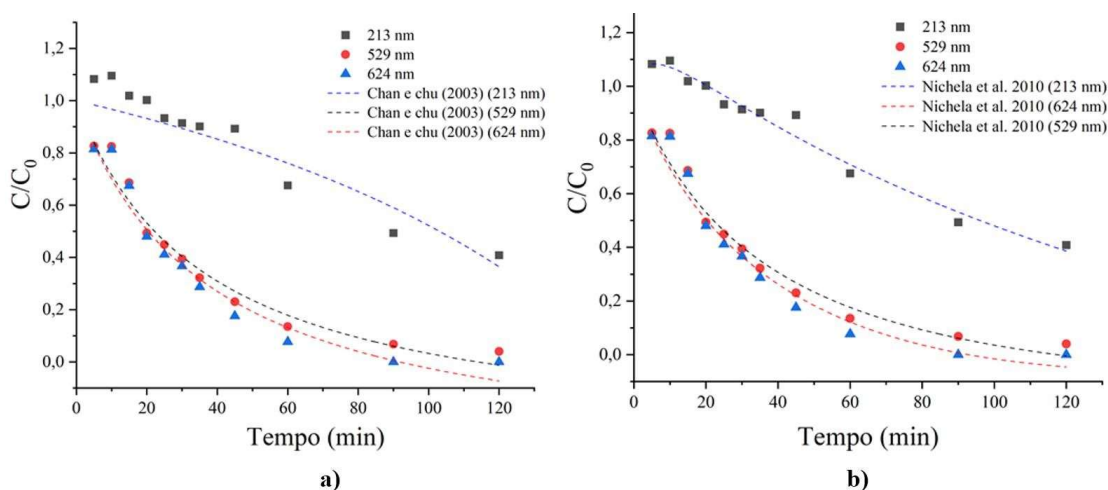
heterogêneo, produzido a partir de um subproduto do processo de extração de alumina do minério de bauxita, para degradar o fármaco tetraciclina por processo foto-Fenton.

De posse das melhores condições operacionais do sistema foto-Fenton/magnetita, passou-se a etapa de avaliação da cinética reacional.

## ESTUDO CINÉTICO

Após a otimização dos parâmetros, monitorou-se a cinética reacional do processo foto-Fenton heterogêneo, utilizando a ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) de  $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de magnetita como catalisador e pH natural da solução (pH=5) por 120 min. Em seguida, os dados obtidos foram ajustados aos modelos cinéticos propostos por Chan e Chu (32) e Nichela *et al.*, (33), conforme apresentado na Figura 6 a) e b), respectivamente.

Figura 6 – Ajuste cinético aos modelos a) Chan e Chu (32) e b) Nichela *et al.* (33).  
Condições:  $V = 50 \text{ mL}$  de solução da mistura de corantes, pH = 5, ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) =  $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $T = 31 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $p = 1 \text{ atm}$ .



A partir da Figura 6, observa-se que a taxa de decaimento é mais acentuada nos primeiros 45 min de experimento para os grupamentos cromóforos ( $\lambda = 529$  e  $624 \text{ nm}$ ). Em contrapartida, verifica-se que os grupamentos aromáticos ( $\lambda = 213 \text{ nm}$ ) apresentaram uma menor taxa de decaimento, possivelmente, devido ao fato de as ligações dos anéis aromáticos serem mais difíceis de quebrar. Assim, após 120 min de degradação, o sistema foto-Fenton heterogêneo apresentou uma eficiência catalítica de 59, 96 e 100% para os  $\lambda$  de 213, 529 e 624 nm, respectivamente. Analisando o comportamento dos cromóforos é possível constatar uma degradação em dois estágios: 1- rápido decaimento até 30 min e 2- decaimento lento até estabilização após 90 min. Além do exposto, os parâmetros dos ajustes dos dados aos modelos cinéticos de Chan e Chu (32) e Nichela *et al.*, (33) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros cinéticos e coeficientes de regressão linear para os modelos propostos

Modelos	Parâmetros	$\lambda = 213 \text{ nm}$	$\lambda = 529 \text{ nm}$	$\lambda = 624 \text{ nm}$
Chan e Chu (32)	$1/\rho \text{ (min}^{-1}\text{)}$	0,003	0,036	0,038
	$1/\sigma$	0,967	1,321	1,402
	$R^2$	0,88	0,96	0,96
Nichela <i>et al.</i> (33)	$a \text{ (min}^{-1}\text{)}$	0,090	0,558	0,320
	$b \text{ (min)}$	36,644	52,919	112,792
	$C$	0,863	1,005	1,020
	$D$	4,061	29,000	35,023
	$R^2$	0,94	0,95	0,95

Fonte: Autores, 2025

Diante da Tabela 1, é possível observar que os dados obtidos na cinética de degradação dos cromóforos ( $\lambda$  de 529 e 624 nm) apresentaram bons ajustes aos dois modelos utilizados. Isso porque os valores dos coeficientes de regressão linear ( $R^2$ ) foram maiores que  $\geq 0,95$  para os dois modelos testados. Para o modelo de Chan e Chu (32), verifica-se que a taxa de oxidação ( $1/\rho$ ) das moléculas dos corantes VB e VR apresentam valores bem próximos. No trabalho desenvolvido por Santana *et al.* (38), os dados cinéticos obtidos da degradação de corantes por magnetita, via foto-Fenton, também foram bem ajustados a modelos de pseudo-primeira ordem.

Quanto ao modelo de Nichela *et al.*, (33), verifica-se que houve um bom ajuste dos dados cinéticos de todos os  $\lambda$  estudados, com  $R^2 \geq 0,94$ . Esse modelo sugere que a degradação do contaminante ocorre em duas etapas: uma fase inicial lenta, seguida por uma fase mais rápida, corroborando o que foi observado na análise da Figura 6. Diante da Tabela 1, é possível notar que a taxa média de oxidação ( $a$ ) para os grupamentos cromóforos é maior do que para os compostos aromáticos, reforçando mais uma vez que as ligações dos anéis aromáticos são mais difíceis de serem degradadas (39).

## CONCLUSÕES

O processo foto-Fenton heterogêneo, empregando a magnetita como catalisador, demonstrou ser eficiente na degradação da mistura dos corantes alimentícios vermelho bordeaux e verde rápido. Esse fato indica que a metodologia da síntese da magnetita se mostrou eficiente, produzindo um material com características catalíticas que conduziram ao aumento da eficiência do tratamento. Além disso, o material catalítico apresentou baixa capacidade adsorptiva para todos os  $\lambda$  avaliados. Ademais, a fotólise apresentou um baixo

contributo na degradação dos contaminantes. Diante disso, ao adicionar e selecionar os reagentes de Fenton (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e catalisador à base de ferro) ao sistema foi alcançado 27, 86 e 92% de degradação para 213, 529 e 624 nm, respectivamente. Por fim, foi realizado o acompanhamento cinético em que os dados apresentaram um bom ajuste ao modelo proposto por Nichela *et al.* (33), sobretudo no que diz respeito aos grupamentos aromáticos. Sendo assim, o processo de tratamento proposto, bem como a síntese da magnetita apresentam potencial para degradação dos corantes alimentícios vermelho bordeaux e verde rápido.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE).

## REFERÊNCIAS

1. LI, T et al. High removal efficiency of antibiotic and dyes by heterogeneous photo-Fenton process using red mud and waste Maotai distillers' grains as catalyst precursors. **Applied Surface Science**, v. 692, 2025.
2. BAI, C. et al. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 229, 2020.
3. BARROS, J. R. et al. Conservação de alimentos pelo uso de aditivos: uma revisão. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 37, n. 2, 2021.
4. SILVA, A. B. et al. Industrialização de alimentos: processos, técnicas e impactos. **Observatório da Economia Latino-americana**, v. 22, n. 12, p. 1-19, 2024.
5. PESSOA JÚNIOR, W. A. G.; AZEVEDO, F. R. P. Corantes sintéticos e seus impactos ambientais: desafios, legislação e inovações tecnológicas sustentáveis. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 10, n. 12, 2022.
6. LIN, J. et al. Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. **Nature Reviews Earth & Environment**, V. 4, N. 11, P. 785-803, 2023.
7. BRILLAS, E. A review on the photoelectro-Fenton process as efficient electrochemical advanced oxidation for wastewater remediation. Treatment with UV light, sunlight, and coupling with conventional and other photo-assisted advanced technologies, **Chemosphere**, v. 250, 2020.
8. MORATO, D. T.; PEREIRA, L.; SANTOS, J. B. Natural food colorants and preservatives: a review, a demand, and a challenge. **Foods**, v. 11, p. 1021–1038, 2022.
9. PRAJAPATI, R. A.; JADEJA, G. C. Natural pigments: anthocyanins, carotenoids, chlorophylls, and betalains as colorants in food products. **Food Bioscience**, v. 52, 2023.
10. SANTOS, M. A. R.; LIMA, G. M.; FREITAS, S. B. Propriedades físico-químicas e toxicidade do corante Fast Green FCF: uma revisão. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 38, 2021.
11. PEREIRA, A. C.; GONÇALVES, E. R.; ALMEIDA, P. F. Comparação de estabilizantes e

- corantes sintéticos e naturais na indústria de alimentos. **Food Science and Technology**, v. 45, n. 3, p. 399-412, 2023.
12. OLIVEIRA, R. S.; CASTRO, J. S.; MELO, L. V. Avaliação toxicológica e regulatória do corante Vermelho de Bordeaux em produtos alimentícios. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 42, 2022.
  13. ALI, M. A.; BASHIER, S. A. Electro-oxidation of a food dye: Fast Green FCF and its analytical applications. **Analytical & Bioanalytical Electrochemistry**, v. 8, n. 1, p. 38–50, 2021.
  14. PREMA, P. et al. Kinetics of oxidation of Fast Green FCF dye with 1-chlorobenzotriazole in alkaline medium: mechanistic and spectrophotometric study. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, 2022.
  15. SMITH, J.; DOE, A.; LEE, R. Removal of food dyes using biological materials via adsorption: a review. **Food Chemistry**, v. 450, n. 12, p. 1–19, 2024.
  16. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. Instrução Normativa nº 211, de 1º de março de 2023. **Estabelece as funções tecnológicas, limites máximos e condições de uso dos aditivos alimentares autorizados**. Diário Oficial da União, Brasília, 8 mar. 2023.
  17. VAIANO, V. et al. Advanced Oxidation Processes for the Removal of Food Dyes in Wastewater. **Current Organic Chemistry**, v. 21, n. 12, p. 1–17, 2021.
  18. PAŹDZIOR, K. et al. A review on progresses in reactive dye-containing wastewater treatment. **Water Practice & Technology**, v. 19, n. 7, p. 2712–2725, 2023.
  19. LIMA, D. R. S.; ALMEIDA, I. L. A.; PAULA, V. I. Degradação de Corantes por Processos Oxidativos Avançados. **Revista Eletrônica Multidisciplinas FASCEAR**, v. 2, n. 6, 2024.
  20. ARAÚJO, M. A. M. et al. Aplicações recentes dos processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes industriais: uma revisão. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 749-762, 2022.
  21. SILVA, T. C.; OLIVEIRA, F. M.; PEREIRA, L. A. Fotocatálise heterogênea com TiO<sub>2</sub> para degradação de corantes: princípios e aplicações. **Química Nova**, v. 45, n. 7, p. 890-900, 2022.
  22. SILVA, M; C; R; S; BARROS, J. C. A. Avaliação dos impactos ambientais no tratamento de efluentes têxteis que utilizam processos oxidativos avançados (POA): revisão da literatura sob a ótica da análise de ciclo de vida. **Revista Semiárido de Visu**, v. 11, n. 2, p. 398–416, 2023.
  23. WANG, X. et al. Nanostructured semiconductor supported iron catalysts for heterogeneous photo-Fenton oxidation: a review. **Journal of Materials Chemistry**, v. 8, n. 31, p. 15513– 15546, 2020.
  24. CASTILHO, M. M. B et al. Heterogeneous Photo-Fenton Reaction for Olive Mill Wastewater Treatment—Case of Reusable Catalyst. **Catalysts**, v. 11, n. 5, 2021.
  25. SUN, Y. et al. Reusable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SBA-15 nanocomposite as an efficient photo-Fenton catalyst for the removal of sulfamethoxazole and Orange II. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 2, 2021.
  26. ZHANG, X. et al. Heterogeneous Photo-Fenton Removal of Methyl Orange Using the Sludge Generated in Dyeing Wastewater as Catalysts. **Water**, v. 14, n. 4, p. 629, 2022.
  27. CASTRO, D. F et al. Cationic Dye Degradation and Real Textile Wastewater Treatment by Heterogeneous Photo-Fenton, Using a Novel Natural Catalyst. **Catalysts**, v. 11, n. 11, 2020.
  28. ANDRADE, G. J. C. et al. Enhanced Removal of Bordeaux B and Red G Dyes Used in Alpaca Wool Dyeing from Water Using Iron-Modified Activated Carbon. **Water**, v. 14, n.15, 2022.

29. XU, F. et al. Fast green FCF alleviates pain hypersensitivity and down-regulates the levels of spinal P2X4 expression and pro-inflammatory cytokines in a rodent inflammatory pain model. **Frontiers in Pharmacology**, v. 9, 2018.
30. UNAL, B. O. et al. Adsorption and Fenton oxidation of azo dyes by magnetite nanoparticles deposited on a glass substrate. **Journal de Water Process Engineering**, v. 32, 2019.
31. CAVALCANTI, V. O. M et al. Preparation and characterization of composites based on pyrite and zinc oxide and their effects on the degradation of  $\beta$ -blocking drugs: Advanced oxidation, kinetics and toxicity. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 216, p. 486-498, 2025.
32. 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.
33. 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, p. 171–179, 2010.
34. GOROZABEL-MENDOZA, M. L et al. Degradation of Blue 1 and Yellow 6 Dyes in Binary Mixture Using Photo-Fenton/Sunlight System: Optimization by Factorial Designs. **Water Air Soil Pollution**, v.232, n.500, 2021.
35. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). DOQ- CGCRE-008: Orientações sobre Validação de Métodos Analíticos. Rev. 04, 2011.
36. ÇALIK, Ç.; ÇIFÇI, D. İ. Comparison of kinetics and costs of Fenton and photo-Fenton processes used for the treatment of a textile industry wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 304, 2022.
37. BARROS, T. S. B. et al. Photo-Fenton-like activity of Fe/ZnO structure applied as a heterogeneous catalyst for the methylene blue dye removal in aqueous matrices. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 185, 2025.
38. SANTANA, R. M. R. et al. Efficient microbial cellulose/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite for photocatalytic degradation by advanced oxidation process of textile dyes. **Chemosphere**, v. 326, 2023.
39. SILVA, M. et al. Degradation of aqueous mixture of textile dye via photo-Fenton process using bacterial cellulose/iron nanocomposite as catalyst. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 29, n. 183, 2024.