



## PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> APLICADO AO TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL SINTÉTICO CONTENDO DIFERENTES CORANTES ORGÂNICOS

Frederico Venancio Martins<sup>1</sup>  
Francisco Javier Cuba Teran<sup>2</sup>  
Renata Medici Frayne Cuba<sup>3</sup>

### RESUMO

**Objetivo:** O objetivo deste estudo é investigar a remoção de corantes por meio da aplicação de oxidação avançada usando peróxido de hidrogênio e luz ultravioleta.

**Referencial Teórico:** Os corantes são moléculas que, mesmo em baixas concentrações, mudam a coloração de um produto e na maioria dos casos são refratários para degradação por processos biológicos, apresentando, em geral, baixos níveis de remoção. Para estes casos nos quais existe a ineficiência frente ao tratamento biológico, os Processos Oxidativos Avançados (POA's) se apresentam como uma alternativa eficaz no tratamento de efluentes com carga de poluentes tóxicos biologicamente recalcitrantes. Os POAs envolvem a geração de espécies oxidantes altamente reativas e não seletivas, os radicais hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), para a destruição de espécies poluentes persistentes em efluentes industriais, águas de superfície e subterrâneas. O processo UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> é um POA que tem surgido com inúmeras vantagens sobre os outros processos principalmente por não produzir resíduos sólidos após a sua reação. Ele é todo consumido e não gera subprodutos.

**Método:** A metodologia adotada para esta pesquisa compreende o emprego de um reator fotoquímico em escala de bancada onde foram aplicados amarelo Cromax AT, Azul Cromax AT e castanho. A remoção foi efetuada por meio de oxidação avançada com peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e luz ultravioleta (UV). A coleta de dados foi realizada por meio de espectrofotometria.

**Resultados e Discussão:** Obtiveram-se remoções de cor de 85% e 95% em 30 e 60 minutos para amarelo Cromax AT, Azul Cromax AT e castanho, respectivamente. Determinou-se a cinética de remoção de cor como sendo de pseudo-primeira ordem e a constante de pseudo-primeira ordem foi de  $8,75 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  e tempo de meia vida de 7,92 minutos.

**Implicações da Pesquisa:** Os resultados da pesquisa demonstram que a oxidação avançada por meio de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e UV é eficiente para remover os corantes estudados, isso tem importância para efetuar a remoção dos mesmos e proteger o meio ambiente.

**Originalidade/Valor:** Este estudo contribui para a literatura ao verificar a eficiência de remoção por meio da aplicação de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e UV, que são de fácil disponibilidade e aplicação. A relevância e o valor desta pesquisa são evidenciados por apresentar

**Palavras-chave:** Oxidação Avançada, Corantes, Peróxido de Hidrogênio, Luz Ultravioleta.

## ADVANCED OXIDATION PROCESS UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> APPLIED TO THE TREATMENT OF SYNTHETIC INDUSTRIAL EFFLUENT CONTAINING DIFFERENT ORGANIC DYES

<sup>1</sup> Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil. E-mail: [f.venancio@hotmail.com](mailto:f.venancio@hotmail.com)  
Orcid: [0000-0002-4400-3903](https://orcid.org/0000-0002-4400-3903)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil. E-mail: [paco@ufg.br](mailto:paco@ufg.br)  
Orcid: [0000-0001-7056-3093](https://orcid.org/0000-0001-7056-3093)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil. E-mail: [Renatafrayne@ufg.br](mailto:Renatafrayne@ufg.br)  
Orcid: [0000-0002-3455-81980000](https://orcid.org/0000-0002-3455-81980000)



## ABSTRACT

**Objective:** The objective of this study is to investigate dye removal through the application of advanced oxidation using hydrogen peroxide and ultraviolet light.

**Theoretical Framework:** Dyes are molecules that, even at low concentrations, can alter the color of a product. In most cases, they are resistant to degradation by biological processes and generally exhibit low removal efficiencies. For these cases, in which biological treatment is ineffective, Advanced Oxidation Processes (AOPs) emerge as an effective alternative for the treatment of effluents containing toxic and biologically recalcitrant pollutants. AOPs involve the generation of highly reactive and non-selective oxidizing species, particularly hydroxyl radicals ( $\bullet\text{OH}$ ), to degrade persistent pollutants in industrial effluents, surface water, and groundwater. The UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process is an AOP that offers several advantages over other processes, mainly because it does not generate solid residues post-reaction; it is entirely consumed and does not produce byproducts.

**Method:** The methodology adopted in this research involved the use of a bench-scale photochemical reactor in which the dyes Cromax Yellow AT, Cromax Blue AT, and Brown were applied. Dye removal was achieved through advanced oxidation using hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) and ultraviolet light (UV). Data collection was conducted through spectrophotometry. **Results and Discussion:** The results obtained revealed [synthesize the main results of the research]. In the discussion section, these results are contextualized in light of the theoretical framework, highlighting the implications and relationships identified. Possible discrepancies and limitations of the study are also considered in this section.

**Results and Discussion:** Color removal efficiencies of 85% and 95% were obtained at 30 and 60 minutes, respectively, for Cromax Yellow AT, Cromax Blue AT, and Brown. The dye removal kinetics were determined to follow a pseudo-first-order model, with a pseudo-first-order rate constant of  $8.75 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  and a half-life of 7.92 minutes.

**Research Implications:** The results demonstrate that advanced oxidation using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV is effective for removing the studied dyes, which is relevant for environmental protection and pollutant mitigation.

**Originality/Value:** This study contributes to the literature by evaluating the removal efficiency through the application of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV, both of which are readily available and easy to apply. The relevance and value of this research are underscored by its practical implications for effluent treatment.

**Keywords:** Advanced Oxidation, Dyes, Hydrogen Peroxide, Ultraviolet Light

## PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> APLICADO AL TRATAMIENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL SINTÉTICO QUE CONTIENE DIFERENTES COLORANTES ORGÁNICOS

## RESUMEN

**Objetivo:** El objetivo de este estudio es investigar la remoción de colorantes mediante la aplicación de oxidación avanzada utilizando peróxido de hidrógeno y luz ultravioleta.

**Marco Teórico:** Los colorantes son moléculas que, incluso en bajas concentraciones, pueden alterar la coloración de un producto. En la mayoría de los casos, son resistentes a la degradación por procesos biológicos y, en general, presentan bajos niveles de remoción. Para estos casos en los que el tratamiento biológico resulta ineficaz, los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) se presentan como una alternativa eficaz para el tratamiento de efluentes con contaminantes tóxicos y biológicamente recalcitrantes. Los POAs implican la generación de especies oxidantes altamente reactivas y no selectivas, especialmente los radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), con el fin de degradar contaminantes persistentes en efluentes industriales, aguas superficiales y subterráneas. El proceso UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es un POA que ofrece numerosas ventajas sobre otros procesos, principalmente por no generar residuos sólidos tras la reacción, ya que se consume completamente y no produce subproductos.

**Método:** La metodología empleada en esta investigación consistió en el uso de un reactor fotoquímico a escala de laboratorio, en el cual se aplicaron los colorantes Amarillo Cromax AT, Azul Cromax AT y Marrón. La remoción se llevó a cabo mediante oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y luz ultravioleta (UV). La recolección de datos se realizó por espectrofotometría.



**Resultados y Discusión:** Se obtuvieron eficiencias de remoción de color del 85% y 95% a los 30 y 60 minutos, respectivamente, para los colorantes Amarillo Cromax AT, Azul Cromax AT y Marrón. Se determinó que la cinética de remoción de color sigue un modelo de pseudo-primer orden, con una constante de velocidad de pseudo-primer orden de  $8,75 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  y un tiempo de vida media de 7,92 minutos.

**Implicaciones de la Investigación:** Los resultados demuestran que la oxidación avanzada mediante H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y UV es eficaz para la eliminación de los colorantes estudiados, lo cual es relevante para la protección del medio ambiente y el tratamiento de efluentes.

**Originalidad/Valor:** Este estudio contribuye a la literatura al evaluar la eficiencia de remoción mediante la aplicación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y UV, los cuales son de fácil acceso y aplicación. La relevancia y el valor de esta investigación se destacan por sus implicaciones prácticas en el tratamiento de efluentes.

**Palabras clave:** Oxidación Avanzada, Colorantes, Peróxido de Hidrógeno, Luz Ultravioleta.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## 1 INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais têm se tornado cada vez mais críticos e frequentes nas últimas décadas, devido principalmente ao crescente aumento populacional e consequentemente ao aumento da produção industrial. Observa-se assim, que os problemas ambientais de cunho antrópico têm atingido um nível catastrófico, sendo muitas vezes notados através de alterações no ar, água e solo.

Um dos principais problemas da sociedade moderna é a contaminação das águas naturais, o que deixa claro que o adequado tratamento de águas residuais anteriormente ao seu lançamento no meio ambiente é extremamente necessário, tanto para a proteção da saúde pública quanto para a preservação do meio ambiente. A maior conscientização dos riscos eminentes à saúde e a também necessidade de manutenção e conservação dos recursos naturais tem motivado o desenvolvimento de tecnologias com intuito de minimizar o problema da contaminação. Alguns exemplos são o desenvolvimento de legislações mais restritivas, que visem à redução da qualidade e toxicidade das emissões, reciclagem e uso dos resíduos, a substituição de matérias tóxicas. Sendo também de suma importância a utilização de métodos de tratamento de efluentes assim como a recuperação de ambientes já contaminados que satisfaçam as restrições impostas (Elander, 2003).



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os corantes são moléculas que, mesmo em baixas concentrações, mudam a coloração de um produto. São usados em vários tipos de indústrias tais como as farmacêuticas, têxteis, alimentícias, de cosméticos e várias outras indústrias que tem como objetivo deixar seus produtos com características mais atraentes para os clientes. Os corantes orgânicos sintéticos são importantíssimos para satisfazer as exigências cada vez maiores dos consumidores, em termos de qualidade, variedade e outros requisitos técnicos para a coloração de um número crescente de produtos têxteis, tintas, medicamentos, cosméticos e saneantes, conferindo aos mesmos uma ampla gama de cores, proporcionando praticamente todas as tonalidades do espectro visível aos produtos fabricados. Grande parte dos corantes não é totalmente incorporada aos produtos, sendo eles perdidos juntamente com refugos de produção e os efluentes destas indústrias são geralmente coloridos (Costa, 2008). O descarte descontrolado desses efluentes provoca impactos ambientais do ponto de vista estético, já que são percebidos visualmente em concentrações baixas (menores que 1 mg/L), e também alterando parâmetros como cor verdadeira, demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO) e sólidos dissolvidos.

Uma de suas principais qualidades é a manutenção da coloração do produto por um longo período de tempo, sendo que essa característica se torna um problema quando estas moléculas integram um efluente industrial, pois a sua não biodegradabilidade dificulta o tratamento, que convencionalmente, é biológico. Os efluentes industriais possuem características físico-químicas que provocam grandes impactos ambientais, como elevados níveis de pH, cor, sólidos dissolvidos, sais e Demanda Química de Oxigênio (DQO) (Feng et al., 2010; Gulkaya et al., 2006; Jamalluddin and Abdullah, 2011). As fortes colorações ainda atuam de modo a diminuir a capacidade de penetração da radiação ultravioleta no leito receptor.

A maioria dos corantes industriais é orgânica, sendo que cerca de 60 a 70% deles são corantes orgânicos azo, que tem como característica principal uma ligação dupla entre nitrogênios (R-N=N-R) (Erdemoğlu et al., 2008). Devido a sua solubilidade, estabilidade, variedade de cores e baixo custo, os corantes azoicos fazem parte de uma das classes mais importantes dos corantes.

Os corantes que contém o grupo azo na maioria das vezes são resistentes à degradação aeróbia e em condições anaeróbias, a ligação azo é reduzida gerando aminas aromáticas, incolores, podendo também ser tóxicas e potencialmente cancerígenas (Akceylan et al., 2009).



As moléculas de corantes se mostram resistentes a tratamentos convencionais biológicos, apresentando, em geral, baixos níveis de remoção. Para estes casos nos quais existe a ineficiência frente ao tratamento biológico, os Processos Oxidativos Avançados (POA's) se apresentam como uma alternativa eficaz na descontaminação/degradação de efluentes com carga de poluentes tóxicos biologicamente recalcitrantes. Os POA's são uma tecnologia que visa à mineralização dos poluentes orgânicos de modo a transformá-los em substâncias inofensivas ou inertes, como dióxido de carbono, água e compostos inorgânicos, utilizando para isso o radical hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), um forte oxidante que leva muitos compostos orgânicos a total mineralização (Baldrian et al., 2006; Fu et al., 2010; Herney-Ramirez et al., 2010).

Dentre os POAs, a aplicação do processo fotoquímico (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) é bastante usada e promissora. Na fotólise há a aplicação de luz ultravioleta (UV) para que haja a fotodecomposição do peróxido de hidrogênio, gerando dois mols radicais hidroxilos para cada mol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Dopar et al., 2011).

Várias pesquisas vêm sendo realizadas utilizando os processos oxidativos avançados como uma forma de remoção de cor, DQO, e outros poluentes aquáticos. Estudo realizado por Lachheb et al (2002), em relação a degradação do corante Crocein Orange G, Alizarin S, Methylene Blue, Methyl red e Congo red nas concentrações de  $84,2 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ , utilizando o processo de fotocatalise heterogênea com o TiO<sub>2</sub> como fotocatalisador (concentração  $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ ), obteve um total de degradação dos quatro primeiros corantes citados em 120 minutos de tratamento e do último corante em 180 minutos de tratamento. Saquib et al. (2008), utilizaram a fotocatalise heterogênea com o TiO<sub>2</sub> como fotocatalisador (concentração  $1,0 \text{ g.L}^{-1}$ ), para a degradação dos corantes Fast Green FCF e Patent Blue VF nas concentrações de  $0,031 \text{ mmol.L}^{-1}$  e  $0,125 \text{ mmol.L}^{-1}$ , respectivamente. Com 80 minutos de irradiação ultravioleta obteve-se entre 87-93% de degradação, enquanto observou-se que quando se utilizava o TiO<sub>2</sub>, sem radiação ultravioleta, não havia remoção de cor. Vineetha et al., (2013) estudaram a remoção de cor e DQO de efluente de destilaria utilizando a radiação solar. Investigou-se a condição ótima para o funcionamento do sistema fotocatalítico e obteve-se uma remoção máxima de coloração no efluente têxtil em cerca de 79%. Segundo os pesquisadores o processo fotocatalítico de degradação utilizando a luz solar como fonte de radiação mostrou aplicação potencial para a remoção da cor do efluente de destilaria.



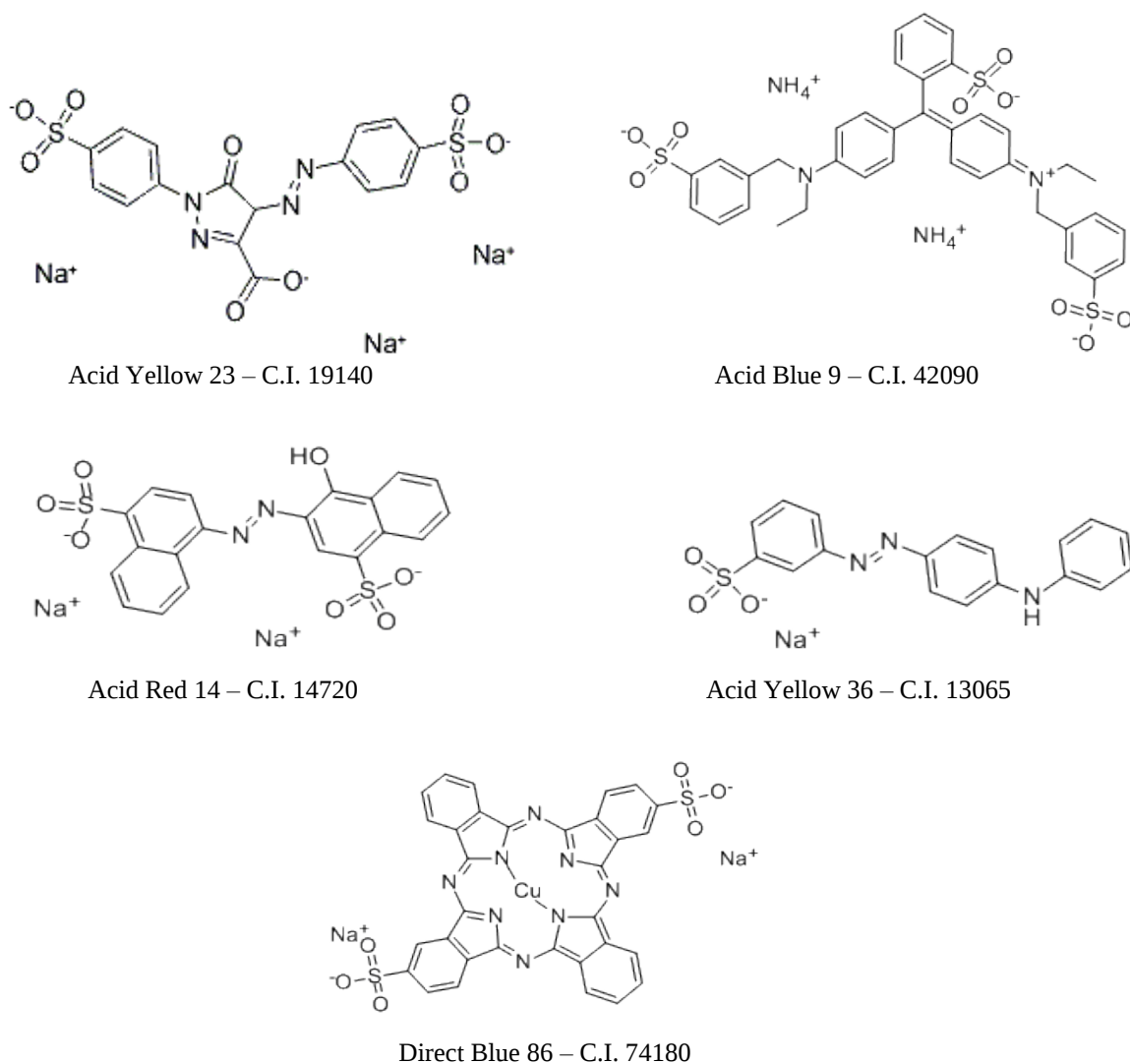
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 MATERIAIS

Foram usados três corantes comerciais, todos com aplicação industrial: Amarelo Cromax AT (Acid Yellow 23 – C.I. 19140), Azul Cromax AT (Acid Blue 9 – C.I. 42090) e Castanho S74A1 (Acid Yellow 36 – C.I. 13065; Acid Red 14 – C.I. 14720; Direct Blue 86 – C.I. 74180), a Figura 1 mostra sua fórmulas estruturais. Todos os corantes utilizados no trabalho foram fornecidos pela Idea Química LTDA. Utilizou-se peróxido de hidrogênio H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 33% (m/m) da marca Impex e água proveniente do sistema de abastecimento público.

**Figura 1**

*Representação das estruturas moleculares dos corantes usados na síntese do efluente sintético.*



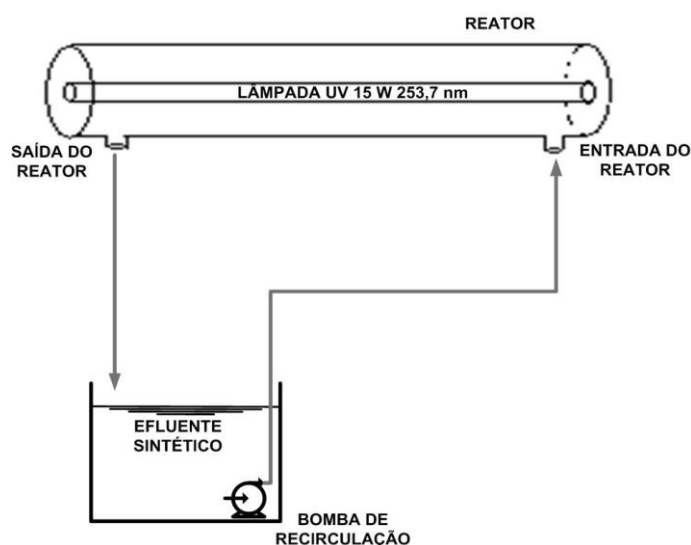


## 2.2 REATOR FOTOQUÍMICO

Para a realização dos experimentos utilizou-se um reator fotoquímico com seção anular, operado em batelada sequencial com recirculação. O reator consistia em um tubo cilíndrico fechado nas extremidades, com a fonte de radiação UV situada no eixo central, construído com tubulação de PVC de 100 mm de diâmetro, fechado por caps, com volume útil de 3,6 L, contendo uma lâmpada UV (G-LIGHT) de 15 watts de potência, com pico de emissão de 253,7 nm e de 47 cm de comprimento. Nas extremidades laterais do reator foram conectadas mangueiras para a condução do líquido entre o reator e o recipiente de recirculação, promovida por bomba submersa, com vazão horária de 600 litros. Na Figura 2 é mostrado o esquema do sistema experimental.

**Figura 2**

*Representação esquemática do reator fotoquímico.*



Fonte: Chemical Book

## 2.3 MÉTODO EXPERIMENTAL

Para o experimento, foi produzido um efluente sintético (ES) no volume de cinco litros, com a diluição em água destilada de 50 mg, do corante Amarelo Cromax AT, 50 mg do corante Azul Cromax AT e 100 mg do corante Castanho S74A1, pesados em balança analítica, perfazendo um efluente com concentração de 40 mg/L de corante, a qual se aproxima da concentração típica de efluentes têxteis (Khezrianjoo and Revanasiddappa, 2013). Em seguida, adicionou-se 10 mL (746 mg/L) de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 33% (m/m), quantidade em excesso se comparada com a concentração de corante, porém necessária para produção de radicais  $\cdot\text{OH}$  no meio



reacional. Recirculou-se o ES no reator por 60 minutos com a lâmpada UV-C ligada.

Retiraram-se alíquotas do ES, primeiramente no início do tratamento ( $t = 0$  min) e posteriormente, em intervalos de 15 minutos. Depois de retiradas, as amostras foram imediatamente analisadas em espectrofotômetro UV-Visível (HACH DR 5000) para determinação das absorbâncias por varredura de 190 a 640 nm.

## 2.4 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR

A quantificação da eficiência de remoção de cor seguiu a metodologia na qual se usam as medidas das absorbâncias nos comprimentos de onda de máxima absorção de cada corante que compõe o ES em separado: Amarelo Cromax AT (426 nm), Castanho S74A1(486 nm) e Azul Cromax AT (630 nm). Os percentuais de remoção de cor foram calculados pela Equação 1, onde Abs<sub>i</sub> e Abs<sub>f</sub> são, respectivamente, os valores de absorção medidos nos comprimentos de onda de máxima absorção de cada corante no início e no final do tempo exposição.

$$\Delta \text{Abs (\%)} = 100 \frac{[\text{Abs}_i - \text{Abs}_f]}{\text{Abs}_i} \quad (1)$$

## 2.5 DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE COR

A remoção de cor por UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para sistemas em recirculação é dado pela Equação 2, onde K' é a constante de pseudo-primeira ordem e t é o tempo de exposição. O tempo de meia-vida ( $t_{1/2}$ ) é o tempo necessário para diminuir a concentração de cor à metade do valor inicial e é dada pela Equação 3 (Teixeira e Jardim, n.d.)

$$\ln \left( \frac{\text{Abs}_f}{\text{Abs}_i} \right) = -K' t \quad (2)$$

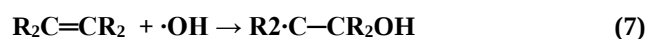
$$t_{1/2} = \frac{0,693}{K'} \quad (3)$$

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efluente sintético produzido a partir dos três corantes apresentou forte coloração esverdeada, a qual foi reduzida drasticamente com 30 minutos de tratamento. O fenômeno de



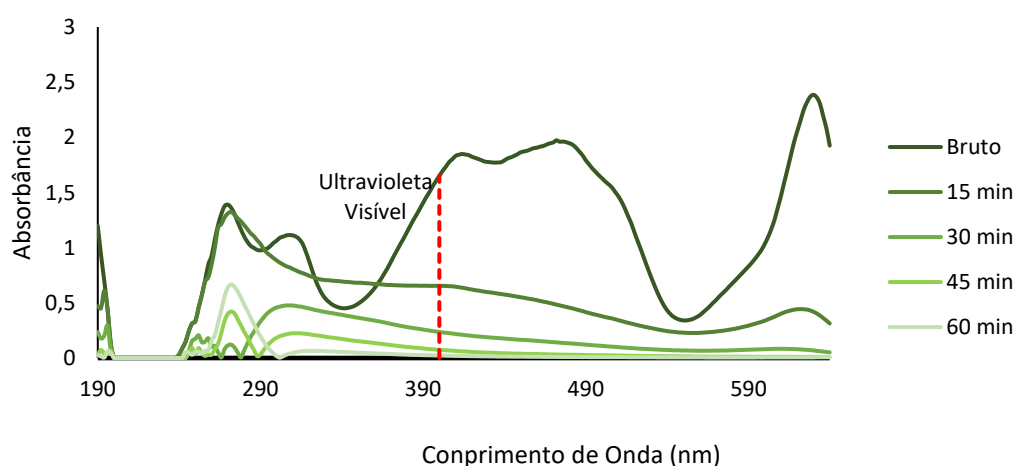
remoção de cor acontece porque dentro do reator a radiação UV-C, emite fótons ( $h\nu$ ), que promovem a clivagem das moléculas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gerando radicais  $\cdot\text{OH}$  (Equação 6), os quais reagem com os corantes presentes no ES, atacando diretamente os grupos cromóforos (ligações duplas entre nitrogênio-nitrogênio, nitrogênio-carbono, carbono-carbono e carbono-oxigênio) presentes nas moléculas (Equação 7), degradando-as em compostos intermediários mais simples (Kalra et al., 2001). A fonte de radiação UV-C (lâmpada de mercúrio à baixa pressão) com pico de emissão em 253,7 nm não é a mais eficiente para o processo, visto que o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> apresenta seu máximo de absorção em 220 nm. No entanto, esta limitação é suprida com uma dosagem em excesso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.



A Figura 3 revela a redução de cor a partir das absorbâncias medidas em cada tempo de exposição, confirmando a eficiência do processo UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Nota-se que no efluente sintético bruto é possível identificar três picos de absorção máxima na faixa do visível, em 426 nm, 486 nm e 630 nm, correspondendo, respectivamente, aos picos de absorção dos grupos cromóforos dos corantes Amarelo Cromax AT, Castanho S74A1e Azul Cromax AT. No mesmo gráfico verifica-se, a partir de 15 minutos de tratamento, a redução da absorbância das amostras nos comprimentos de onda referentes aos picos dos corantes, é evidência do ataque de radicais hidroxilas aos grupos cromóforos.

**Figura 3**

*Diminuição da absorbância em cada tempos de exposição.*





Os picos de absorbância nos comprimentos de onda abaixo de 400 nm (faixa do ultravioleta) correspondem à presença de anéis aromáticos nas estruturas moleculares dos corantes. Também é possível determinar que os picos remanescentes na faixa do ultravioleta, nos determinados tempos de exposição decorrem da formação de subprodutos da oxidação. Tal fato pode ser decorrente de a reação entre  $\cdot\text{OH}$  e os corantes ocorrer rapidamente, sem resultar na mineralização direta dos corantes, mas na produção subprodutos orgânicos intermediários que podem reagir com  $\cdot\text{OH}$  em seguida, dependendo da concentração do subproduto e da sua recalcitrância. Também é possível que a presença desses subprodutos da degradação dos corantes seja causada pelo consumo de radicais  $\cdot\text{OH}$  devido a elevada concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no meio reacional (Equações 8 e 9). Esse problema pode ser superado com a ajuste da dosagem de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> através da otimização do processo e/ou com a substituição das lâmpada de mercúrio a baixa pressão por outra de luz mais intensa e com pico de emissão próximo do comprimento de máxima absorção molar do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Nogueira et al., 2007).



### 3.1 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR

As eficiências de remoção de cor, calculados pela Equação 3, em cada pico de máxima absorbância dos três corantes do efluente sintético encontram-se na Tabela 1. Na Figura 4 têm-se os percentuais de remoção de cor em função do tempo nos comprimentos de onda de máxima absorção de cada corante. Em 30 minutos de tratamento, há uma remoção média de cor superior a 90% referentes aos corantes do efluente e ao final do processo a remoção de cor atinge valor superior a 99%. Este fato concorda com Kalra et al. (2001).

**Tabela 1**

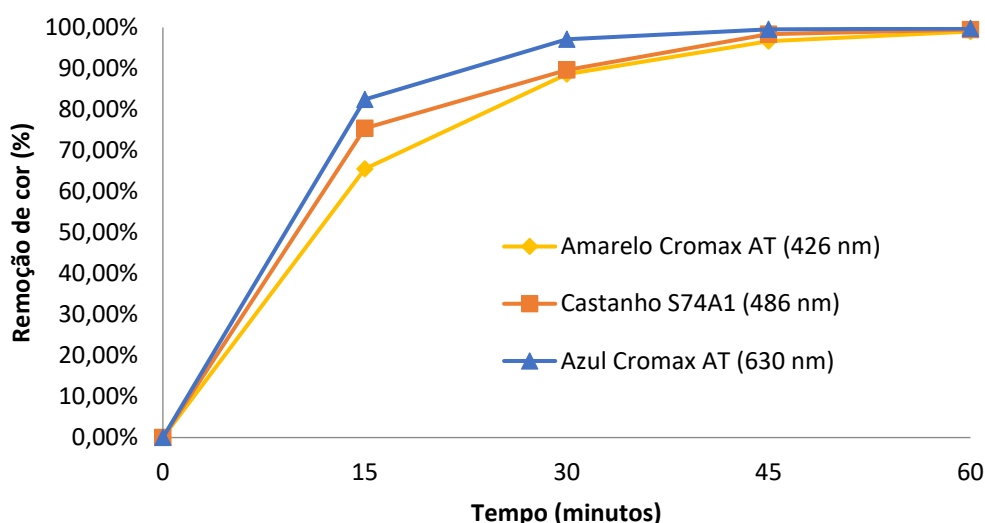
*Eficiências de remoção de cor em cada pico de máxima absorbância dos três corantes do efluente sintético.*

| Tempo<br>min | Abs       |           |        | Remoção de cor (%) |           |        | Abs<br>média | Remoção<br>média | ln (Absf) |
|--------------|-----------|-----------|--------|--------------------|-----------|--------|--------------|------------------|-----------|
|              | 426<br>nm | 486<br>nm | 630 nm | 426 nm             | 486<br>nm | 630 nm |              |                  |           |
| 0            | 1,849     | 1,973     | 2,385  | 0,0%               | 0,00%     | 0,0%   | 2,069        | 0,00%            | 0,727     |
| 15           | 0,637     | 0,484     | 0,419  | 65,6%              | 75,47%    | 82,4%  | 0,513        | 74,48%           | -0,667    |
| 30           | 0,211     | 0,204     | 0,069  | 88,6%              | 89,66%    | 97,1%  | 0,161        | 91,79%           | -1,826    |
| 45           | 0,061     | 0,032     | 0,01   | 96,7%              | 98,38%    | 99,6%  | 0,034        | 98,22%           | -3,3818   |
| 60           | 0,018     | 0,01      | 0,006  | 99,0%              | 99,49%    | 99,7%  | 0,011        | 99,42%           | -4,510    |



**Figura 4**

*Percentual de remoção de cor em cada pico de máxima absorbância no efluente sintético.*



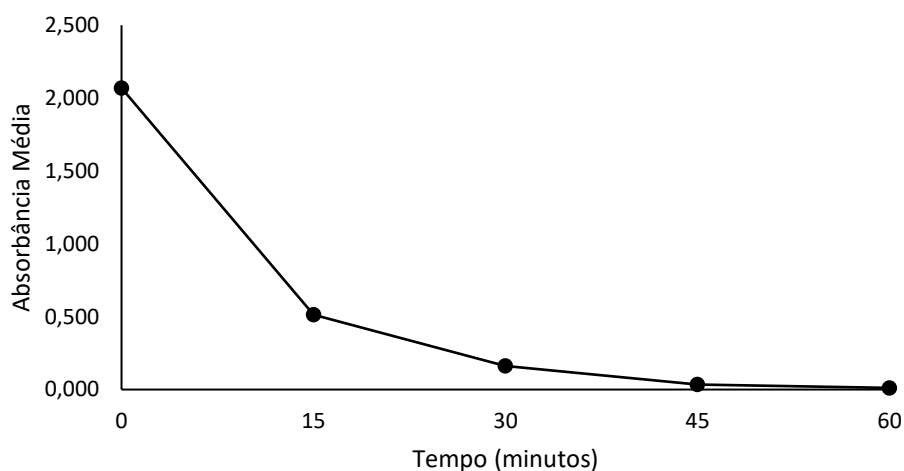
### 3.2 DETERMINAÇÃO DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE COR

Das informações da Tabela 1 também é possível extrair informações sobre a cinética do POA de remoção de cor por UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Na Figura 5, o gráfico da média das absorbâncias dos corantes (Abs média) em função do tempo apresenta comportamento não linear, o que é um indício que o processo de remoção de cor é de pseudo-primeira ordem, sendo confirmado pela linearidade do logaritmo natural das absorbância médias finais de cada tempo de exposição pela absorbância média inicial função do tempo (Figura 6). Embora a reação entre as moléculas dos corantes e o radical  $\cdot\text{OH}$  ser bimolecular, este último é produzido a uma taxa constante, e, portanto, os corantes tornam-se os reagentes limitantes. A inclinação da reta obtida pela regressão linear fornece a constante de pseudo-primeira ordem  $K' = 8,79 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ . Quanto mais inclinada, ou seja, maior o valor de  $K'$ , mais rápida é a remoção de cor. O tempo de meia vida nesse processo UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de remoção de cor é dado por  $t_{1/2} = 7,88$  minutos.



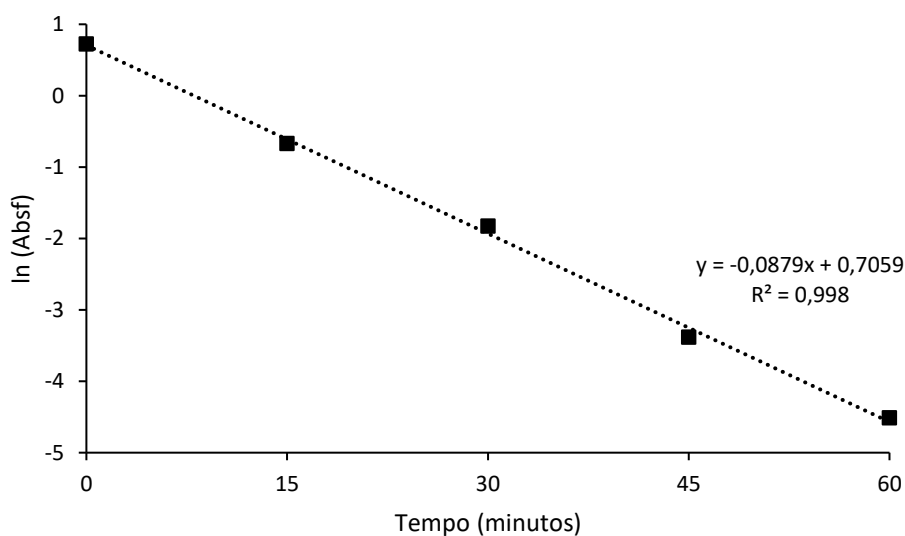
**Figura 5**

*Redução da absorbância média em cada tempo de exposição.*



**Figura 6**

*Linearidade de  $\ln(Absf/Absi)$  em função do tempo.*



#### 4 CONCLUSÕES

Diante do que foi exposto, conclui-se que o processo oxidativo avançado por fotólise do peróxido de hidrogênio é eficiente na remoção de cor de um efluente sintético, visto que este processo conseguiu remover mais de 90% da cor em 30 minutos de exposição e com 60 minutos de exposição praticamente toda cor foi removida. Também ficou comprovado que a geração de radicais hidroxila é realizada a uma taxa constante, pois o processo de remoção de cor é obtido



por cinética de pseudo-primeira ordem com constante de pseudo-primeira ordem de  $8,79 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  e tempo de meia vida de 7,88 minutos. Recomenda-se estudos posteriores para otimização do processo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que possibilitaram a publicação deste manuscrito.

## REFERÊNCIAS

- Akceylan, E., Bahadir, M., Yilmaz, M. (2009). Removal efficiency of a calix[4]arene-based polymer for water-soluble carcinogenic direct azo dyes and aromatic amines. *Journal of Hazardous Materials* **162**(2), 960–966. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.127>
- Baldrian, P., Merhautová, V., Gabriel, J., Nerud, F., Stopka, P., Hrubý, M., Beneš, M. J. (2006). Decolorization of synthetic dyes by hydrogen peroxide with heterogeneous catalysis by mixed iron oxides. *Applied Catalysis B: Environmental* **66**(3), 258–264. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.04.001>
- Costa, A. F. de S. (2008). Aplicação de tratamentos biológico e físico-químico em efluentes de lavanderia e tinturaria industriais do município de Toritama no estado de Pernambuco [WWW Document].
- Dopar, M., Kusic, H., Koprivanac, N. (2011). Treatment of simulated industrial wastewater by photo-Fenton process. Part I: The optimization of process parameters using design of experiments (DOE). *Chemical Engineering Journal* **173**(2), 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.070>
- Elander, R. P. (2003). Industrial production of beta-lactam antibiotics. *Appl Microbiol Biotechnol* **61**(5–6), 385–392. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1274-y>
- Erdemoğlu, S., Aksu, S. K., Sayılkan, F., İzgi, B., Asiltürk, M., Sayılkan, H., Frimmel, F., Güçer, Ş. (2008). Photocatalytic degradation of Congo Red by hydrothermally synthesized nanocrystalline TiO<sub>2</sub> and identification of degradation products by LC–MS. *Journal of Hazardous Materials* **155**(3), 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.087>
- Feng, F., Xu, Z., Li, X., You, W., Zhen, Y. (2010). Advanced treatment of dyeing wastewater towards reuse by the combined Fenton oxidation and membrane bioreactor process. *Journal of Environmental Sciences* **22**(11), 1657–1665. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60303-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60303-X)
- Fu, F., Wang, Q., Tang, B. (2010). Effective degradation of C.I. Acid Red 73 by advanced Fenton process. *Journal of Hazardous Materials* **174**(1), 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.009>
- Gulkaya, İ., Surucu, G. A., Dilek, F. B. (2006). Importance of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup> ratio in Fenton's treatment of a carpet dyeing wastewater. *Journal of Hazardous Materials* **136**(3), 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.006>



- Herney-Ramirez, J., Vicente, M. A., Madeira, L. M. (2010). Heterogeneous photo-Fenton oxidation with pillared clay-based catalysts for wastewater treatment: A review. *Applied Catalysis B: Environmental* **98**(1), 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.05.004>
- Jamalluddin, N. A., Abdullah, A. Z. (2011). Reactive dye degradation by combined Fe(III)/TiO<sub>2</sub> catalyst and ultrasonic irradiation: Effect of Fe(III) loading and calcination temperature. *Ultrasonics Sonochemistry* **18**(2), 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.09.004>
- Kalra, A., Tugcu, N., Cramer, S. M., Garde, S. (2001). Salting-In and Salting-Out of Hydrophobic Solutes in Aqueous Salt Solutions. *J. Phys. Chem. B* **105**(27), 6380–6386. <https://doi.org/10.1021/jp010568+>
- Khezrianjoo, S., Revanasiddappa, H. D. (2013). Photocatalytic Degradation of Acid Yellow 36 Using Zinc Oxide Photocatalyst in Aqueous Media. *Journal of Catalysts* **2013**(1), 582058. <https://doi.org/10.1155/2013/582058>
- Nogueira, R. F. P., Trovó, A. G., Silva, M. R. A. da, Villa, R. D., Oliveira, M. C. de (2007). Fundamentos e aplicações ambientais dos processos fenton e foto-fenton. *Quím. Nova* **30**, 400–408. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000200030>
- Saqib, M., Abu Tariq, M., Faisal, M., Muneer, M. (2008). Photocatalytic degradation of two selected dye derivatives in aqueous suspensions of titanium dioxide. *Desalination* **219**(1), 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.06.006>
- Teixeira, Jardim (n.d.). CADERNO TEMÁTICO - Laboratório de Química Ambiental - Unicamp [WWW Document]. *yumpu.com*. URL <https://www.yumpu.com/pt/document/view/12636647/caderno-tematico-laboratorio-de-quimica-ambiental-unicamp> (accessed 3.21.25).
- Vineetha, M. N., Matheswaran, M., Sheeba, K. N. (2013). Photocatalytic colour and COD removal in the distillery effluent by solar radiation. *Solar Energy* **91**, 368–373. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.09.013>