

# Tratamento de um efluente têxtil real via processo combinado de coagulação/floculação/decantação e oxidação Fenton

*Real textile effluent treatment via a combined process of coagulation/flocculation/decantation and Fenton oxidation*



• **Data de entrada:**  
22/10/2021



• **Data de aprovação:**  
18/04/2022

Debora Danna Soares da Silva<sup>1\*</sup> | Adriana Guimarães Costa<sup>1</sup> | Rinaldo dos Santos Araújo<sup>1</sup> | Francisco Maurício de Sá Barreto<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.022>

## ORCID ID

Silva DDS  <https://orcid.org/0000-0002-8239-655X>  
Costa AG  <https://orcid.org/0000-0002-5379-3513>

Araújo RS  <https://orcid.org/0000-0003-2609-436X>  
Barreto FMS  <https://orcid.org/0000-0001-7262-5809>

## Resumo

Este estudo avaliou a eficiência do tratamento físico-químico de coagulação, floculação e decantação combinado com reação Fenton na redução de cor, turbidez e DQO de um efluente têxtil real. Um planejamento fatorial  $2^2$  tipo estrela foi utilizado na otimização das variáveis de concentração de policloreto de alumínio (PAC 15) e gradiente de velocidade na mistura rápida ( $G_{mr}$ ) na etapa de coagulação/floculação/decantação e nas concentrações de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  e de  $H_2O_2$  na etapa Fenton a  $pH\ 3,0 \pm 0,3$ . A eficiência global do tratamento mostrou remoções de 92,4%; 99,9% e 98,4% de DQO, cor e turbidez, respectivamente, usando 841 mg/L de PAC e  $G_{mr}$  de  $900\ s^{-1}$  e 1000 mg/L de  $H_2O_2$  e 52,5 mg/L de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ . A cor e a turbidez foram removidas em quase sua totalidade, e a remoção de DQO alcançada apresenta-se em acordo com os padrões de lançamento de efluentes estabelecidos na Resolução COEMA n° 02/2017, legislação que regulamenta a disposição de efluentes no Estado do Ceará. Assim, os resultados obtidos podem ser considerados promissores para descoloração e degradação da matéria orgânica em águas residuárias coloridas.

**Palavras-chave:** Efluente têxtil real. Coagulação/floculação/decantação. Processo Fenton.

## Abstract

*This study evaluated the efficiency of the physicochemical treatment of coagulation and flocculation combined with Fenton reaction in reducing color, turbidity and COD of a real textile effluent. A factorial design  $2^2$  was used to optimize the variables of polyaluminum chloride concentration (PAC 15) and velocity gradient in the fast mixture ( $G_{mr}$ ) in the coagulation/flocculation treatment and in the concentrations of  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  and  $H_2O_2$  in the reaction Fenton at  $pH\ 3.0 \pm 0.3$ . The overall efficiency of the treatment showed removals of 92.4%; 99.9% and 98.4% COD, color and turbidity, respectively, using 841 mg/L PAC 15 and  $900\ s^{-1}$   $G_{mr}$  and 1000 mg/L  $H_2O_2$  and 52.5 mg/L  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ . The color and turbidity were almost completely removed, and the COD removal achieved is in accordance with the effluent discharge standards established in COEMA Resolution No. 02/2017, legislation that regulates the disposal of effluents in the State of Ceará. The results obtained can be considered promising for discoloration and degradation of organic matter in colored wastewater.*

**Keywords:** Real textile effluent. Coagulation/flocculation/decantation. Fenton process.

<sup>1</sup> Instituto Federal do Ceará (IFCE) – Fortaleza – Ceará – Brasil.

\* **Autora correspondente:** [dannasilva94@gmail.com](mailto:dannasilva94@gmail.com).

## 1 INTRODUÇÃO

O despejo dos efluentes têxteis *in natura* no ambiente causa inúmeros impactos negativos, que vão desde a poluição visual até a mortandade de organismos aquáticos (plantas, peixes, crustáceos etc.) (GAROLE et al. 2018; ROSA et al., 2019; LELLIS et al., 2019). Em função de sua alta variabilidade e natureza complexa, atingir a mineralização dos poluentes e, conseqüentemente a redução da toxicidade dessas águas residuárias, tem sido um grande desafio para as indústrias do setor (COLLIVIGNARELLI et al., 2019).

O emprego de um tratamento eficiente, porém não seletivo —por exemplo, a combinação entre dois ou mais métodos de tratamento— merece considerável atenção por reduzir os custos com tratamento e minimizar os problemas de poluição ambiental causado pelos efluentes têxteis (MCYOTTO et al., 2021). Destaca-se, portanto, no tratamento de efluentes têxteis, a adoção de técnicas físico-químicas, como a coagulação/floculação associada com processos oxidativos avançados, o que tem se mostrado eficiente dentro de uma perspectiva de viabilidade ambiental e econômica (FARSHCHI et al., 2019; TORRES et al., 2019).

Diversas pesquisas apontam as vantagens favorecidas pelo processo oxidativo avançado do tipo Fenton precedido pela coagulação/floculação para o tratamento de efluentes têxteis, visto que essa seqüência de tratamento oportuniza a redução da sua toxicidade e a produção de um efluente tratado com qualidade satisfatória para descarte ou reutilização industrial (LÓPEZ- LÓPEZ et al., 2015; GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2017; FAVERO et al., 2018; GILPAVAS et al., 2018; PEREIRA; BRITO, 2018; RAMOS et al., 2021; TASNEEM et al., 2021). Todavia, boa parte desses estudos utiliza soluções sintéticas que simulam o efluente têxtil, enquanto o processamento de amostras reais tem sido pou-

co relatado, vistos a complexidade e a variabilidade na composição desses efluentes.

Além disso, considerando o contexto mundial de perda da qualidade da água dos corpos hídricos, escassez e aumento do preço desse recurso, é importante a realização de pesquisas que utilizem o efluente real, de maneira que seja possível otimizar as condições de tratamento que permitam o enquadramento do mesmo às exigências de lançamento e até de reúso.

Com base no apresentado, esta pesquisa visa avaliar a eficiência do processo combinado de coagulação/floculação/decantação e oxidação avançada via reação Fenton no tratamento de um efluente têxtil real, com vistas ao gerenciamento adequado desses efluentes, de forma a atender aos padrões legais para lançamento de efluentes, assegurando a conservação da biota do corpo hídrico receptor.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Coleta e caracterização das amostras

As amostras de águas residuais foram coletadas em uma indústria têxtil localizada no município de Maracanaú, Ceará, exclusivamente na entrada da Estação de Tratamento de Efluentes Industriais. A amostragem foi realizada em três campanhas de coleta, sendo coletados cerca de 20 litros de efluente bruto em cada coleta. As amostras foram mantidas sob refrigeração (4o C) até momentos antes de os experimentos serem realizados.

Os efluentes coletados nas duas primeiras campanhas foram utilizados para ensaios preliminares de coagulação/floculação/decantação e de reação Fenton, que oportunizou a determinação da dosagem dos reagentes empregados no tratamento, por fim, no efluente da terceira coleta foi empregado o tratamento combinado completo proposto.

A caracterização físico-química do efluente bruto foi executada para os parâmetros de: cor aparente (absorbância a 670 nm), turbidez (NTU), DQO (mg/L) e pH segundo os métodos descritos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). As características físico-químicas do efluente estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1** - Caracterização físico-química do efluente não tratado - coleta 3.

Amostra	pH	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Cor (abs. 670 nm)
Efluente	10,4	238	1937,9	0,201 (solução 10%)
Valores de lançamento*	5 a 9	-	≤ 200	-

\*Conforme a Resolução COEMA n° 02/2017, legislação que regulamenta a disposição de efluentes no Estado do Ceará (CEARÁ, 2017).

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O efluente têxtil apresentou uma intensa coloração azul associada principalmente à presença de corante índigo usado pela indústria durante o processamento do tecido, além de elevada turbidez, alto teor de matéria orgânica (expressa pela DQO) e caráter alcalino, como visto na Tabela 1.

## 2.2 Ensaios de coagulação/floculação/decantação

Os ensaios de tratabilidade do efluente têxtil por coagulação/floculação/decantação foram

realizados em um equipamento Jar-Test da Milan modelo JT303 com capacidade para 6 jarros. Em cada ensaio foi empregado um volume de 500 mL do efluente bruto, sem alteração do seu pH. Para otimização do processo foi aplicado um planejamento experimental fatorial 2<sup>2</sup> tipo estrela, conforme mostra a Tabela 2, sendo investigados os efeitos da dosagem do coagulante policloreto de alumínio - PAC 15 (15% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e do gradiente de velocidade na mistura rápida (G<sub>mr</sub>) sobre as eficiências de remoção % de turbidez, cor e DQO no tratamento do efluente têxtil. Os níveis dos fatores investigados (Tabela 2) foram determinados a partir de ensaios preliminares.

**Tabela 2** - Fatores e níveis usados no tratamento físico-químico do efluente têxtil.

Fator	Níveis				
PAC 15 (mg/L)	-1,414	-1	0	+1	+1,414
G <sub>mr</sub> (s <sup>-1</sup> )	559	600	700	800	841
	759	800	900	1000	1041

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Tabela 3 exibe a matriz de planejamento do conjunto de experimentos realizados e as configurações pré-fixadas no Jar-Test. Para elaboração do planejamento experimental foi utilizado o software Statgraphics 19®. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

**Tabela 3** - Matriz de planejamento usada no processo de coagulação/floculação/decantação.

Ensaio	PAC 15 (mg/L)	G <sub>mr</sub> (s <sup>-1</sup> )	Configurações no Jar-test	Resposta experimental
5	700	900	T <sub>mr</sub> = 60 s G <sub>floc</sub> = 70, 60 e 50 s <sup>-1</sup> (escalonado) T <sub>floc</sub> = 7 min para cada gradiente T <sub>decantação</sub> = 45 min	Remoções % de turbidez, cor aparente e DQO
2	800	1000		
11	700	900		
4	841	900		
10	559	900		
1	700	900		
7	600	800		
8	700	1041		
3	700	759		
9	600	1000		
6	800	800		

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Depois de concluído o processo de tratamento foram retiradas alíquotas sobrenadantes do efluente para monitoramento das remoções de turbidez, DQO e cor aparente. A remoção % dessas variáveis foi calculada de acordo com a Eq. 1.

$$\text{Remoção (\%)} = \left( \frac{C_0 - C_f}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:  $C_0$  representa a concentração inicial de turbidez, cor ou DQO do efluente bruto e  $C_f$  é a concentração final desses parâmetros após a decantação.

### 2.3 Ensaios do processo Fenton

A amostra sobrenadante obtida que apresentou melhor resposta em relação às remoções % de turbidez, cor e DQO foi separada para realização do processo de oxidação avançada via reação Fenton ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ). Os estudos de oxidação avançada Fenton foram realizados em um shaker orbital da Solab modelo SL 222 sob agitação de 150 rpm e pH  $3 \pm 0,5$  ajustado com solução 0,5 M de HCl. O tempo de tratamento foi estabelecido em 60 min.

Para iniciar o processo de reação Fenton foram adicionados ao efluente pré-tratado por processo físico-químico volumes pré-definidos das soluções estoques de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$ . E, assim como no processo de tratamento anterior, um planejamento fatorial 2<sup>2</sup>, tipo estrela foi empregado para estabelecer o efeito das concentrações de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$  sobre as eficiências de remoção % de DQO e de cor aparente. Os níveis estabelecidos para os fatores investigados foram obtidos após ensaios preliminares, apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Fatores e níveis dos reagentes Fenton usados para o tratamento do efluente têxtil após tratamento físico-químico.

Fator	Níveis				
	-1,414	-1	0	+1	+1,414
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (mg/L)	21	30	52,5	75	84
$\text{H}_2\text{O}_2$ (mg/L)	646	750	1000	1250	1354

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os ensaios de Fenton foram realizados de forma aleatória para assegurar a distribuição dos erros não considerados (nível de confiança de 95%); para tanto foi utilizado o software Statgraphics 19®. A Tabela 5 apresenta a matriz experimental dos ensaios realizados. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

**Tabela 5** - Matriz de planejamento usada no tratamento do efluente via reação Fenton.

Ensaio	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (mg/L)	$\text{H}_2\text{O}_2$ (mg/L)	Resposta experimental
1	84	1000	Remoções % de cor aparente e DQO
6	52,5	1354	
3	52,5	1000	
11	52,5	1000	
10	30	1250	
5	21	1000	
4	75	1250	
2	75	750	
9	52,5	1000	
7	52,5	646	
8	30	750	

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Particularmente, o pH do efluente final tratado ajustado para  $7 \pm 0,5$  com solução 0,5 M de NaOH para posterior análise de DQO e cor aparente, visto que após o tratamento por reação Fenton o efluente se encontrava ácido ( $3 \pm 0,5$ ). As legislações de lançamento de efluentes não permitem a disposição de efluente com pH abaixo de 5, e o intuito do trabalho era alcançar níveis de remoção de cor e DQO dentro dos padrões de lançamento. A porcentagem de remoção desses parâmetros foi calculada conforme Eq. 1, apresentada anteriormente.

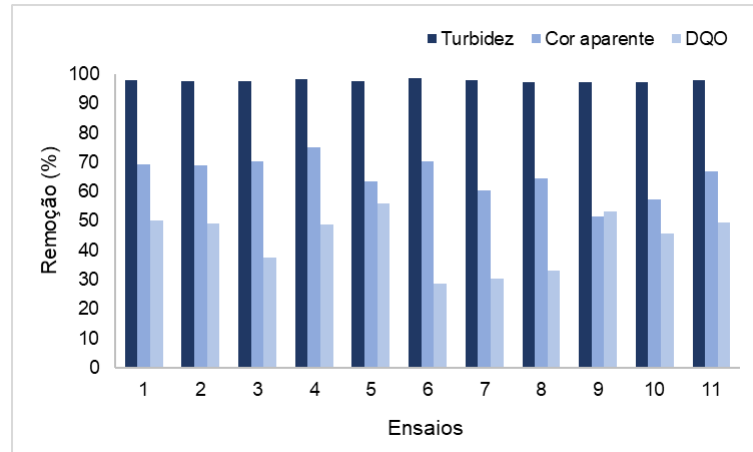
### 2.4 Análises estatísticas dos dados

Os coeficientes de regressão e seus efeitos foram estimados usando a análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos para uma significância de 95% ( $p < 0,05$ ).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Tratamento do efluente têxtil por coagulação/floculação/decantação

Os resultados para remoção de turbidez, cor aparente e DQO obtidos após tratamento por coagulação/floculação/decantação são apresentados na Fig. 1.



Condições de entrada (coleta 3): Turbidez = 238 NTU, Absorbância = 0,201 (sol. 10%) e DQO = 1938 mg/L.

**Figura 1** - Eficiências de remoção % de turbidez, de cor e de DQO do efluente têxtil por tratamento de coagulação/floculação/decantação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em todas as condições investigadas, as remoções de turbidez foram superiores a 97%. Além disso, o tratamento removeu até 75% da cor inicial do efluente (ensaio 4). Para a DQO, as eficiências de remoção variaram entre 28,6% e 55,8%. O ensaio 5 ( $PAC = 700 \text{ mg/L}$  e  $G_{mr} = 900 \text{ s}^{-1}$ ) apresentou a melhor resposta de remoção de DQO, com concentração residual de 856,6 mg/L.

Esses valores estão próximos aos encontrados por Tianzhi et al. (2021), que estudaram o efeito da coagulação no tratamento de águas residuais têxteis empregando policloreto de alumínio, polissulfato de alumínio e policloreto de alumínio e ferro como coagulantes. Em seus experimentos, observaram remoções de 95,3% dos sólidos suspensos e 37,6% da DQO usando 500 mg/L de PAC tratando um efluente têxtil com DQO entre 266-320 mg/L. Esses resultados mostram a eficiência do tratamento físico-químico proposto, visto que mesmo em níveis mais altos de po-

luição, como os notados nessa pesquisa, houve boa redução dos parâmetros avaliados. Favero et al. (2018) registraram resultados semelhantes quando utilizaram PAC (Polifloc 18) e AN 905 (floculante) no tratamento de um efluente têxtil (DQO inicial de 2.072,97 mg  $O_2$ /L e turbidez de 606 NTU). Os autores relataram reduções de 44,3% da DQO e 98,3% da turbidez do efluente empregando 1,5 mL de PAC/L adicionado de 40 mg/L do floculante. A dosagem empregada por esses autores é duas vezes superior à empregada nesta pesquisa onde se utilizou 0,65 mL de PAC/L.

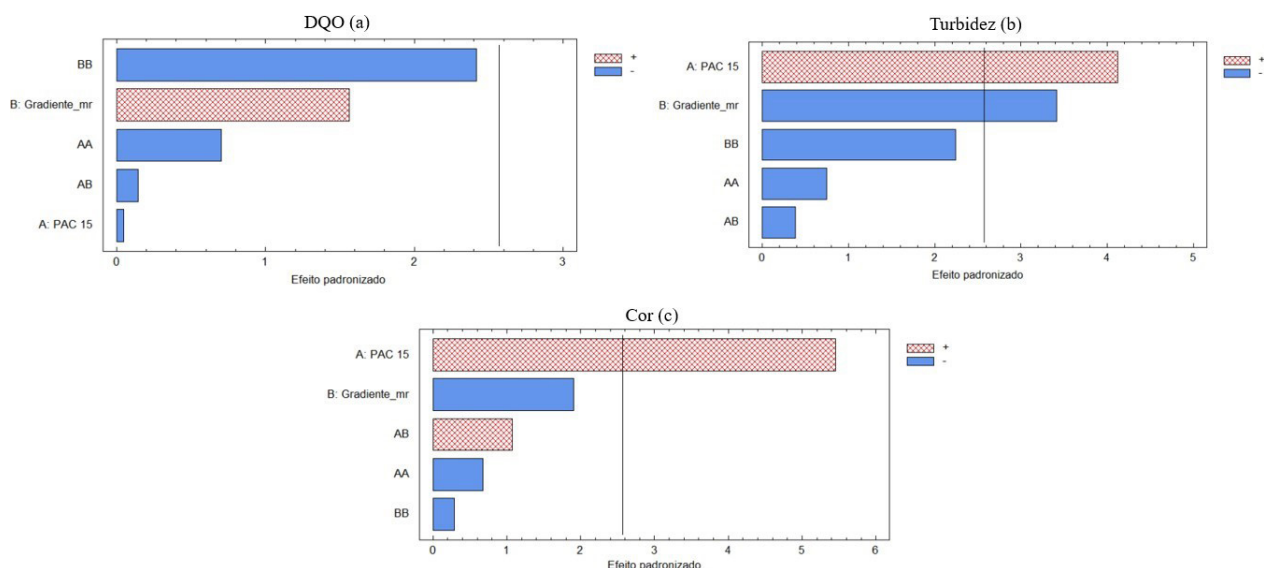
Ademais, segundo GilPavas et al. (2018), a remoção de 100% dos sólidos suspensos e coloides presentes nos efluentes têxteis, que pode ser expressa como turbidez, pode representar cerca de 50% da redução da sua carga orgânica, o que foi atestado neste trabalho, visto que as remoções de DQO não foram maiores que 55%.

Em geral o tratamento se mostrou bastante eficaz para redução da turbidez (até 98,4%) e da cor (até 75,2%), mas apresentou baixa eficiência para remoção de DQO (<55,8%). Isso porque o tratamento convencional (coagulação/floculação/decantação) não consegue remover a fração de DQO solúvel presente nesses tipos de efluentes, que possui sua composição bastante diversificada e compostos de complexa degradação. Conforme corroboram Tianzhi et al. (2021), a coagulação/floculação/decantação tem desempenhado um papel importante no pré-tratamento de águas residuais têx-

teis para a remoção de sólidos suspensos, mas não é efetiva para a remoção da matéria orgânica solúvel.

### 3.1.1 Otimização das variáveis de coagulação/floculação/decantação

A Fig. 2 apresenta o diagrama de Pareto para as eficiências de remoção % da turbidez, cor e DQO em função dos fatores estudados: dosagem de coagulante - PAC 15 (A) e gradiente de velocidade na fase de mistura rápida (B).



**Figura 2** - Gráfico de Pareto para os efeitos dos fatores nas remoções % de DQO (a), turbidez (b) e cor (c) no processo de coagulação/floculação/decantação do efluente têxtil.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Fig. 2<sup>a</sup>, observa-se que para remoção de DQO, nenhum dos fatores, em seus termos lineares, quadráticos e de interação, apresentou efeitos significativos. Para a remoção de turbidez (Fig. 2b), a dosagem de PAC (A) produz um efeito positivo significativo, revelando que o aumento da concentração do coagulante promove uma melhor remoção desse parâmetro, enquanto o gradiente de velocidade na mistura rápida (B) apresenta um efeito inverso. Na análise

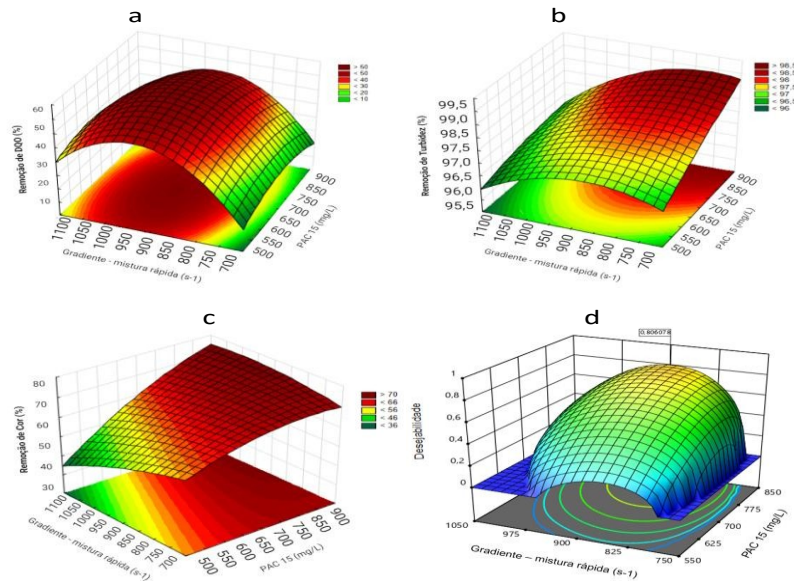
de remoção de cor (Fig. 2c), apenas a dosagem do coagulante (A) foi um fator determinante no tratamento do efluente, e seu sinal positivo indica que a maior eficiência de remoção foi obtida nos níveis mais altos dessa variável.

As elevadas remoções de turbidez e cor podem ser atribuídas à natureza aniônica das impurezas presentes no efluente têxtil, que se relaciona com PAC, que é catiônico, induzindo a neutrali-

zação eficiente de cargas, removendo assim os sólidos suspensos e coloides presentes no meio (MCYOTTO et al., 2020). Considerando que o efeito do  $G_{mr}$  não foi significativo, pode-se considerar empregar menores valores de gradiente

de velocidade e assim diminuir custos com energia, em caso de agitadores mecanizados.

A Fig. 3 mostra as superfícies de resposta para as remoções de DQO, turbidez e cor a partir das variáveis operacionais estudadas.



**Figura 3** - Superfícies de resposta para as eficiências % de remoção de DQO (a), de turbidez (b), de cor (c) e curva de desejabilidade do efluente têxtil após coagulação/floculação/decantação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com relação à degradação da DQO (Fig. 3a), observa-se que a adoção de  $G_{mr}$  acima de  $900 \text{ s}^{-1}$  proporciona uma maior remoção desse parâmetro. A condição ótima para remoção de DQO ocorre a uma concentração de  $693 \text{ mg/L}$  de PAC e gradiente de mistura rápida a  $927 \text{ s}^{-1}$ , correspondente a  $52,4\%$  de eficiência.

Para remoção de turbidez (Fig. 3b), a condição ótima ocorreu na máxima dosagem de PAC estudada ( $841 \text{ mg/L}$ ) e gradiente de velocidade na coagulação de  $785 \text{ s}^{-1}$ , sendo possível remover  $98,6\%$  da turbidez existente no efluente. Em tempo, verifica-se ainda que quanto maior a dosagem do coagulante, melhor o desempenho do sistema de tratamento na remoção da cor do efluente (Fig. 3c), de forma que uma faixa de dosagem do coagulante entre  $750$  e  $850 \text{ mg/L}$

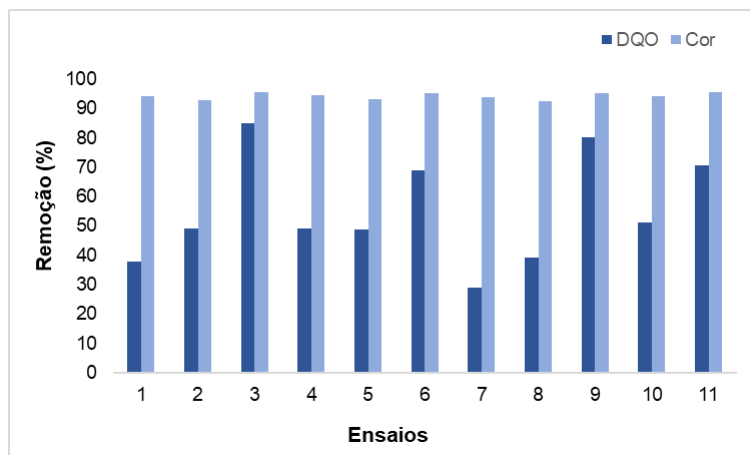
permite as maiores remoções deste parâmetro. Para o  $G_{mr}$ , na faixa de valores estudados, não foi verificada uma influência significativa sobre a descoloração do efluente. O ponto ótimo para remoção % de cor aponta para uma concentração de  $841 \text{ mg/L}$  de coagulante e  $G_{mr}$  a  $925 \text{ s}^{-1}$ , correspondente à descoloração estimada de  $73,5\%$ .

Segundo o planejamento estatístico, o ensaio 4 ( $841 \text{ mg/L}$  de PAC e em  $900 \text{ s}^{-1}$  de  $G_{mr}$ ) propiciou melhores remoções turbidez, cor e DQO,  $98,4\%$ ,  $75,2\%$  e  $48,8\%$ , respectivamente. Adicionalmente, a análise de desejabilidade global das variáveis operacionais estudadas indicou como condições ótimas uma concentração de PAC  $15$  de  $836,02 \text{ mg/L}$  e um  $G_{mr}$  de  $889,86 \text{ s}^{-1}$  (Fig. 4d). A caracterização do efluente nessas condições óti-

mas mostrou valores de 3,81 NTU de turbidez; pH = 9,17; cor (a 670 nm) de 0,050 e DQO residual de 992,2 mg/L. Essas condições foram usadas na obtenção do efluente têxtil coagulado/floculado/decantado para o tratamento subsequente via processo Fenton.

### 3.2 Tratamento por processo Fenton

O tratamento via processo Fenton foi aplicado à amostra sobrenadante remanescente do tratamento por coagulação/floculação/decantação. A Fig. 4 mostra os percentuais de remoção obtidos nesses testes após 30 minutos de reação oxidativa.



Condições de entrada: Absorbância = 0,050 e DQO = 992,2 mg/L.

**Figura 4** - Resultados experimentais da eficiência de remoção % de DQO e cor do efluente têxtil coagulado/floculado/decantado após tratamento Fenton.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A remoção de DQO variou entre 28% e 85,1% (Fig. 4), com destaque para o ensaio 3 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 52,5 \text{ mg/L}$  e  $\text{H}_2\text{O}_2 = 1000 \text{ mg/L}$ ), onde a maior remoção foi alcançada (85,1%), com concentração residual de 147,8 mg/L. Em adição, quando concentrações maiores de peróxido (1250 e 1354 mg/L, ensaios 4 e 6) foram empregadas, a eficiência de remoção de DQO do sistema reduziu-se em até 35%, mostrando um efeito inibidor do excesso de oxidante no meio. Em relação à cor, todos os ensaios registraram remoção superiores a 90%.

Em geral, em razão da sua baixa seletividade, o radical  $\bullet\text{OH}$  formado na reação Fenton degrada a carga orgânica refratária presente no efluente em um curto espaço de tempo, incluindo o ataque aos grupos cromóforos, responsáveis pela cor do efluente.

Ilhan et al. (2019), ao estudarem a tratabilidade de um efluente têxtil pela reação Fenton, relataram remoções de cor de 98,6% e de DQO de 84,6% em 150 min de reação aplicando 1093 mg/L de  $\text{FeSO}_4$  e 1600 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  em um efluente têxtil com DQO inicial de 1500 mg/L. Pereira e Brito (2018), ao investigarem o tratamento de um efluente têxtil utilizando processo combinado físico-químico e reação Fenton, registraram remoção de 75,3% de DQO e 94,1% dos fenóis totais presentes em um efluente têxtil real (DQO inicial de 1400 mg/L) com adição de 13 mg/L de  $\text{Fe}^{+2}$  (64,5 mg/L de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) e 200 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a pH = 3. Os resultados apresentados por esses autores são semelhantes aos observados nesta pesquisa, que registraram remoção de 85,1% de DQO para uma dosagem



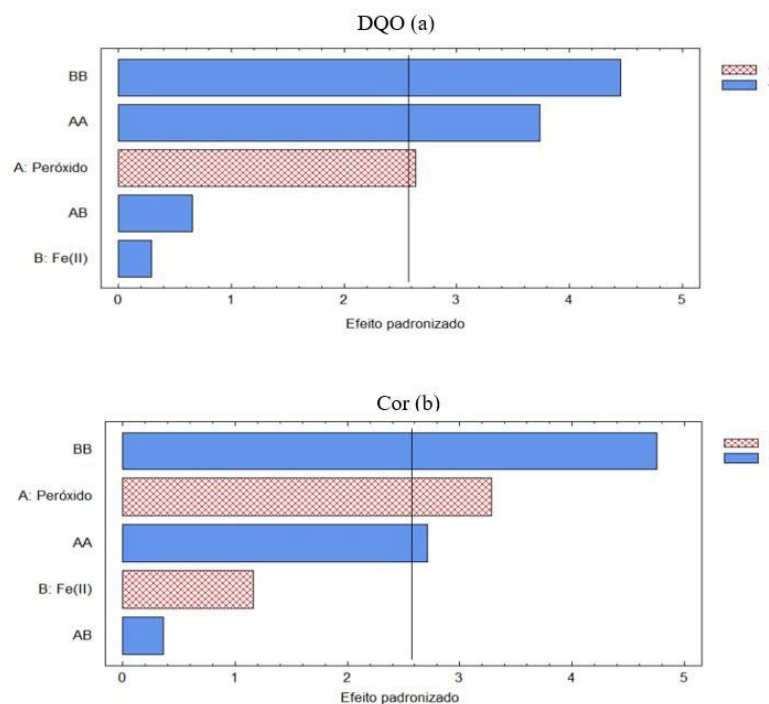
de 1000 mg/L de peróxido de hidrogênio e 52,5 mg/L de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (10,6 mg/L  $\text{Fe}^{2+}$ ).

Em todos os experimentos realizados, com exceção do ensaio 1, a concentração de ferro empregada foi abaixo de 15 mg/L, que ainda foi consumido durante a reação, ficando dentro do nível requerido pela Resolução n° 430/2011 do CONAMA, a qual estipula uma concentração resi-

dual máxima permitida de 15 mg/L de ferro para o lançamento de despejos em corpos receptores.

### 3.2.1 Otimização das variáveis no tratamento Fenton

Os diagramas de Pareto para o efeito das variáveis de concentrações dos reagentes Fenton nas remoções de DQO e cor aparente estão apresentados na Fig. 5.



**Figura 5** - Gráfico de Pareto para os efeitos dos fatores nas remoções % de DQO (a), e cor (c) do efluente coagulado/floculado/decantado após tratamento Fenton.

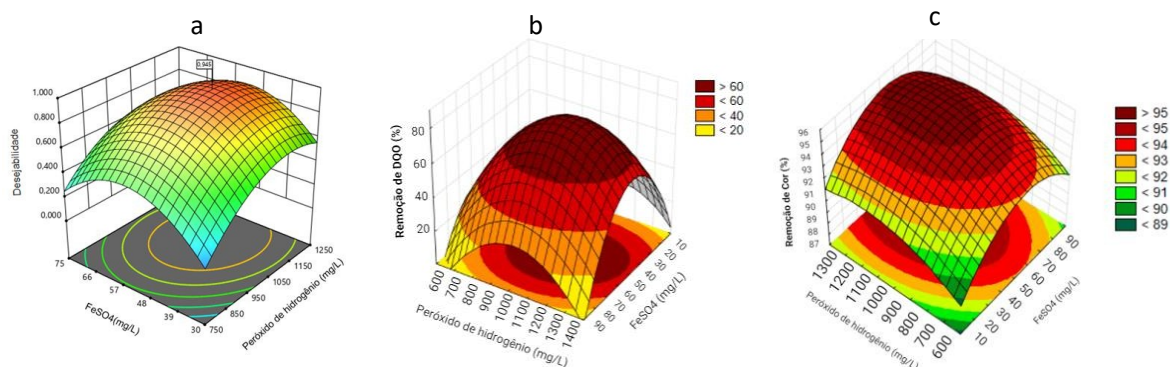
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O diagrama de Pareto para remoção de DQO (Fig. 5a) mostra que as variáveis de concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  em termos quadráticos (AA e BB) apresentam efeito negativo significativo, o que aponta para uma concentração ótima de ambos os reagentes dentro do intervalo estudado, ao passo que a concentração do agente oxidante em termo linear possui efeito levemente significativo positivo, ou seja, a reação de degradação ocorre com sucesso em concentra-

ções mais altas de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Para a remoção de cor (Fig. 5b), as concentrações de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  em termos quadráticos (AA e BB) e a concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (componente linear) foram determinantes para a descoloração do efluente. A partir da análise realizada, percebe-se que a concentração do agente oxidante se mostrou como a variável mais significativa no tratamento do efluente coagulado/floculado pelo processo Fenton.

O perfil de desejabilidade e as superfícies de resposta para as remoções % de DQO e de cor do

efluente após tratamento Fenton estão apresentados na Fig. 6.



**Figura 6** - Curva de desejabilidade (a) e superfícies de resposta para as eficiências de remoção de DQO (b) e de cor (c) no efluente coagulado/floculado/decantado após tratamento por reação Fenton.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A desejabilidade máxima global encontrada foi de 0,94 para concentrações ótimas de 1097,21 mg/L de  $H_2O_2$  e de 52,84 mg/L de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  (Fig. 6a), que oportunizou remoções estimadas de 80% da DQO e 95% da cor do efluente. Comparativamente, as concentrações dos reagentes empregadas nos ensaios 3, 9 e 11, correspondentes ao ponto central do planejamento ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O = 52,5$  mg/L e  $H_2O_2 = 1000$  mg/L) foram bem próximas às concentrações ótimas, proporcionando remoções satisfatórias de DQO e cor.

GilPavas, Dobrosz-Gomez e Gomez-García (2017) observaram remoção de 74% de DQO em um efluente têxtil usando 56 mg/L  $Fe^{2+}$  e 1224 mg/L de  $H_2O_2$ , que são concentrações superiores às encontradas neste trabalho. Cetinkaya et al. (2018) observaram remoção de 95% de cor e 70% de DQO em um efluente têxtil usando 100 mg/L  $Fe^{2+}$  e 1400 mg/L de  $H_2O_2$ . Esses valores são também superiores às concentrações ótimas determinadas neste estudo.

Observa-se que a máxima remoção de DQO (Fig. 6b) prevista pelo modelo matemático proposto foi de 80%, e que esta ocorreu para uma concentração de  $H_2O_2$  de 1075,49 mg/L e de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$

de 51,28 mg/L. No entanto, as concentrações desses reagentes no ponto central estudado (1000 mg/L de  $H_2O_2$  e 52,5 mg/L de  $Fe^{2+}$ ) revelam melhores percentuais de redução da DQO.

Para a remoção de cor (Fig. 7c) constata-se um efeito positivo na descoloração com o aumento da dosagem do catalisador de ferro, demonstrando que a reação é favorecida pela presença dos radicais  $HO\cdot$  responsáveis pela oxidação da molécula (HASSANI et al., 2018). Em geral, em todos os ensaios a remoção de cor foi superior a 90%, fato que pode ser explicado pela eficácia dos radicais  $HO\cdot$  na mineralização de poluentes complexos, como os corantes presentes no efluente têxtil (ERTUGAY; ARCAR; 2017; SENNAOUI et al., 2018; SILVA et al., 2021).

### 3.3 Qualidade do efluente final

Após tratamento do efluente têxtil pelo processo combinado de coagulação/floculação e reação Fenton, verifica-se a descoloração praticamente total do efluente, e elevada remoção da DQO. No caso da DQO, o tratamento combinado permitiu a redução deste para limites dentro da faixa de

lançamento de efluentes industriais estabelecida na Resolução COEMA nº 02/2017 (< 200 mg/L). A Tabela 6 resume o resultado dos parâmetros

monitorados após os tratamentos físico-químico e oxidativo (via reação Fenton) aplicados no efluente têxtil real.

**Tabela 6** - Caracterização físico-química do efluente bruto após tratamento por processo combinado de coagulação/floculação/decantação e reação Fenton.

Parâmetro	Efluente bruto	Após coagulação/floculação	Após processo Fenton*
Turbidez	238	3,81	-
pH	10,4	9,17	7,03
Abs. 670 nm	0,201 (sol. 10%)	0,050	0,002
DQO (mg/L)	1937,9	992,2	147,4

Condições: PAC 15 = 836 mg/L,  $G_{mr} = 900 \text{ s}^{-1}$  para coagulação/floculação e 1000 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e 52,5 mg/L de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  no processo Fenton. \*O pH foi ajustado até próximo a neutralidade.

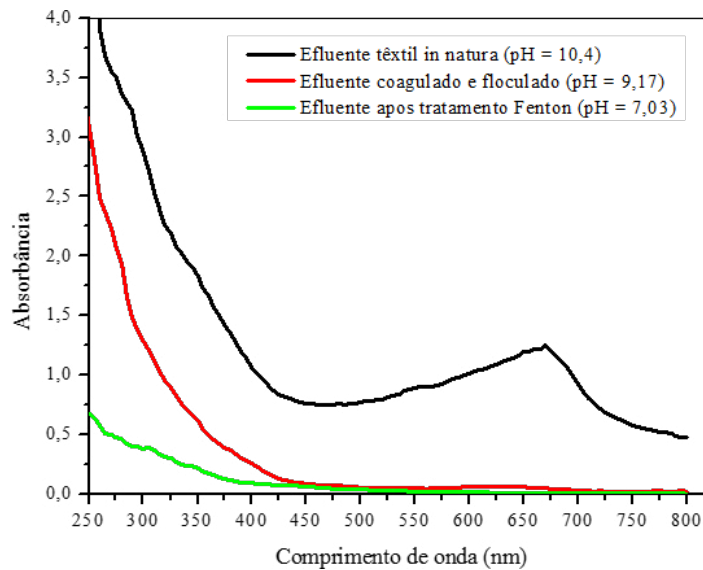
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao final do tratamento combinado foram registradas eficiências globais de remoção de DQO, turbidez e cor correspondentes a 92,4%; 98,4% e 99%, respectivamente.

Outros autores demonstram a eficiência da integração dos processos físico-químicos com reação Fenton para tratar efluentes têxteis. Pereira e Brito (2018) relataram que, com a associação desses métodos, foi possível remover mais de 75% da DQO de um efluente têxtil. GilPavas, Dobrosz-Gómez e Gómez-García (2017), ao combi-

nar esses tratamentos, registraram a remoção de 74% da DQO de um efluente têxtil. López-López et al. (2015), usando processos combinados de coagulação/floculação e reação Fenton, mostraram remoções quase totais da cor de um efluente têxtil. Esses estudos validam os resultados obtidos nessa pesquisa.

Os perfis de absorção molécula no UV-Vis do efluente bruto e após tratamento por coagulação/floculação e sistema Fenton podem ser vistos na Fig. 7.



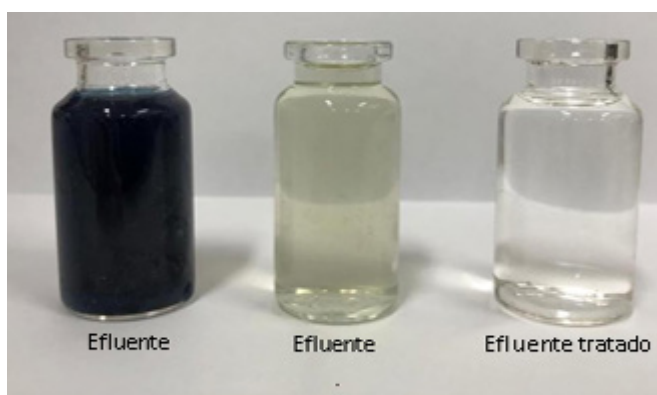
**Figura 7** - Espectros no UV-Vis do efluente bruto após as diversas etapas de tratamento investigadas nesta pesquisa.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No perfil de absorção molecular no UV-Vis observa-se uma diminuição significativa da banda de absorção cromófora a 670 nm ao fim dos processos de coagulação/floculação e reação Fenton, confirmando uma descoloração e degradação significativas do corante presente na água residuária. Em relação à região espectral do ultravioleta, não se observou a formação de picos de absorção após os tratamentos aplicados, in-

dicando que não houve produção destacada de intermediários em concentrações detectáveis. Particularmente, a redução das absorções entre 250 e 350 nm foi muito quantitativa no processo Fenton, o que confirma sua capacidade oxidativa ampla e não seletiva.

A Fig. 8 apresenta as imagens do efluente têxtil real no seu estado bruto e após a realização do tratamento combinado proposto.



**Figura 8** - Imagens do efluente têxtil bruto e tratado pelo processo combinado físico-químico de coagulação/floculação/decantação e reação Fenton.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na Fig. 8 é observado visualmente o quanto o tratamento empregado impactou na cor do efluente. No caso específico da DQO, único parâmetro monitorado com valores de lançamento regulamentado, o tratamento combinado apresentou conformidade dentro da faixa de lançamento de efluentes estabelecida na Resolução do Estado do Ceará, a COEMA nº 02/2017 (< 200 mg/L) (CEARÁ, 2017).

#### 4 CONCLUSÕES

Os estudos demonstraram que o processo de coagulação/floculação foi eficiente na remoção dos parâmetros de turbidez do efluente têxtil atingindo uma remoção de 98,4% da turbidez com o uso de 841 mg/L de PAC e em velocidade de mistura rápida igual a  $900 \text{ s}^{-1}$ . Nas mesmas condições, a redu-

ção de cor foi de 75%. Unicamente por tratamento físico-químico, a remoção da DQO não foi satisfatória, sendo alcançada somente 44% de eliminação da matéria orgânica. Após o tratamento pelo processo Fenton, com emprego de 1000 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e 52,5 mg/L  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{pH} = 3,11$ , foi observado um considerável aumento na remoção de DQO, correspondente à redução de 85,1% da matéria orgânica presente no efluente in natura, enquanto a redução de cor foi de praticamente 100%. Ao final do processo combinado de tratamento, foram determinadas eficiências globais de remoção de DQO turbidez e cor de 92,4, 98,4 e 99%, respectivamente. Em geral, esses resultados mostram o caráter promissor dos sistemas de tratamento investigados para a descoloração e a redução da matéria orgânica em efluentes têxteis.

## 5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

## 6 REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 ed. Washington: APHA, 2012.

BRASIL. CONAMA - Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Diário Oficial da União**, no 92, de 16 maio 2011, pág. 89, 2011.

CEARÁ. Conselho Estadual de Meio Ambiente (COEMA). Resolução nº 02, de 02 de fevereiro de 2017. **Diário Oficial do Estado**, série 3, ano IX nº 37.

CETINKAYA, S. G. et al. (2018) Comparison of classic Fenton with ultrasound Fenton processes on industrial textile wastewater. **Sustainable Environment Research**, v. 28, n. 4, p. 165-170. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.02.001>.

COLLIVIGNARELLI, M. C. et al. (2019) Treatments for color removal from wastewater: State of the art. **Journal of Environmental Management**, v. 236, p. 727-745. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.094>.

ERTUGAY, N.; ACAR, F. N. (2017) Removal of COD and color from Direct Blue 71 azo dye wastewater by Fenton's oxidation: Kinetic study. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 10, p. S1158-S1163. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.02.009>.

FARSHCHI, M. E.; AGHDASINIA, H.; KHATAEE, A. (2019) Heterogeneous Fenton reaction for elimination of Acid Yellow 36 in both fluidized-bed and stirred-tank reactors: Computational fluid dynamics versus experiments. **Water Research**, v. 151, p. 203-214. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.011>.

FAVERO, B. M. et al. (2018) Evaluation of the efficiency of coagulation/flocculation and Fenton process in reduction of colour, turbidity and COD of a textile effluent. **Environmental Technology**, v. 41, n. 12, p. 1580-1589. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1542035>.

GAROLE, V. J. et al. (2018) Detoxification of toxic dyes using biosynthesized iron nanoparticles by photo-Fenton processes. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 15, n. 8, p. 1649-1656, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1510-0>.

GILPAVAS, E. et al. (2018) Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos Fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 34, n. 1, p. 157-167, 2018. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.01.14>.

GILPAVAS, E.; DOBROSZ-GÓMEZ, I.; GÓMEZ-GARCÍA, M. Á. (2017) Coagulation-flocculation sequential with Fenton or photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 191, p. 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.015>.

HASSANI, A. et al. (2018) Enhanced removal of basic violet 10 by heterogeneous sono-Fenton process using magnetite nanoparticles. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 42, p. 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.036>.

ILHAN, F. et al. (2019) Treatability of raw textile wastewater using Fenton process and its comparison with chemical coagulation. **Desalination and Water Treatment**, v. 162, p. 142-148. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24332>.

LELLIS, B. et al. (2019) Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 3, n. 2, p. 275-290. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>.

LÓPEZ-LÓPEZ, C. et al. (2015) Combined treatment of textile wastewater by coagulation-flocculation and advanced oxidation processes. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 30, p. 13987-13994. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1063013>.

MCYOTTO, F. et al. (2021) Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation. **Chemical Engineering Journal**, v. 405, p. 126674. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126674>.

MCYOTTO, F. O. et al. (2020). Eco-friendly decolorization of cationic dyes by coagulation using natural coagulant Bentonite and biodegradable flocculant Sodium Alginate. **SDRPJ. Earth Sci. Environ. Stud.**, v. 5, p. 51-60. <https://doi.org/10.25177/JESES.5.2.RA.10648>.

PEREIRA, C. A. M.; BRITO, N. N. (2018) Integration of treatment technologies with Fenton reagent for laboratory effluent remediation. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 5, p. 1-21. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2243>.

RAMOS, M. D. N. et al. (2021) A critical analysis of the alternative treatments applied to effluents from Brazilian textile industries. **Journal of Water Process Engineering**, v. 43, p. 102273. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102273>.

ROSA, J. M. et al. (2019) Toxicity and environmental impact approached in the dyeing of polyamide, polyester and cotton knits. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 2, p. 102973. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102973>.

SENNAOUI, A. et al. (2018) Advanced oxidation of reactive yellow 17 dye: A comparison between Fenton, photo-Fenton, electro-Fenton, anodic oxidation and heterogeneous photocatalysis processes. **Portugaliae Electrochimica Acta**, v. 36, n. 3, p. 163-178. <https://doi.org/10.4152/pea.201803163>.

SILVA, A. M. et al. (2021) Low-cost flow photoreactor for degradation of Reactive Black 5 dye by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Fenton and photo-Fenton processes: A performance comparison. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, n. 3, p.1-17. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2687>.

TASNEEM, A. et al. (2021) Textile wastewater treatment by combination of chemical and phytoremediation processes. **Pollution**, v. 7, n. 1, p. 43-54. <https://doi.org/10.22059/poll.2020.304569.835>.

TIANZHI, W. et al. (2021) Effect of coagulation on bio-treatment of textile wastewater: Quantitative evaluation and application. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127798. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127798>.

TORRES, N. H. et al. (2019) Real textile effluents treatment using coagulation/flocculation followed by electrochemical oxidation process and ecotoxicological assessment. **Chemosphere**, v. 236, p. 124309. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.040>.