

*Artigo de Revisão*

# AS PRINCIPAIS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA REMOÇÃO DE CORANTES DAS ÁGUAS RESIDUAIS DA INDÚSTRIA TÊXTIL: UMA REVISÃO

**The main techniques used for the removal of dyes from textile industry wastewater: a review**

**Nayane Oliveira Chaves<sup>1\*</sup>, Luana Caliandra Freitas de Carvalho<sup>1</sup>, Rosane Maria Pessoa Betânio Oliveira<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, CEP: 49100-000, São Cristóvão, SE, Brasil.

Submetido em: 31.03.2022; Aceito em: 06.10.2022; Publicado em: 28.10.2022.

**\*Autor para correspondência:** [nayane\\_chaves@hotmail.com](mailto:nayane_chaves@hotmail.com)

## **Resumo:**

A indústria têxtil gera uma grande quantidade de águas residuais durante seus processos produtivos. Entre os compostos químicos encontrados nesses efluentes, estão os corantes que possuem difícil degradação e são tóxicos para o meio ambiente. Este estudo apresenta uma visão geral sobre as principais técnicas utilizadas para tratamento das águas residuais da indústria têxtil, analisando o funcionamento e a eficiência de cada técnica. Atualmente, as técnicas mais aplicadas são adsorção, coagulação e floculação, filtração por membrana, processos biológicos e processos oxidativos avançados. A adsorção é um método muito aplicado para remoção de corantes, sendo utilizado geralmente o carvão ativado como adsorvente. A coagulação e floculação envolve a adição de produtos químicos para coagular os sólidos coloidais e facilitar sua remoção por sedimentação floculenta. A filtração por membrana inclui as técnicas de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. O tratamento biológico pode ser realizado por processos aeróbios, anaeróbios ou uma combinação de ambos. Por fim, os processos oxidativos avançados utilizam fortes agentes oxidantes para a degradação de poluentes e compreendem os métodos de ozonização, fotocatalise, processos Fenton e Foto-Fenton. Uma vez que cada técnica possui vantagens e desvantagens, deve ser realizada uma avaliação criteriosa para a escolha da técnica apropriada levando em conta os custos e os benefícios. Ademais, observa-se que a utilização de processos combinados poderá suprir as deficiências apresentadas pelos processos quando são utilizados individualmente.

**Palavras-chave:** indústria têxtil, corantes, águas residuais, tratamento.

## Abstract:

The textile industry generates a large amount of wastewater during its production processes. Among the chemical compounds found in these effluents are the dyes that have difficult degradation and are toxic to the environment. This study presents an overview of the main techniques used for textile industry wastewater treatment, analyzing the operation and efficiency of each technique. Currently, the most widely applied techniques are adsorption, coagulation and flocculation, membrane filtration, biological processes, and advanced oxidative processes. Adsorption is a widely applied method for dye removal, and activated carbon is generally used as the adsorbent. Coagulation and flocculation involves the addition of chemicals to coagulate colloidal solids and facilitate their removal by flocculent sedimentation. Membrane filtration includes the techniques of microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, and reverse osmosis. Biological treatment can be performed by aerobic, anaerobic, or a combination of both. Finally, advanced oxidative processes use strong oxidizing agents for the degradation of pollutants and comprise the methods of ozonation, photocatalysis, Fenton and Photo-Fenton processes. Since each technique has advantages and disadvantages, a careful evaluation should be made to choose the appropriate technique taking into account the costs and benefits. Furthermore, it is observed that the use of combined processes may overcome the deficiencies presented by the processes when they are used individually.

**Keywords:** textile industry, dyes, wastewater, treatment.

## INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é considerada uma das principais indústrias do mundo. A maior parte das indústrias têxteis está localizada nos seguintes países: China, Estados Unidos, Índia, Paquistão, Brasil, Indonésia, Taiwan, Turquia, Bangladesh e Coreia do Sul (RAJA *et al.*, 2019). Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (2013), o Brasil é o 5º maior produtor mundial de têxteis.

As indústrias têxteis consomem grandes volumes de água em seus processos produtivos, o que resulta na geração de 50 a 100 L de água residual por quilo de tecido produzido (ARSLAN-ALATON *et al.*, 2008). Nos processos de tingimento e acabamento, uma grande quantidade de corante é liberada nas águas residuais da indústria têxtil (KHANDEGAR & SAROHA, 2013).

Os corantes possuem uma estrutura molecular complexa e são resistentes à luz, temperatura e agentes oxidantes, o que torna difícil a sua degradação (BANERJEE & CHATTOPADHYAYA, 2017). A presença dos corantes nos corpos d'água impede a penetração da luz solar e altera a atividade fotossintética do meio, ocasionando a deterioração da qualidade da água e comprometendo a flora e fauna aquática (LALNUNHLIMI & KRISHNASWAMY, 2016).

Por esse motivo, a remoção de corantes de efluentes têxteis é uma grande preocupação ambiental (KHANDEGAR & SAROHA, 2013). Nesse sentido, atualmente, diversas técnicas são aplicadas para remoção de corantes a fim de diminuir seu impacto no meio ambiente como fotocatalise, coagulação e floculação, adsorção, tratamento biológico, entre outros (HACHEMAOUI *et al.*, 2020).

Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão sobre as técnicas de tratamento das águas residuais da indústria têxtil, analisando o funcionamento e as vantagens e desvantagens de cada técnica.

## METODOLOGIA

A revisão foi realizada através de buscas nos bancos de dados: Science Direct, Scielo, Scopus e Google Scholar, utilizando-se os seguintes termos de pesquisa: textile wastewater treatment, coagulation/flocculation, adsorption, membrane filtration, biological treatments, ozonation, photocatalysis, fenton process e photo-fenton process. Dentre os trabalhos encontrados, foram selecionados 38 artigos publicados entre 2008 e 2022. Dessa forma, foi possível obter uma investigação sobre os métodos mais utilizados no tratamento de efluentes têxteis, analisando a eficiência, os princípios de funcionamento e as desvantagens de tais métodos.

## CORANTES E TIPOS DE CORANTES

Os corantes são substâncias aromáticas complexas amplamente utilizadas pelas indústrias de papel, cosméticos, têxtil, farmacêuticas e alimentícias (KURNIAWAN *et al.*, 2012, DAÂSSI *et al.*, 2012). Os corantes, em sua maioria, são solúveis em água e têm a capacidade de absorver luz visível na faixa de 400 a 700 nm (ZOLLINGER, 1991).

A molécula dos corantes utilizados para tingimento da fibra têxtil pode ser dividida em duas partes principais, o grupo cromóforo e a estrutura responsável pela fixação à fibra (KUNZ *et al.*, 2002). A forma de fixação da molécula do corante nas fibras têxteis geralmente é feita em solução aquosa e pode envolver interações iônicas, de hidrogênio, de Van der Waals e covalentes (GUARATINI & ZANONI, 2000).

Os corantes podem ser classificados de acordo com sua estrutura química ou método de aplicação. Os principais grupos referentes à classe química são: antraquinona, ao enxofre, azo, ftalocianina, nitro, nitroso, tiazina e triarilmetano (GUARATINI & ZANONI, 2000). Em relação ao método de aplicação são classificados principalmente nas categorias apresentadas a seguir.

### a. Corantes ácidos

São corantes aniônicos, solúveis em água e portadores de um a três grupos sulfônicos. A afinidade do corante com a fibra é resultante das ligações iônicas. As principais estruturas químicas destes corantes são: azo, antraquinona, triarilmetano, azina, xanteno, nitro e nitroso. Geralmente, são aplicados em lã, seda, nylon, acrílicos modificados, papel, couro e cosméticos (GUARATINI & ZANONI, 2000; GUPTA & SUHAS, 2009).

### b. Corantes básicos

São corantes solúveis em água que produzem cátions coloridos em solução e, por isso, são chamados também de corantes catiônicos. Eles são usados para fins medicinais e no tingimento de papel, poliéster e lã. As principais classes químicas são: triarilmetano, cianina, tiazina, oxazina e acridina (AKBARI *et al.*, 2002; GUPTA & SUHAS, 2009).

### c. Corantes reativos

São corantes que contêm um grupo eletrofílico (reativo) que tem capacidade de formar ligação covalente com grupos hidroxila das fibras celulósicas, com grupos amino, hidroxila e tióis das fibras proteicas e, também, com grupos amino das poliamidas. Geralmente, são utilizados em algodão e outras fibras celulósicas e contêm a função azo e antraquinona como grupos cromóforos (GUARATINI & ZANONI, 2000).

#### **d. Corantes diretos**

São corantes solúveis em água capazes de tingir fibras de celulose a partir de interações de Van der Waals. Estes corantes contêm mais de um grupo azo e são aplicados em algodão, papel, couro e nylon (ALCÂNTARA & DALTIM, 1996; GUPTA & SUHAS, 2009).

#### **e. Corantes azoicos**

São corantes insolúveis em água e sintetizados sobre a fibra durante o tingimento. É um método de tingimento de alto padrão de fixação e alta resistência à luz e à umidade (GUARATINI & ZANONI, 2000).

#### **f. Corantes de enxofre**

São corantes insolúveis em água e utilizados em fibras celulósicas. Para sua aplicação, é necessário a adição de um redutor químico como hidrossulfito de sódio. Uma desvantagem desta classe de corante são os resíduos altamente poluentes (ALCÂNTARA & DALTIM, 1996; GUARATINI & ZANONI, 2000).

#### **g. Corantes pré-metalizados**

São corantes utilizados geralmente para tintura de fibras protéicas e poliamida. No processo de tintura é explorado a capacidade de interação entre o metal e os agrupamentos funcionais portadores de pares de elétrons livres, como aqueles presentes nas fibras protéicas. Tem como desvantagem a alta quantidade de metal (cromo) nas águas de rejeitos (GUARATINI & ZANONI, 2000).

#### **h. Corantes à cuba**

São corantes insolúveis em água e utilizados em algodão e fibras celulósicas. Através da redução com hidrossulfito de sódio em meio alcalino, transformam-se em um composto solúvel (GUPTA & SUHAS, 2009; ALCÂNTARA & DALTIM, 1996).

#### **i. Corantes dispersivos**

São uma classe de corantes insolúveis em água usados em fibras de celulose e outras fibras hidrofóbicas. Geralmente, estes corantes contêm grupos azo, antraquinona e nitro (GUARATINI & ZANONI, 2000; GUPTA & SUHAS, 2009).

#### **j. Corantes branqueadores**

São corantes utilizados com o intuito de diminuir a tonalidade amarelada das fibras têxteis no estado bruto. Eles são comercializados na forma de pós, pasta e líquidos, sendo necessária a utilização de tensoativos para homogeneizar e acelerar a umectação do tecido durante o tingimento (GUARATINI & ZANONI, 2000; ALCÂNTARA & DALTIM, 1996).

### **MÉTODOS DE TRATAMENTO**

Vários métodos de tratamento são aplicados para a remoção de corantes como: coagulação e floculação, adsorção, filtração por membrana, processos biológicos e processos oxidativos avançados. A seguir, serão explicados os métodos, apontando suas principais vantagens e desvantagens.

## Coagulação e floculação

A coagulação e floculação envolve a adição de produtos químicos para coagular os sólidos coloidais e facilitar sua remoção por sedimentação floculenta (VERMA *et al.*, 2012). Os coagulantes mais utilizados no tratamento de água são sais de ferro e alumínio (TEH *et al.*, 2016).

A facilidade de operação e o custo relativamente baixo tornam este método atraente para o pré-tratamento ou tratamento principal dos efluentes têxteis. No entanto, as principais limitações são: a geração de lodo e a descoloração ineficiente de alguns corantes solúveis (VERMA *et al.*, 2012). Outra desvantagem é que a eficiência diminui quando a concentração do corante é baixa (HAN *et al.*, 2016).

DOTTO *et al.*, 2019 realizaram um estudo comparativo sobre a eficiência de diferentes coagulantes no tratamento de efluentes têxteis contendo os corantes reativos: Vermelho Procion HE-7B e Laranja Procion HER. Nos experimentos, foram utilizados os coagulantes orgânicos sementes de *Moringa oleifera* Lam extraídas com cloreto de sódio e cloreto de potássio (MO-NaCl e MO-KCl) respectivamente, e o coagulante inorgânico sulfato de alumínio. Os coagulantes orgânicos apresentaram melhores resultados, com destaque para o MO-KCl que apresentou porcentagens de remoção de 82,2% para cor aparente e 83,05% para DQO. Assim, este estudo demonstrou a aplicabilidade das sementes de *Moringa oleifera* Lam no tratamento de efluentes têxteis.

No trabalho de SZYGUŁA *et al.*, 2009, avaliou a coagulação-floculação de um corante modelo (Acid Blue 92) usando quitosana como agente coagulante e floculante. Foi observado que o pH influenciou a quantidade de quitosana necessária para o tratamento eficiente, e em valores de pH mais baixos, a quantidade de quitosana utilizada foi menor do que em valores de pH mais altos. Os resultados mostraram que foram alcançadas porcentagens de remoção de até 99%. Notou-se que o uso de quitosana como coagulante e floculante resultou em um nível baixo de produção de lodo.

## Adsorção

A adsorção é uma técnica eficaz e muito utilizada para remoção de corantes. O processo de adsorção depende de fatores físico-químicos como tempo de contato, pH, concentração inicial do corante e temperatura (BALARAK *et al.*, 2015).

O adsorvente mais utilizado é o carvão ativado pois possui alto poder de adsorção devido à elevada área superficial e estrutura dos poros (STAVROPOULOS, 2011). No entanto, ele apresenta algumas desvantagens como o elevado custo e a difícil regeneração (RIDA *et al.*, 2013; BANERJEE & CHATTOPADHYAYA, 2017). Nesse sentido, materiais alternativos como cinza de casca de arroz, serragem, resíduos industriais e argilas naturais têm sido utilizados como adsorventes de baixo custo (HOR *et al.*, 2016).

Em um estudo realizado por PELÁEZ-CID *et al.*, 2016, produziram carvões ativados a partir de cascas de figo-da-Índia (CarTunaQ), sementes de sapote branco (CarZapQ) e talos de brócolis (CarBrocQ) para tratar águas residuais contendo corantes têxteis. No estudo, foram utilizados os corantes: Índigo Carmin, Azul Solofenil RLE, Azul de Metileno e Violeta Cristal. Os resultados mostraram que as porcentagens de remoção para CarBrocQ (93-98%) são muito semelhantes às porcentagens alcançadas usando carbono comercial (95-98%). Com o CarTunaQ foram obtidas porcentagens de remoção entre 76 e 99%, enquanto o CarZapQ entre 37 e 85%.



HERRERA-GONZÁLEZ *et al.* (2019) prepararam um material compósito utilizando carvão ativado e polieletrólito e estudaram sua aplicação na adsorção dos corantes têxteis azul índigo e preto reativo presentes em águas residuais. Com o intuito de maximizar a porcentagem de remoção dos corantes, foi realizado um pré-tratamento por coagulação-floculação. Dessa forma, foram alcançadas porcentagens de remoção próximas a 100% ao se realizar um tratamento do efluente por coagulação-floculação antes do processo de adsorção. Além disso, o tratamento em duas etapas diminuiu os valores de Demanda Química de Oxigênio (DQO).

### Filtração por membrana

A filtração por membrana é um tratamento muito eficaz para a remoção de águas residuais da indústria têxtil e inclui as técnicas de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. A microfiltração é pouco utilizada para o tratamento de efluentes devido ao seu maior tamanho de poro. Por outro lado, a ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa são eficazes para a remoção da maioria das classes de corantes (GUPTA & SUHAS, 2009).

Contudo, algumas desvantagens tornam o uso deste método limitado como o alto custo, a incrustação frequente da membrana e a necessidade de tratamento prévio (VERMA *et al.*, 2012).

RIERA-TORRES *et al.*, 2010 utilizaram as técnicas de coagulação-floculação e nanofiltração isoladamente e combinadas para a remoção de corantes reativos em águas residuais. Os corantes utilizados foram Remazol Black 133%, Procion Crimson HEXL, Procion Navy HEXL, Procion Yellow HEXL e Procion Blue HEXL. O estudo concluiu que a associação dos tratamentos proporcionou uma remoção de quase 100% para os quatro corantes e 90% para o Remazol Black 133%. O processo combinado também diminuiu os valores de DQO.

No estudo de FERSI & DHAHBI (2008), foi comparada a eficiência entre o uso direto da nanofiltração e o uso da ultrafiltração seguido de nanofiltração para o tratamento do efluente têxtil. Os resultados mostraram que a combinação dos dois processos de filtração alcançou uma taxa de remoção de cor superior a 99%, enquanto no uso direto da nanofiltração essa taxa não ultrapassou 90%. Além disso, foi observada também uma melhora na remoção de íons que foi de 99% para íons bivalentes (sulfato e magnésio) e superior a 90% para íons cálcio. Sendo assim, os autores concluíram que o uso da ultrafiltração como pré-tratamento da nanofiltração melhorou a qualidade do efluente tratado.

### Processos biológicos

Os processos biológicos utilizados para descoloração dos efluentes têxteis podem ser aeróbios, anaeróbios ou uma combinação de ambos. O tratamento biológico pode utilizar fungos, leveduras, bactérias e algas, sendo um processo econômico e ecologicamente correto (GUPTA & SUHAS, 2009; KAPOOR *et al.*, 2021). Entretanto, este método possui a necessidade de uma área extensa para implantação, menor flexibilidade de operação e maior tempo necessário para descoloração (GUPTA & SUHAS, 2009). Além disso, não é efetivo para todos os tipos de corantes (SOLÍS *et al.*, 2012).

Os corantes azo-reativos são reduzidos em condições anaeróbias devido à clivagem das ligações azo com a eliminação da cor, porém resulta na formação de aminas aromáticas que são biodegradáveis aerobiamente. Assim, o tratamento biológico de efluentes contendo o corante azo é realizado combinando os processos aeróbios e anaeróbios (SPAGNI *et al.*, 2010; BALAMURUGAN *et al.*, 2011).

KUNJADIA *et al.*, (2016) analisaram a biodegradação de azocorantes (Coralene Golden Yellow, Coralene Navy Blue e Coralene Dark Red) utilizando enzimas ligninolíticas produzidas pelas espécies de fungos: *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus sapidus* e *Pleurotus florida*. A principal enzima ligninolítica produzida foi a lacase. Foi alcançada uma remoção de 88, 92 e 98% de corante para *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus sapidus* e *Pleurotus florida*, respectivamente.

### Processos oxidativos avançados

Os processos oxidativos avançados (POAs) têm se tornado uma alternativa promissora para a degradação de poluentes presentes em águas residuais e efluentes industriais através de fortes agentes oxidantes (KIM *et al.*, 2019; DENG & ZHAO, 2015).

Os POAs são um grupo de tecnologias que utilizam principalmente radicais hidroxila para oxidação de moléculas alvo em CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e ácidos inorgânicos (MARTÍNEZ-LÓPEZ *et al.*, 2019; BETHI *et al.*, 2016; WANG & XU, 2012; XIA *et al.*, 2022). Os processos oxidativos avançados compreendem os métodos de ozonização, fotocatalise, processos Fenton e Foto-Fenton.

### Ozonização

A ozonização é uma técnica de oxidação química que promove a decomposição dos poluentes orgânicos de forma direta e indireta. O mecanismo direto se baseia na reação das moléculas de ozônio com o composto orgânico. Por outro lado, no mecanismo indireto, através da decomposição do ozônio, são gerados radicais hidroxila que têm o potencial de mineralizar os compostos orgânicos. O mecanismo indireto alcança maior eficiência de degradação, pois os radicais hidroxila têm maior capacidade de oxidação do que as moléculas de ozônio (GHUGE & SAROHA, 2018).

A maior vantagem deste método é que o ozônio pode ser aplicado em estado gasoso e, portanto, não aumenta o volume do efluente e não resulta na geração de lodo (YAGUB *et al.*, 2014). No entanto, as principais desvantagens são o custo devido à meia-vida muito curta e a possibilidade de formar subprodutos tóxicos (STALTER *et al.*, 2010).

TEHRANI-BAGHA *et al.*, 2010 estudaram o efeito da ozonização na descoloração e degradação do corante Reactive Blue 19. Os resultados mostraram que a técnica da ozonização foi eficiente na descoloração do corante, apresentando remoção de aproximadamente 100% da cor em 45 minutos. Por outro lado, a remoção de DQO e COT foi de 55% e 17%, respectivamente. A remoção mais baixa de DQO e COT, comparada com a remoção de cor, pode ser explicada pela oxidação incompleta de materiais orgânicos.

## Fotocatálise

A fotocatalise baseia-se na geração de radicais reativos através da irradiação de um semicondutor (catalisador) com luz visível ou ultravioleta (GUPTA *et al.*, 2012). O dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) é o semicondutor mais utilizado devido à sua eficiência, alta estabilidade química e baixo custo (KORDOULI *et al.*, 2015).

Este processo pode alcançar altos níveis de degradação ou até mesmo à mineralização completa de poluentes (GUPTA *et al.*, 2012). Contudo, as principais desvantagens são: a dificuldade de penetração da luz na solução, incrustação de catalisadores e a dificuldade de separação do catalisador da solução degradada (GUPTA & SUHAS, 2009).

GUPTA *et al.*, 2012 estudaram a degradação do corante azo Amarantho utilizando fotocatalise. Os resultados obtidos mostraram que a combinação do catalisador  $\text{TiO}_2$  e o oxidante  $\text{H}_2\text{O}_2$  forneceu a maior taxa de descolorização. No tempo de 100 minutos, as eficiências de descoloração foram de 17%, 26%, 38% e 64% nos processos UV, UV +  $\text{H}_2\text{O}_2$ , UV+ $\text{TiO}_2$  e UV+ $\text{TiO}_2$ + $\text{H}_2\text{O}_2$ .

## Processo Fenton

No processo Fenton, os íons ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) são usados como catalisadores para decompor o peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) em espécies de radicais hidroxila que agem oxidando os poluentes orgânicos presentes nos efluentes (RIBEIRO & NUNES, 2021).

Geralmente, o processo Fenton é eficaz, economicamente viável e de fácil aplicação (AHILE *et al.*, 2020). Entretanto, tem como desvantagens: a necessidade de ser realizado em condição ácida e a produção de lodo como subproduto (YAGUB *et al.*, 2014; PRETE *et al.*, 2021).

ERTUGAY & ACAR, 2017 investigaram a degradação do corante Direct Blue 71 pelo processo fenton. Os resultados mostraram que a eficiência de remoção depende do pH inicial, concentração do peróxido de hidrogênio, concentração do catalisador ( $\text{Fe}^{+2}$ ), concentração do corante e temperatura da reação. Sob condições ideais, foram alcançadas porcentagens de remoção de 94% para cor e 50,7% para DQO após 20 minutos de reação.

## Processo Foto-Fenton

O processo foto-Fenton combina a aplicação de luz solar ou ultravioleta com a reação de Fenton, o que acelera a geração de radicais hidroxila e pode aumentar a eficiência de degradação (AHILE *et al.*, 2020).

Esse método apresenta uma alta taxa de remoção para a maioria dos corantes e utiliza poucos produtos químicos. Outra vantagem é a possibilidade de utilização de energia solar, portanto, torna-se um processo mais sustentável. Porém, é restrito a valores de pH ácido (CLARIZIA *et al.*, 2017).

No estudo realizado por SREEJA & SOSAMONY, 2016, investigou-se o tratamento de águas residuais têxteis sintéticos utilizando o processo foto-Fenton. Os melhores resultados foram encontrados no pH 3, sendo de 62% para remoção de DQO e 85% para remoção de cor.



## CONCLUSÃO

As indústrias têxteis utilizam grandes quantidades de água durante seus processos produtivos, o que gera elevados volumes de águas residuais contendo corantes e outros produtos químicos. A presença de corante nos efluentes é uma preocupação devido à sua toxicidade.

Diante disso, técnicas têm sido investigadas para a degradação desses compostos em efluentes têxteis, entretanto cada uma possui limitações inerentes. A remoção de corantes é um desafio devido à sua estrutura molecular complexa e de difícil degradação. Sendo assim, a escolha da técnica deve levar em conta a eficiência, o custo, a facilidade de aplicação e as características do efluente.

Os estudos mostram que a combinação de técnicas leva a uma maior eficiência de remoção do que no uso de um único método de tratamento. Visto que, a utilização de processos combinados poderá suprir as deficiências apresentadas pelos processos quando são utilizados individualmente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Sergipe e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

## REFERÊNCIAS

- ABIT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Cartilha Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira - Cenários, Desafios, Perspectivas e Demandas**. Brasília, 2013.
- AHILE UJ; WUANA RA; ITODO AU; SHA'ATO R; DANTAS RF. A review on the use of chelating agents as an alternative to promote photo-Fenton at neutral pH: Current trends, knowledge gap and future studies. **Science of The Total Environment** **710**, 134872-134872, 2020.
- AKBARI A; DESCLAUX S; REMIGY JC; APTEL P. Treatment of textile dye effluents using a new photografted nanofiltration membrane. **Desalination** **149**(1-3), 101-107, 2002.
- ALCÂNTARA MR; DALTIM D. A química do processamento têxtil. **Química Nova** **19** (3), 320-330, 1996.
- ARSLAN-ALATON I; GURSOY BH; SCHMIDT J. Advanced oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes. **Dyes and Pigments** **78** (2), 117-130, 2008.
- BALAMURUGAN B; THIRUMARIMURUGAN M; KANNADASAN T. Anaerobic degradation of textile dye bath effluente using *Halomonas* sp. **Bioresource Technology** **102** (10), 6365-6359, 2011.
- BALARAK D; JAAFARI J; HASSANI G; MAHDAVI Y; TYAGI I; AGARWAL S; GUPTA VK. The use of low-cost adsorbent (Canola residues) for the adsorption of methylene blue from aqueous solution: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies. **Colloids and Interface Science Communications** **7**, 16-19, 2015.
- BANERJEE S; CHATTOPADHYAYA MC. Adsorption characteristics for the removal of a toxic dye, tartrazine from aqueous solutions by a low cost agricultural by-product. **Arabian Journal of Chemistry** **10**, S1629-S1638, 2017.
- BETHI B; SONAWANE SH; BHANVASE BA; GUMFEKAR SP. Nanomaterials-based advanced oxidation processes for wastewater treatment: A review. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification** **109**, 178-189, 2016.
- CLARIZIA L; RUSSO D; SOMMA ID; MAROTTA R; ANDREOZZI R. Homogeneous photo-Fenton processes at near neutral pH: A review. **Applied Catalysis B: Environmental** **209**, 358-371, 2017.
- DAÂSSI D; FRIKHA F; ZOUARI-MECHICHI H; BELBAHRI L; WOODWARD S; MECHICHI T. Application of response surface methodology to optimize decolourization of dyes by the laccase-mediator system. **Journal of Environmental Management** **108**, 84-91, 2012.

- DENG Y; ZHAO R. Advanced Oxidation Process (AOPs) in Wastewater Treatment. **Current Pollution Reports** **1**, 167–176, 2015.
- DOTTO J; FAGUNDES-KLEN MR; VEIT MT; PALÁCIO SM; BERGAMASCO R. Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater. **Journal Cleaner Production** **208**, 656–665, 2019.
- ERTUGAY N; ACAR FN. Removal of COD and color from Direct Blue 71 azo dye wastewater by Fenton's oxidation: Kinetic study. **Arabian Journal of Chemistry** **10**, S1158–S1163, 2017.
- FERSI C; DHAHBI M. Treatment of textile plant effluent by ultrafiltration and/or nanofiltration for water reuse. **Desalination** **222** (1-3), 263–271, 2008
- GHUGE SP; SAROHA AK. Catalytic ozonation of dye industry effluent using mesoporous bimetallic Ru-Cu/SBA-15 catalyst. **Process Safety and Environmental Protection** **118**, 125-132, 2018.
- GUARATINI CCI; ZANONI MVB. Corantes têxteis. **Química Nova** **23** (1), 71-78, 2000.
- GUPTA VK; JAIN R; MITTAL A; SALLEH TA; NAYAK A; AGARWAL S; SIKARWAR S. Photo-catalytic degradation of toxic dye amaranth on TiO<sub>2</sub>/UV in aqueous suspensions. **Materials Science and Engineering: C**, **32** (1), 12-17, 2012.
- GUPTA VK; SUHAS. Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. **Journal of Environmental Management** **90** (8), 2313–2342, 2009.
- HACHEMAOUI M; MOKHTAR A; MEKKI A; ZAOU F; ABDELKRIM S; HACINI S; BOUKOUSSA B. Composites beads based on Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@MCM-41 and calcium alginate for enhanced catalytic reduction of organic dyes. **International Journal of Biological Macromolecules** **164**, 468-479, 2020.
- HAN G; LIANG CAN-ZENG; CHUNG TAI-SHUNG; WEBER M; STAUDT C; MALETZKO C. Combination of forward osmosis (FO) process with coagulation/flocculation (CF) for potential treatment of textile wastewater. **Water Research** **91**, 361-370, 2016.
- HERRERA-GONZÁLEZ AM; CALDERA-VILLALOBOS M; PELÁEZ-CID AA. Adsorption of textile dyes using an activated carbon and crosslinked polyvinyl phosphonic acid composite. **Journal of Environmental Management** **234**, 237–244, 2019.
- HOR KY; CHEE JMC; CHONG MN; JIN B; SAINT C; POH PE; ARYAL R. Evaluation of physicochemical methods in enhancing the adsorption performance of natural zeolite as low-cost adsorbent of methylene blue dye from wastewater. **Journal Cleaner Production** **118**, 197–209, 2016.
- KAPOOR RT; DANISH M; SINGH RS; RAFATULLAH M; H.P.S AK. Exploiting microbial biomass in treating azo dyes contaminated wastewater: Mechanism of degradation and factors affecting microbial efficiency. **Journal of Water Process Engineering** **43**, 102255-102255, 2021.
- KHANDEGAR V; SAROHA AK. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. **Journal of Environmental Management** **128**, 949-963, 2013.
- KIM J; ZHANG T; LIU W; DU P; DOBSON JT; HUANG CH. Advanced Oxidation Process with Peracetic Acid and Fe(II) for Contaminant Degradation. **Environmental Science & Technology** **53**, 13312-13322, 2019.
- KORDOULI E; BOURIKAS K; LYCOURGHIOTIS A; KORDULIS C. The mechanism of azo-dyes adsorption on the titanium dioxide surface and their photocatalytic degradation over samples with various anatase/rutile ratios. **Catalysis Today** **252**, 128-135, 2015.
- KUNJADIA PD; SANGHVI GV; KUNJADIA AP; MUKHOPADHYAY PN; DAVE GS. Role of ligninolytic enzymes of white rot fungi (*Pleurotus* spp.) grown with azo dyes. **Springerplus** **5**, 1487, 2016.
- KUNZ A; PERALTA-ZAMORA P; MORAES SG; DURÁN N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova** **25** (1), 78-82, 2002.
- KURNIAWAN A; SUTIONO H; INDRASWATI N; ISMADJI S. Removal of basic dyes in binary system by adsorption using rarasaponin-bentonite: revisited of extended Langmuir model. **Chemical Engineering Journal** **189-190**, 264-274, 2012.
- LALNUNHLIMI S; KRISHNASWAMY V. Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium. **Brazilian Journal of Microbiology** **47** (1), 39-46, 2016.
- MARTÍNEZ-LÓPEZ S; LUCAS-ABELLÁN C; SERRANO-MARTÍNEZ A; MERCADER-ROS MT; CUARTERO N; NAVARRO P; PÉREZ S; GALBALDÓN JA; GÓMEZ-LÓPEZ VM. Pulsed light for a cleaner dyeing industry: Azo dye degradation by an advanced oxidation process driven by pulsed light. **Journal of Cleaner Production** **217**, 757-766, 2019.

- PELÁEZ-CID AA; HERRERA-GONZÁLEZ AM; SALAZAR-VILLANUEVA M; BAUTISTA-HERNÁNDEZ A. Elimination of textile dyes using activated carbons prepared from vegetable residues and their characterization. **Journal of Environmental Management** **181**, 269-278, 2016.
- PRETE P; FIORENTINO A; RIZZO L; PROTO A; CUCCINIELLO R. Review of aminopolycarboxylic acids-based metal complexes application to water and wastewater treatment by (photo-)Fenton process at neutral pH. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry** **28**, 100451-100451, 2021.
- RAJA ASM; ARPUTHARAJ A; SAXENA S; PATIL PG. Water requirement and sustainability of textile processing industries. **Water in Textiles and Fashion**, 155-173, 2019.
- RIBEIRO JP; NUNES MI. Recent trends and developments in Fenton processes for industrial wastewater treatment – A critical review. **Environmental Research** **197**, 110957-110957, 2021.
- RIDA K; BOURAOUI S; HADNINE S. Adsorption of methylene blue from aqueous solution by kaolin and zeolite. **Applied Clay Science**, **83-84**, 99-105, 2013.
- RIERA-TORRES M; GUTIÉRREZ-BOUZÁN C; CRESPI M. Combination of coagulation-flocculation and nanofiltration techniques for dye removal and water reuse in textile effluents. **Desalination** **252**, 53-59, 2010.
- SOLÍS M; SOLÍS A; PÉREZ HI; MANJARREZ N; FLORES M. Microbial decolouration of azo dyes: A review. **Process Biochemistry** **47** (12), 1723-1748, 2012.
- SPAGNI A; GRILLI S; CASU S; MATTIOLI D. Treatment of a simulated textile wastewater containing the azo-dye reactive orange 16 in an anaerobic-biofilm anoxic-aerobic membrane bioreactor. **Biodegradation** **64** (7), 676-681, 2010.
- SREEJA PH; SOSAMONY KJ. A Comparative Study of Homogeneous and Heterogeneous Photo-fenton Process for Textile Wastewater Treatment. **Procedia Technology** **24**, 217-223, 2016.
- STALTER D; MAGDEBURG A; WEIL M; KNACKER T; OEHLMANN J. Toxication or detoxication? In vivo toxicity assessment of ozonation as advanced wastewater treatment with the rainbow trout. **Water Research** **44** (2), 439-448, 2010.
- STAVROPOULOS GG. A fundamental approach in liquid phase adsorption kinetics. **Fuel Processing Technology** **92** (10), 2123-2126, 2011.
- SZYGUŁA A; GUIBAL E; PALACÍN MA; RUIZ M; SASTRE AM. Removal of an anionic dye (Acid Blue 92) by coagulation-flocculation using chitosan. **Journal Environmental Management** **90**, 2979-2986, 2009.
- TEH CY; BUDIMAN PM; SHAK KPY; WU TY. Recent Advancement of Coagulation-Flocculation and Its Application in Wastewater Treatment. **Industrial & Engineering Chemistry Research** **55**(16), 4363-4389, 2016.
- TEHRANI-BAGHA AR; MAHMOODI NM; MENER FM. Degradation of a persistent organic dye from colored textile wastewater by ozonation. **Desalination**, **260**(1-3), 34-38, 2010.
- VERMA AK; DASH RR; BHUNIA P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. **Journal of Environmental Management** **93** (1), 154-168, 2012.
- WANG JL; XU LJ. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** **42** (3), 251-325, 2012.
- XIA H; LI C; YANG G; SHI Z; JIN C; HE W; XU J; LI G. A review of microwave-assisted advanced oxidation processes for wastewater treatment. **Chemosphere** **287**, 131981-131981, 2022.
- YAGUB MT; SEN TK; AFROZE S; ANG HM. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. **Advances in Colloid and Interface Science** **209**, 172-184, 2014.
- ZOLLINGER H. **Color chemistry: syntheses, properties and applications of organic dyes and pigments**. 2.ed. rev. Weinheim, VCH, 1991.

