



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

DÉBORA DANNA SOARES DA SILVA

**TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL UTILIZANDO PROCESSO COMBINADO
DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E REAÇÃO FENTON**

FORTALEZA

2021

DÉBORA DANNA SOARES DA SILVA

**TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL UTILIZANDO PROCESSO COMBINADO
DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E REAÇÃO FENTON**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Guimarães Costa Saboia.

Coorientador: Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S586t Silva, Debora Danna Soares da.
TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL UTILIZANDO PROCESSO COMBINADO DE
COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E REAÇÃO FENTON / Debora Danna Soares da Silva. - 2021.
86 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
Campus Fortaleza, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Adriana Guimarães Costa Saboia.
Coorientação: Profa. Dra. Rinaldo dos Santos Araújo.
1. Efluente têxtil real. 2. Coagulação/floculação/decantação. 3. Reação de Fenton. 4. Tratamento combinado.
5. Planejamento fatorial. I. Título.

CDD 628

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.009381/2021-29

Interessado: DÉBORA DANNA SOARES DA SILVA

DÉBORA DANNA SOARES DA SILVA

TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL UTILIZANDO PROCESSO COMBINADO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO E REAÇÃO FENTON

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 27/10/2021



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Guimaraes Costa Saboia, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 27/10/2021, às 17:19, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Rinaldo dos Santos Araujo, Diretor(a) de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação**, em 27/10/2021, às 17:20, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Maurício de Sa Barreto, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 27/10/2021, às 17:20, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Márcia Valéria Porto de Oliveira Cunha, Usuário Externo**, em 27/10/2021, às 18:04, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **3092545** e o código CRC **51EA2C7A**.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida e por todas as oportunidades, desafios e virtudes a mim concedidas; pela fé que me guia diariamente; e pelas pessoas que colocou em meu caminho durante essa jornada.

Aos meus pais por todo apoio, pela educação que me proporcionaram e valores os quais me transmitiram e que me permitiram chegar até aqui e por terem bastante paciência comigo.

Aos meus irmãos pelo companheirismo.

À minha orientadora, Profa. Dra. Adriana Guimarães e ao meu coorientador, Prof. Dr. Rinaldo Araújo, por me dedicarem conhecimento, disponibilidade, compressão e paciência; por confiarem em mim e por terem vivido comigo esse desafio.

Aos integrantes do laboratório LTQ agradeço a convivência diária, leve e descontraída; por sempre estarem dispostas(os) a dividir conhecimento.

Ao amigo Jeferson Botelho sempre atento as minhas necessidades e muito disposto em ajudar.

A todos os professores do PGTGA com os quais tive a chance de aprender e conviver, e ao programa por me proporcionar um curso tão enriquecedor e por me permitir conhecer pessoas especiais.

Ao corpo funcional dos serviços gerais e aos motoristas e seguranças do IFCE pelo apoio.

A Aline Souza e ao corpo técnico da Vicunha Têxtil, especialmente a Beatriz e a Carine, pela colaboração e abertura que proporcionaram o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos meus gatos, por deixarem meus dias melhores.

A todas aquelas pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

O tratamento do efluente têxtil constitui um desafio tecnológico devido a sua complexidade; decorrente das elevadas concentrações de corantes, sais, agentes umectantes e outros produtos químicos que geram um efeito prejudicial ao meio ambiente, causando diversos impactos negativos aos ecossistemas. Assim, o presente trabalho visa avaliar a eficiência do processo combinado de coagulação/floculação/decantação e oxidação avançada Fenton no tratamento de um efluente têxtil real. O processo físico-químico de coagulação/floculação/decantação foi realizado para avaliar a eficiência de remoção percentual de turbidez, cor e DQO através de um planejamento fatorial 2^2 para o efeito das variáveis de concentração de policloreto de alumínio (PAC 15) e gradiente de velocidade na mistura rápida (G_{mr}). Em sequência, foi executado o processo Fenton a partir de um delineamento experimental, como pós-tratamento do sobrenadante proveniente do tratamento físico-químico que oportunizou a melhor resposta para remoção % de turbidez, cor e DQO do efluente. A reação Fenton investigou a influência de concentrações de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ e H_2O_2 na remoção da matéria orgânica e descoloração do efluente têxtil. Os resultados de coagulação/floculação/decantação mostraram eficiências máximas de remoção de cor, turbidez e DQO de 98,4%; 75,2% e 48,8%, usando 836 mg/L de PAC e $900\ s^{-1}$ de G_{mr} . Nos experimentos Fenton as melhores eficiências de remoção de DQO (85,1%) e cor (95,6%) foram obtidas empregando 52,5 mg/L de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ e 1000 mg/L de H_2O_2 . Quando se considera o processo combinado de coagulação/floculação/decantação e processo Fenton foram observadas eficiência global de remoção de 92,4%; 99,9% e 98,4% de DQO, cor e turbidez, respectivamente. Estes resultados confirmam que a associação dos métodos de tratamento foi muito eficiente para redução dos parâmetros físico-químicos investigados, os quais permitiu enquadrar a DQO do efluente tratado (147 mg/L), por exemplo, aos limites permitidos (até 200 mg/L) de lançamento estabelecido pela Resolução N° 02/2017 COEMA do Estado do Ceará.

Palavras-chave: Efluente têxtil real. Coagulação/floculação/decantação. Reação de Fenton. Tratamento combinado. Planejamento fatorial.

ABSTRACT

The treatment of textile effluent is a technological challenge due to its complexity; due to the high concentrations of dyes, salts, wetting agents and other chemicals that generate a harmful effect on the environment, causing several negative impacts on ecosystems. The physicochemical process of coagulation/flocculation/decantation was carried out to evaluate the removal efficiency % of turbidity, color and COD through a 2^2 factorial design for the effect of polyaluminum chloride concentration (PAC 15) and velocity gradient variables in the fast mixing (G_{mr}). In sequence, the Fenton process was executed from an experimental design, as post-treatment of the supernatant from the physicochemical treatment that provided the best response for removal of % color and COD from the effluent. The Fenton reaction investigated the influence of $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ and H_2O_2 concentrations on COD removal and textile effluent discoloration. The coagulation/flocculation/decantation results showed maximum color, turbidity and COD removal efficiencies of 98.4%; 75.2% and 48.8% using 836 mg/L PAC and $900\ s^{-1}$ of G_{mr} . In Fenton experiments, the best maximum efficiencies of COD (85.1%) and color (95.6%) removal were obtained using 52.5 mg/L of $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ and 1000 mg/L of H_2O_2 . In general, when considering the combined coagulation/flocculation/decantation process and Fenton process, were observed overall removal efficiencies of 92.4%; 99.9% and 98.4% of COD, color and turbidity, respectively. These results confirm that the association of treatment methods was very efficient in reducing the physicochemical parameters investigated, which allowed to adjust the COD of the treated effluent (147 mg/L), for example, placed within the permitted discharge limits ($< 200\ mg/L$) established by Resolution No. 02/2017 COEMA of the State of Ceará.

Key words: Real textile wastewater. Coagulation/flocculation/decantation. Fenton Reaction. Treatment Processes. Experimental design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Fluxograma das etapas envolvidas na fabricação do tecido	17
Figura 2 — Detalhamento das operações realizadas na unidade de beneficiamento têxtil	18
Figura 3 — Principais poluentes gerados durante o processamento úmido	20
Figura 4 — Esquematização do processo de coagulação, floculação e decantação	28
Figura 5 — Diagrama do procedimento experimental da pesquisa	41
Figura 6 — Fluxo de água no processo produtivo da indústria têxtil concedente do efluente.....	42
Figura 7 — Ensaio de coagulação/floculação/decantação no <i>Jar-Test</i>	44
Figura 8 — Ensaio Fenton em incubadora shake orbital.....	47
Figura 9 — Esquema de tratamento do efluente coagulado/floculado/decantado segundo reação Fenton.....	48
Figura 10 — Espectro de absorção no UV-Vis do efluente bruto referente a coleta 3.....	51
Figura 11 — Gráfico de Pareto para os efeitos dos fatores sobre a remoção (%) de turbidez (a), de cor (b), e de DQO (c) para o processo de coagulação/floculação/decantação do efluente têxtil.....	56
Figura 12 — Curvas preditos versus observados para as remoções (%) de turbidez (a), cor (b) e DQO (c) segundo o tratamento por coagulação, floculação e decantação	60
Figura 13 — Superfícies de respostas para as eficiências de remoção % de turbidez (a), cor (b) e DQO (c) do efluente por coagulação/floculação/decantação	61
Figura 14 — Curva de desejabilidade para remoção de turbidez, cor e DQO do efluente têxtil via tratamento físico-químico por coagulação/floculação/decantação....	62
Figura 15 — Efluente bruto e tratado pelo processo de coagulação/floculação/decantação...	63
Figura 16 — Espectros de absorção UV-Vis para a solução do efluente têxtil em meio natural (pH = 10,4) e em meio ácido (pH = 3,11)	65
Figura 17 — Gráfico de Pareto para os efeitos dos fatores sobre a remoção de DQO (a) e de cor (b) para o tratamento do efluente coagulado/floculado/decantado pelo processo Fenton	67
Figura 18 — Curvas preditos versus observados para as remoções de DQO (a) e de cor (b) no tratamento do efluente coagulado, floculado e decantado pelo processo Fenton	70

Figura 19 — Superfícies de respostas para as eficiências de remoção de DQO (a) e cor (b) do efluente coagulado/floculado/decantado após tratamento via processo Fenton.....	71
Figura 20 — Curva de desejabilidade para as eficiências de remoção % de DQO e de cor do efluente têxtil coagulado, floculado e decantado via tratamento Fenton.....	72
Figura 21 — Espectros no UV-Vis do efluente têxtil bruto após o processo combinado de coagulação/floculação/decantação e Fenton utilizado nesta pesquisa.....	74
Figura 22 — Efluente têxtil bruto e tratado pelo processo combinado físico-químico de coagulação/floculação/decantação e reação Fenton.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Consumo de água nas operações de beneficiamento têxtil	19
Tabela 2	— Características dos efluentes têxteis por diferentes autores	20
Tabela 3	— Corantes utilizados na indústria têxtil e sua biodisponibilidade nos efluentes	22
Tabela 4	— Comparação da eficiência dos diversos métodos de tratamento de efluente têxtil.....	26
Tabela 5	— Eficiência de diferentes coagulantes no tratamento de efluentes têxteis.....	31
Tabela 6	— Exemplos de processos combinados físico-químico e reação Fenton para tratamento de efluentes têxteis	36
Tabela 7	— Padrões estaduais e nacionais para o lançamento de efluentes	37
Tabela 8	— Reagentes químicos utilizados para o tratamento do efluente real	42
Tabela 9	— Configuração adotada para o processo de coagulação/floculação/decantação nos ensaios de <i>Jar-Test</i>	45
Tabela 10	— Descrição dos teores das variáveis estudadas no processo de coagulação/floculação/decantação do efluente têxtil real	45
Tabela 11	— Matriz de experimentos para a coagulação/floculação do efluente têxtil real	46
Tabela 12	— Descrição das variáveis estudadas no tratamento Fenton do efluente têxtil real após tratamento inicial por coagulação/floculação/decantação.....	49
Tabela 13	— Matriz do conjunto de experimentos da reação Fenton.....	49
Tabela 14	— Caracterização físico-química do efluente têxtil <i>in natura</i>	51
Tabela 15	— Resultados experimentais da eficiência de remoções % de turbidez, cor e DQO efluente têxtil via tratamento por coagulação/floculação/decantação.....	53
Tabela 16	— ANOVA para as remoções de turbidez, cor e DQO no tratamento do efluente têxtil <i>in natura</i> por coagulação/floculação/decantação	58
Tabela 17	— Caracterização do efluente após coagulação/floculação/decantação com dosagem de coagulante PAC 15 de 836 mg/L e sob gradiente de velocidade de 900 s^{-1}	63
Tabela 18	— Resultados experimentais da eficiência de remoção de cor e DQO do efluente têxtil coagulado, floculado e decantado após tratamento pelo processo Fenton	65
Tabela 19	— ANOVA para as remoções de cor e DQO no tratamento do efluente coagulado, floculado e decantado pelo processo Fenton.....	69

Tabela 20 — Caracterização físico-química do efluente bruto após tratamento por processo combinado de coagulação/floculação/decantação e reação Fenton	73
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<i>CV</i>	Coeficiente de Variação
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
MRS	Metodologia de Superfície Resposta
NBR	Norma Técnica Brasileira
PAC	Policloreto de alumínio
PCCR	Planejamento Composto Central Rotacional
PFCI	Policloreto férrico
PFS	Polissulfato férrico
POA	Processo Oxidativo Avançado
SS	Sólidos Suspensos
ST	Sólidos Totais
TOC	Carbono Orgânico Total
σ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1	INDÚSTRIA TÊXTIL.....	17
3.2	EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL.....	19
3.3	TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS.....	24
3.3.1	Processos físico-químicos de coagulação/floculação/decantação.....	28
3.3.2	Processos oxidativos avançados.....	31
3.4	LEGISLAÇÕES PARA O LANÇAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL.....	36
3.5	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	38
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	41
4.2	COLETA DAS AMOSTRAS.....	42
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO.....	43
4.4	ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/DECANTAÇÃO.....	44
4.5	ENSAIOS DO PROCESSO FENTON.....	46
4.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS DADOS.....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE EFLUENTE BRUTO.....	51
5.2	TRATAMENTO COMBINADO DO EFLUENTE TÊXTIL BRUTO.....	53
5.2.1	Tratamento do efluente por coagulação/floculação/decantação.....	53
<i>5.2.1.1</i>	<i>Efeito das variáveis de coagulação, floculação e decantação.....</i>	<i>55</i>
5.2.2	Tratamento do efluente coagulado, floculado e decantado por reação Fenton...	64
<i>5.2.2.1</i>	<i>Efeito das variáveis na oxidação avançada Fenton.....</i>	<i>67</i>
5.3	QUALIDADE DO EFLUENTE FINAL.....	73
6	CONCLUSÕES.....	76
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

As indústrias em geral desempenham um papel importante no crescimento econômico de qualquer país, por outro lado, causam sérios impactos ambientais devido à geração de resíduos sólidos e líquidos potencialmente poluidores (SILVA; MENDES JUNIOR; LOBATO, 2020). As indústrias têxteis, por exemplo, se destacam por utilizar elevados volumes de água e por empregar inúmeros produtos químicos, como surfactantes, corantes, sais, agentes umectantes e outros compostos, durante seu processo produtivo, o que ocasiona a geração de quantidades expressivas de efluentes de alta complexidade (HOSSAIN *et al.*, 2018).

A composição dos efluentes têxteis é bastante heterogênea, pois a quantidade de produtos químicos e insumos empregados durante a produção do tecido (QUEIROZ *et al.*, 2019) varia com a etapa de processamento úmido (branqueamento, limpeza, tingimento, etc.) e com o tipo de fibra têxtil processada (lã, algodão, sintética, etc.) (ROSA *et al.*, 2019). Grande parcela desses insumos estão presentes no efluente, o que os concede características como: cor acentuada, alcalinidade, turbidez, DQO e COT elevada, e baixa biodegradabilidade (PIZATO *et al.*, 2017; MCYOTTO *et al.*, 2021).

O despejo dos efluentes têxteis *in natura* no ambiente, principalmente nos corpos hídricos, causa inúmeros efeitos negativos, destacando-se a elevação da turbidez, que reduz a penetração de luz e de oxigênio dissolvido na coluna d'água, o que afeta consequentemente a atividade fotossintética do meio, e incentiva a ocorrência de processos de eutrofização (GAROLE *et al.* 2018; ROSA *et al.*, 2019). Outro problema é a presença de moléculas corantes, os quais são tóxicos; apresentam efeitos cancerígeno e mutagênico; são facilmente assimilados pelos corpos hídricos; além de serem de difícil biodegradação (LELLIS *et al.*, 2019; BERKESSA *et al.*, 2020; MCYOTTO *et al.*, 2020).

Nesse âmbito, o tratamento eficaz e adequado dos efluentes industriais têxteis é obrigatório. Contudo, por efeito da sua alta variabilidade e natureza complexa, a mineralização dos poluentes e, consequentemente, a redução da toxicidade desses efluentes tem sido um grande desafio para as indústrias (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2019). Segundo Gilpavas *et al.* (2018) é importante o emprego de uma tecnologia eficiente de tratamento, porém, não seletiva, haja visto que os métodos convencionais de tratamento não conseguem degradar uma parcela significativa dos poluentes existentes nos efluentes têxteis.

Alternativamente, a combinação entre dois ou mais métodos de tratamento, merece considerável atenção por reduzirem os custos com tratamento e minimizar os problemas de poluição ambiental causado pelos efluentes industriais têxteis (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2019; MCYOTTO *et al.*, 2021).

Destaca-se, portanto, no tratamento de efluentes industriais têxteis a adoção de métodos físico-químicos, tais como a coagulação/floculação, combinados com processos de oxidação avançadas, homogêneos e/ou heterogêneos, que tem se mostrado eficaz e viável (FARSHCHI *et al.*, 2019; TORRES *et al.*, 2019).

A coagulação/floculação quando adotada para o pré-tratamento do efluente industrial têxtil garante a remoção dos sólidos em suspensão enquanto os processos de oxidação avançada, por atuarem em ampla faixa de poluentes, asseguram a mineralização dos poluentes orgânicos e inorgânicos complexos, como os corantes (ARULMATHI *et al.*, 2019; ILHAN *et al.*, 2019; TIANZHI *et al.*, 2021). Entre os processos oxidativos avançados existentes, a reação Fenton tem se sobressaído no tratamento do efluente têxtil, pois se trata de uma tecnologia simples que apresenta elevada eficiência dentro de uma perspectiva de viabilidade ambiental e econômica (GUO; WANG; XU, 2019; SILVA *et al.*, 2021).

Na literatura diversas pesquisas já foram desenvolvidas combinando a reação Fenton com o processo de coagulação/floculação para o tratamento de efluentes industriais têxteis, visando oportunizar economicamente e operacionalmente o tratamento e obter qualidade final ambientalmente satisfatória (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).

Os estudos citados acima permitem observar que a integração entre as tecnologias citadas é eficaz para o tratamento dos poluentes presentes nos efluentes industriais têxteis, porém, grande parte deles utilizam soluções sintéticas que simulam o efluente têxtil, enquanto o processamento de amostras reais tem sido pouco relatado. Considerando a complexidade deste efluente é importante a realização de pesquisas que utilizem o efluente real, de maneira que seja possível otimizar as condições de tratamento para que sejam alcançados os padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pelos órgãos competentes.

Nestes contextos, esta pesquisa visa avaliar a eficiência de um processo combinado de coagulação, floculação e decantação seguido pelo processo de oxidação avançado do tipo Fenton no tratamento de um efluente têxtil real, com vistas a atender os padrões legais de lançamento de efluentes e assegurar a conservação da biota em corpos hídricos receptores.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência de remoção de turbidez, cor aparente e DQO a partir de processo combinado de coagulação/floculação/decantação e reação Fenton no tratamento de um efluente têxtil real.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as amostras brutas do efluente têxtil real estudado, segundo os parâmetros de: pH, turbidez, cor aparente e DQO;
- Estudar a eficiência do processo físico-químico de coagulação/floculação/decantação no tratamento do efluente têxtil real, quanto a remoção de turbidez, cor aparente e DQO;
- Investigar, segundo planejamento fatorial, o comportamento das variáveis: dosagem de policloreto de alumínio e gradiente de velocidade de agitação na mistura rápida, no tratamento do efluente têxtil por coagulação/floculação/decantação;
- Avaliar a eficiência do processo de oxidação avançada tipo Fenton na remoção de cor e DQO do efluente pré-tratado por coagulação/floculação/decantação;
- Investigar, segundo planejamento fatorial, o efeito das variáveis: concentração de ferro e concentração de peróxido de hidrogênio no tratamento Fenton do efluente têxtil após pré-tratamento por coagulação/floculação/decantação.

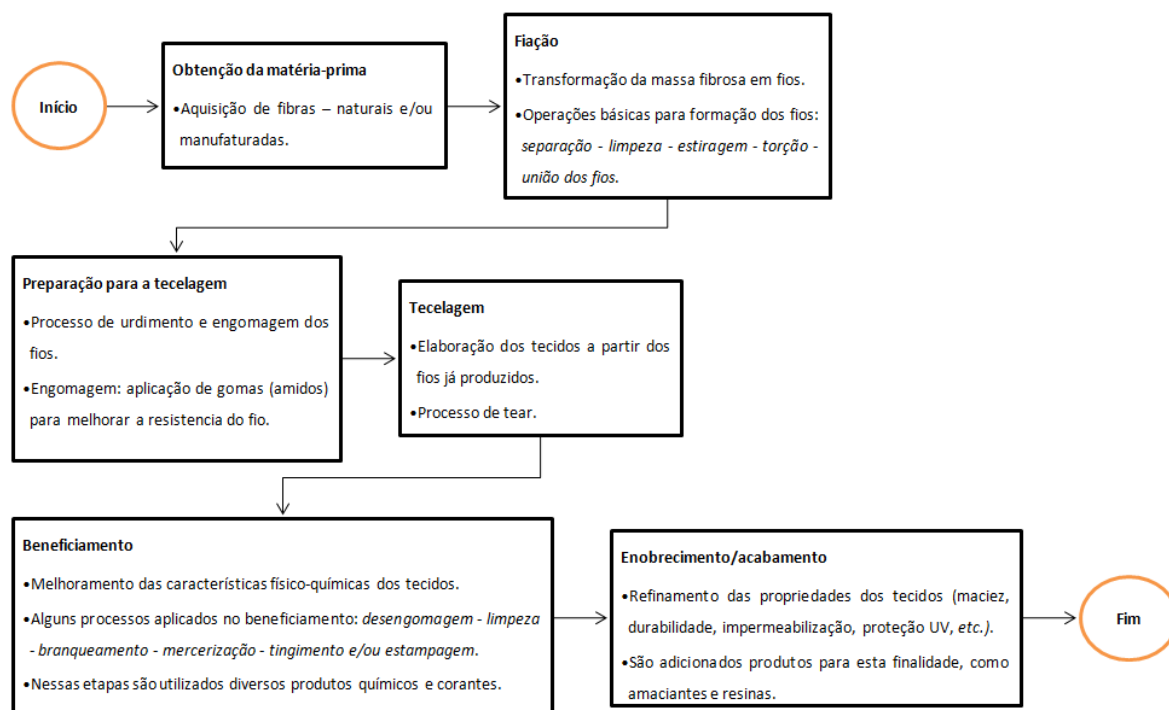
3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas informações da literatura que reforçam a importância do tema estudado. Bem como, a problemática ambiental envolvida no processamento têxtil, com seus aspectos e impacto, tecnologias de tratamentos existentes e a sua associação para a melhor eficiência na remoção de poluentes e os aspectos legais relacionados ao descarte de efluentes.

3.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil é um ramo do mercado que fabrica tecidos a partir da transformação da matéria-prima fibrosa, lã, algodão e fibras sintéticas, em fios (HOLKAR *et al.*, 2016; QUEIROZ *et al.*, 2019; RAMOS *et al.*, 2020). A fabricação dos tecidos passa por várias etapas de processamento, entre as quais destacam-se cinco estágios básicos de produção: obtenção da matéria-prima, fiação, tecelagem, beneficiamento e enobrecimento do tecido (ROSA *et al.*, 2019). Os principais aspectos e operações de cada uma dessas etapas de fabricação estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1 — Fluxograma das etapas envolvidas na fabricação do tecido.



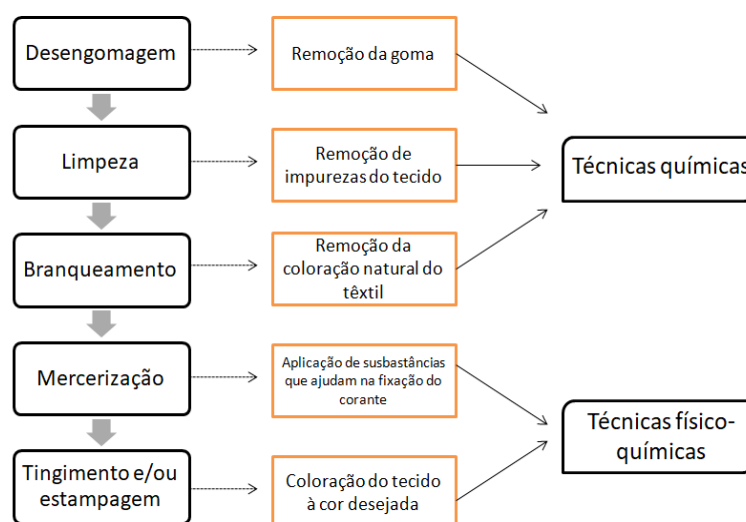
Fonte: Adaptado de Holkar *et al.* (2016); Queiroz *et al.* (2019).

Como visto, o produto de cada uma das etapas apresentadas é a matéria-prima da fase seguinte, por isso o processo produtivo do tecido é composto por estágios independente. A cadeia têxtil possui um caráter bastante diversificado, em cada estágio de produção do tecido há um grande número de segmentos diferenciados, com dinâmicas e estruturas próprias. Desse modo, podem existir empresas especializadas unicamente em um processo de produção do tecido (tecelagem, beneficiamento, tingimento e outras) ou empresas totalmente verticalizadas (cadeia produtiva completa) (FIEMG, 2014).

Durante os processos de formação do tecido, a utilização de água é constante e em grande quantidade, inclusive esse ramo industrial é um dos maiores consumidores de água quando comparado a outros segmentos industriais (ALMEIDA; DILARRI; CORSO, 2014). O maior consumo de água ocorre na etapa de beneficiamento têxtil (PIZATO *et al.*, 2017; ROSA *et al.*, 2019), por isso Holker *et al.* (2016) considera o beneficiamento como um estágio de fabricação de processamento úmido.

De maneira resumida, a etapa de beneficiamento têxtil visa melhorar as características físico-químicas dos tecidos e lhes conferir cor ou estampada (FIEMG, 2014). Para tanto, estes são submetidos a várias operações, realizadas com a aplicação de técnicas físicas e químicas. A Figura 2 detalha as operações realizadas no processo de beneficiamento.

Figura 2 — Detalhamento das operações realizadas na unidade de beneficiamento têxtil.



Fonte: Adaptado de Bisschops e Spanjers (2003); FIEMG (2014); Holkar *et al.* (2016).

Como mencionado, o beneficiamento requer a utilização de maiores volumes de água e a quantidade a ser usada varia conforme técnica operada, categoria de tecido a ser fabricado e equipamento utilizado, na desengomagem, a título de exemplo, utiliza-se cerca de 12 a 35 litros

de água por kg/tecido produzido (VERMA; DASH; BHUNIA, 2012; HUSSAIN; WAHAB, 2018).

Entre as operações de beneficiamento têxtil as fases de limpeza, branqueamento e de tingimento se sobressaem por consumir mais água (HUSSAIN; WAHAB, 2018). A Tabela 1 apresenta a faixa de volume de água utilizado no processamento úmido.

Tabela 1 — Consumo de água nas operações de beneficiamento têxtil.

Processos de beneficiamento úmido	Consumo de água em L/kg
Desengomagem	12,5 – 35
Limpeza	4 – 78
Branqueamento	30 – 50
Tingimento e/ ou estampagem	20 – 300

Fonte: Adaptado de Bisschops e Spanjers (2003); Hussain e Wahab (2018).

Além do considerável volume de água a indústria têxtil também emprega uma elevada parcela de produtos químicos e insumos necessários para fabricação do tecido (GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2017), estes produtos são aplicados em sua grande maioria no estágio de beneficiamento têxtil, assim como a água, para a retirada de impurezas, branqueamento, tingimento dos tecidos e outras finalidades (HUSSAIN; WAHAB, 2018).

Segundo Bisschops e Spanjers (2003) e Tavangar *et al.* (2019) no processamento têxtil são utilizados geralmente constituintes químicos, como: álcalis, ácidos, compostos inorgânicos, como carbonato, cloreto e sulfato, produtos químicos de branqueamento e enzimas, amido, corantes, resinas, solventes, ceras e óleos, a maioria desses produtos são recalcitrantes e também bioacumulativos.

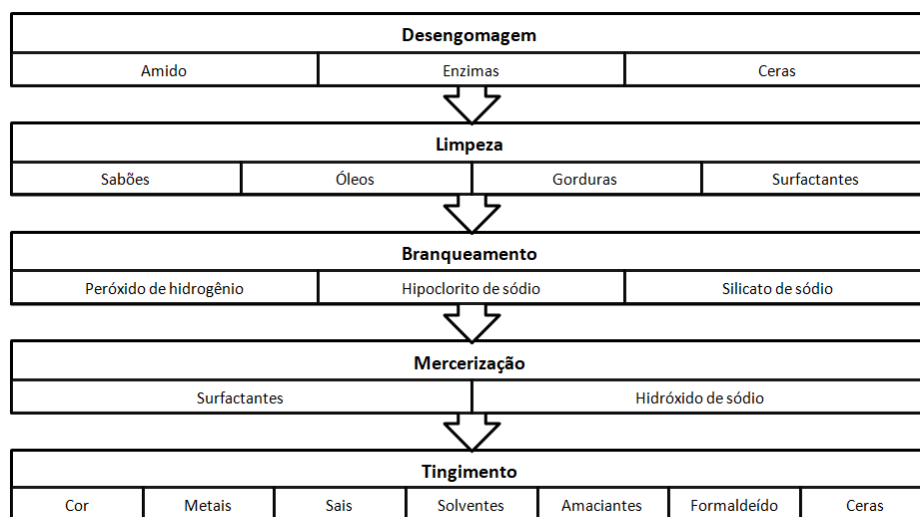
3.2 EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTEL

Por conta da grande quantidade de água utilizada é gerado um volume considerável de efluente industrial. Alguns estudos revelam que aproximadamente 80% da água consumida durante a cadeia de produção do substrato têxtil é descartada como efluente (WANG, 2016) e, comumente, são as operações de processamento úmido que geram os maiores volumes de efluentes (HOSSAIN *et al.*, 2018).

Os efluentes têxteis são compostos por uma mistura complexa de produtos químicos em função dos inúmeros insumos aplicados ao longo dos processos de fabricação do tecido, sobretudo durante as operações de limpeza, tingimento e estampagem (PIZATO *et al.*, 2017;

BILIŃSKA *et al.*, 2019; RAMOS *et al.*, 2020), na Figura 3 são relacionados alguns poluentes presentes na água ao final de cada estágio de beneficiamento.

Figura 3 — Principais poluentes gerados durante o processamento úmido.



Fonte: Adaptado de Verma, Dash e Bhunia (2012); Holkar *et al.* (2016).

Os efluentes industriais têxteis são caracterizados por apresentar intensa coloração; pH alcalino; e elevados teores de turbidez, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Carbono Orgânico Total (COT) e Sólidos Totais (ST); além disso, o maior destaque deve ser dado a presença abundante de compostos orgânicos não biodegradáveis (ORTS *et al.*, 2018), e por esse motivo, possuem toxicidade elevada. A Tabela 2 apresenta a caracterização do efluente têxtil realizada por diversos autores.

Tabela 2 — Características dos efluentes têxteis por diferentes autores.

pH	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	ST (mg/L)	Cor aparente (mg Pt/L)	Turbidez (NTU)	Referência
9	3257	-	-	819	75	Karam <i>et al.</i> (2020)
9,2	2250	486	1063	-	88,7	Arulmathi <i>et al.</i> (2019)
7,8	1130	289	3570	-	220	Torres <i>et al.</i> (2019)
10,9	5820	-	-	4500	66,8	Dotto <i>et al.</i> (2018)
10,3	2072,97	-	-	422,28	606	Favero <i>et al.</i> (2018)
7,06	420	36,5	1341	-	308	GilPavas <i>et al.</i> (2018)
9,96	865	118	2464	1274	184	GilPavas, Dobrosz-Gómez e Gómez-García (2017)
5,15	659	328	1187	-	37	Pizato <i>et al.</i> (2017)
7,72	1346,17	278,54	593,55	91,7	-	Bazrafshan, Alipour e Mahvi (2015)

Fonte: Adaptado pelo autor (2021).

Os valores médios apresentados na Tabela 2 ilustram uma ampla faixa de pH variando de ácido a alcalino (5-10), que está relacionado principalmente ao grupamento do corante utilizado. Para a DQO observa-se que há efluentes até 35 vezes mais concentrado do que outros (400-14000 mg/L), além disso, nota-se turbidez variando de 37 a 606 NTU e intensa coloração, essa multiplicidade caracterizam a alta variabilidade desses tipos de efluentes.

De acordo com Pizato *et al.* (2017) os níveis de DBO estão associados à presença de compostos orgânicos biodegradáveis (amidos, etc.), oriundos principalmente das atividades de desgumagem e limpeza, e conforme Orts *et al.* (2018) os teores de DQO, cor e turbidez indicam a presença de corantes e outros aditivos inorgânicos utilizados durante o processo de tingimento do tecido e nas demais operações de beneficiamento. Normalmente os corantes presentes nos efluentes têxteis apresentam uma DQO variando de 250-1400 mg/L (GARCIA-SEGURA *et al.*, 2018).

Sucintamente, nos efluentes têxteis é possível encontrar corantes, metais, surfactantes, íons inorgânicos, agentes umectantes e outros compostos recalcitrantes (TAVANGAR *et al.* 2019). Entre estes, os corantes são identificados como a fonte mais efetiva de contaminação dos corpos hídricos, seguidos pelos surfactantes, devido a sua alta solubilidade em água, baixa biodegradabilidade e caráter cancerígeno, por essa razão, estes efluentes são nocivos ao meio ambiente e um risco para a saúde humana (NIEBISCH *et al.*, 2014; LELLIS *et al.*, 2019; QUEIROZ *et al.*, 2019).

Os corantes são compostos orgânicos aromáticos que podem ser classificados quanto a sua estrutura química ou conforme o modo pelo qual ele é fixado à fibra, que pode acontecer por quatro tipos de interações, que são: ligações iônicas; de hidrogênio; covalentes; e de van der Waals, com isso destacam-se os seguintes grupos de corantes: dispersos, ácidos, azóicos, básicos, diretos, reativos, à cuba e sulfurosos (GUARATINI; ZANONI, 2000; ELRAHIM *et al.*, 2017). A classificação química dos corantes é estabelecida pela natureza dos grupos cromóforos, que são as estruturas que conferem cor, as principais são: metina (-CH=), carbonila (-C=O), azo (-N=N), nitro (-NO₂) e quinonas (WARING; HALLAS, 2013).

Ainda em suas estruturas, os corantes apresentam grupos funcionais auxocromos, que auxiliam na fixação, intensificação e estabilidade das cores. Esses grupamentos são formados por agrupamentos de: carboxilas (-COOH), aminas (-NH₂), alquilaminas (-R-NH₂), metoxilas (-COOCH₃), hidroxilas (-OH), dentre outros (MENDES; DILARRI; PELEGRINI, 2015).

Entre os apresentados, os corantes azo ganharam destaque como a principal classe de corantes utilizada na indústria têxtil (cerca de 70%), devido sua síntese relativamente simples e quase ilimitado número e categorias de substituintes (RIBEIRO *et al.*, 2013). Os azo corantes

possuem grupos tóxicos em sua molécula, como os anéis benzeno e naftaleno.

Os corantes são utilizados no processo de tingimento e estampagem (beneficiamento têxtil), a escolha do corante a ser utilizado depende da matéria-prima fibrosa trabalhada, visto que cada fibra possui características próprias. Para garantir boa aplicabilidade, os corantes devem apresentar alta afinidade, uniformidade na coloração e resistência ao desbotamento, pois os tecidos são fabricados para suportar fatores ambientais adversos durante toda sua vida útil, como exposição à luz solar, água e sabões (GUARATINI; ZANONI, 2000; NAVARRO, GABALDÓN; GÓMEZ-LOPEZ, 2017).

Os corantes se perdem na linha de produção, sobretudo quando é realizada a lavagem dos tecidos para finalização e fixação da cor, em função disso são gerados efluentes com forte coloração (BHATIA *et al.*, 2017; QUEIROZ *et al.*, 2019), mesmo em quantidades pequenas (<1,0 mg/L) a coloração do efluente final é forte (MCYOTTO *et al.*, 2020). Alguns estudos estimam que cerca de 10-15% da massa de corantes empregada no beneficiamento têxtil é perdida no efluente final (NIEBISCH *et al.*, 2014; LELLIS *et al.*, 2019), o que representa o lançamento de quase 1,2 toneladas/dia desses produtos no ambiente (GUARATINI; ZANONI, 2000). A porcentagem de corante não fixados no tecido que se apresentam biodisponíveis na água residuária têxtil, bem como seus poluentes, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 — Corantes utilizados na indústria têxtil e sua biodisponibilidade nos efluentes.

Classe do corante	Descrição	Disponível no efluente (%)	Poluentes
Ácido	Compostos aniônicos solúveis em água	7 – 20	Cor, ácidos orgânicos e corantes não fixados.
Direto	Compostos aniônicos solúveis em água.	5 – 20	Cor, sal, corante não-fixado, fixadores, agentes catiônicos surfactantes, antiespumante, agentes retardantes e igualizantes etc.
Disperso	Compostos não-iônicos, insolúveis em água.	1 – 20	Cor, ácidos orgânicos, agente de igualização, fosfatos, anti-espumantes, lubrificantes, dispersantes.
Reativo*	Compostos aniônicos solúveis em água.	10 – 50	Cor, sal, álcalis, corantes hidrolisados, surfactantes, anti-redutores orgânicos, antiespumantes etc.
Azóico	Insolúveis em água	10 – 40	Corante, naftol, formaldeído, soluções básicas, sabões.

*Classe mais importante de corantes.

Fonte: Adaptado de Beltrame (2006); CETESB (2009).

Os poluentes liberados por esses efluentes alteram significativamente o ecossistema, impactando de forma direta ou indireta o meio ambiente, com danos aos corpos d'água que vão além dos prejuízos estéticos, causam impactos como a poluição e contaminação das águas. Os compostos presentes nos efluentes têxteis são em grande parcela persistentes, o que confere características tóxicas e bioacumulativas, que provocam problemas graves para o meio ambiente e para a saúde humana (LELLIS *et al.*, 2019).

Os efluentes têxteis favorecem a elevação da turbidez e cor, e se disposto *in natura* no corpo hídrico causa escassez de luz e de oxigênio e aumento da temperatura na coluna d'água, alterando as atividades fotossintéticas desse meio, interferindo de maneira permanente no desenvolvimento dos organismos aquáticos, como consequência registra-se o desequilíbrio do ambiente local. Além disso, esses efluentes também podem ser letais para certas formas de vida marinha devido à ocorrência de metais pesados; principalmente cromo, cobre e cádmio, por serem utilizados na produção de agentes tintoriais; e compostos clorados (HOLKAR *et al.*, 2016; RAMOS *et al.*, 2021).

Outra questão preocupante do despejo sem tratamento dos efluentes coloridos diz respeito, especificamente, ao fato de que os corantes são na sua maioria compostos inibidores de microrganismos, por disso, possuem pouca chance de serem degradados naturalmente e completamente no ambiente e sua degradação quando realizada de maneira incompleta pode gerar subprodutos altamente nocivos ao homem e aos organismos aquáticos (ALMEIDA; DILARRI; CORSO, 2014; VIKRANT *et al.*, 2018).

A presença de corantes no meio aquático pode causar eutrofização, consumir oxigênio e, portanto, evitar a reoxigenação da água, bem como tem a tendência de sequestrar metais resultando na genotoxicidade e microtoxicidade de peixes e outros organismos aquáticos, isso por os corantes serem assimilados quimicamente e biologicamente pelo meio em que estão presentes (FOO; HAMEED, 2010). Assim, por meio da cadeia alimentar, eles podem atingir o ser humano causando uma série de patologias (KHAN; MALIK, 2018).

O corante verde malaquita ($C_{23}H_{25}ClN_2$), por exemplo, um corante do grupo azo bastante utilizado no tingimento do tecido, pode causar diversas patologias, tais como insônia, diarreia difusa, vômito, irritação na pele e até mesmo tumores gastrointestinais, além de afetar significativamente a fauna aquática (BAEK *et al.*, 2010; MCYOTTO *et al.*, 2020).

Em vista do apresentado, é indispensável o tratamento eficaz e adequado dos efluentes têxteis, com o objetivo de minimizar sua toxicidade, os riscos para o meio ambiente e a saúde humana, e também atender os parâmetros estabelecidos para o lançamento em corpos d'água ou para sua reutilização.

3.3 TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

O tratamento dos efluentes industriais têxteis é indispensável, seja para atender aos padrões exigidos por lei para o seu descarte no ambiente ou para atingir os padrões para o reuso no sistema de produção. Para isso, alguns métodos de tratamento devem ser empregados, destacam-se processos de tratamentos: físico, químico, biológico e híbrido.

Nos processos físicos destacam-se métodos de tratamento por filtração e adsorção. A filtração possui tecnologias variadas para o tratamento do efluente industrial têxtil, tais como ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa, que podem ser utilizados tanto para filtração e reciclagem do corante, quanto para a limpeza de águas residuais (VERMA; DASH; BHUNIA, 2012). Segundo Hussain e Wahab (2018) a filtração é muito eficaz na remoção de corantes, ainda que seja quase sempre necessário que os efluentes sejam pré-tratados para remoção de material dissolvido e para garantir que o meio filtrante não colmate com frequência.

A adsorção é um método físico de remoção de cor do efluente baseado na afinidade de diversos corantes por adsorventes, trata-se de uma técnica muito eficaz para adsorver corantes catiônicos, a título de exemplo (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2019). Deste modo a escolha do material adsorvente ideal é determinada principalmente pela sua capacidade de fixação dos poluentes (HOLKAR *et al.*, 2016). O adsorvente mais utilizado pelas indústrias é o carvão ativado por ter alta afinidade para muitos corantes, entretanto, seu custo é elevado (YADAV; MUKHERJI; GARG, 2013). Diante disso, algumas pesquisas vêm testando o uso de materiais de menor custo, tais como argila bentonita, polímero de resinas, resíduos de trigo, carvão de casca de noz e outros (HOLKAR *et al.*, 2016).

O tratamento por adsorção possui certas limitações, notadas maiormente na hora do descarte ecologicamente correto dos adsorventes gastos, que podem ser altamente poluidores se dispostos inadequadamente, em adição, os custos de manutenção dos adsorventes são altos e na maior parte das vezes há a necessidade de pré-tratamento do efluente para reduzir os sólidos suspensos e aumentar a vida útil do material adsorvente (VERMA; DASH; BHUNIA, 2012).

A coagulação seguida de floculação é um método físico-químico bastante eficiente no tratamento de efluentes têxteis, especialmente para remoção de colóides e sólidos suspensos, pois pode promover a redução de até 100% desse material, os quais representam cerca de 50% da carga orgânica total de um efluente têxtil, apesar disso a desvantagem desses processos está relacionada a pouca ação na remoção de corantes reativos (GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2017; GILPAVAS *et al.*, 2018).

Entre os processos químicos destacam-se os métodos que envolvem a utilização de agentes oxidantes, como os processos de oxidação química e oxidação avançada, ou aqueles que usem coagulantes, como o processo específico de coagulação. Os processos de oxidação química e avançada podem ser aplicados para remover corantes de efluentes têxteis e reduzir sua carga poluidora, porém de acordo com Ramos *et al.* (2021) essas metodologias não são recomendadas para grandes volumes de efluentes.

Os métodos biológicos podem ser classificados em aeróbicos e anaeróbicos e consiste na utilização de fungos, algas, bactérias ou outros microrganismos para degradação da matéria orgânica presente no efluente têxtil. A eficiência dos processos biológicos é influenciada pela proporção entre a carga orgânica do efluente e a carga de microrganismos adotado (HOLKAR *et al.*, 2016). Vale saber que esse tipo de tratamento precisa de grande área para ser executado, além de produzir intermediários tóxicos (degradação incompleta dos poluentes) e apresentar baixa eficiência na remoção de DQO (PIZATO *et al.*, 2017).

Os processos biológicos, por exemplo, não são eficazes para a degradação de efluentes contendo corante azo, porque os microrganismos presentes são inibidos por alguns poluentes, ademais é necessário a aeração artificial e normalmente requer nitrogênio e suplementação de fósforo, devido à falta de nutrientes nesses efluentes, aumentando significativamente os custos com o tratamento (KARTHIK; RATHINAMOORTHY, 2015)

Em geral, cada técnica adotada no tratamento de efluentes têxteis possui sua própria característica; aplicabilidade; limitação; eficiência; custo; impacto ambiental; entre outras particularidades. Conhecer as limitações de cada método é fundamental para escolha do tratamento. O Quadro 1 resume as vantagens e desvantagens dos tratamentos mais utilizados para a adequação dos efluentes industriais têxteis.

Quadro 1 — Comparação entre os diferentes processos de tratamento de efluentes têxteis.

Tratamento	Vantagens	Desvantagens
Filtração	Eficaz na remoção de corantes; Reuso da camada filtrante (membrana).	Incrustação frequente da membrana; Necessidade de diferentes pré-tratamentos; Alto custo.
Adsorção	Alta eficiência na remoção de compostos muito estáveis;	A boa retenção dos corantes na adsorção depende da interação do corante com o material adsorvente; Necessidade de pré-tratamento para retirada dos sólidos suspensos; Alto custo.

Coagulação/floculação	Eficiente na remoção de coloides e sólidos suspensos (turbidez); Economicamente viável.	Não degrada compostos orgânicos solúveis (como corantes); Geração de lodo.
Oxidação avançada	Alta eficiência na descoloração; Poluentes mineralizados, ou seja, não há transferência de fase dos poluentes.	Pode gerar lodo; Alta complexidade tecnológica; Alto custo.
Aeróbio	Processo limpo; Eficiente na remoção de matéria orgânica.	Tratamento não eficaz na degradação de corantes; Processo de tratamento lento; Geração de lodo.
Anaeróbio	Processo mais rápido do que o aeróbio;	A descoloração é limitada ao tipo de corante; O sistema não suporta altas vazões.

Fonte: Adaptado de Verma, Dash e Bhunia (2012); Holkar *et al.* (2016); Collivignarelli *et al.* (2019).

Conforme exposto acima os métodos de tratamento possuem alguma desvantagem, principalmente no que se refere a remoção de compostos recalcitrantes, tóxicos e inibidores presentes nos efluentes têxteis e geração de subprodutos e lodos. A eficiência na remoção de poluentes dos diversos processos de tratamento de efluentes têxteis é ilustrada na Tabela 4.

Tabela 4 — Comparação de eficiência dos diversos métodos de tratamento de efluentes têxteis.

Método de tratamento	Eficiência/Resultados	Referência
Coagulação	Remoção de 78% de cor com a utilização de policloreto de alumínio.	Mcyotto <i>et al.</i> (2021)
Processo Fenton	Remoção de 84% de DQO e 98% de cor.	Ilhan <i>et al.</i> (2019)
Adsorção com biomassa da casca de eucalipto	65% de adsorção de corantes.	Tahir, Bhatti e Iqbal (2016)
Adsorção com carvão ativado	Aumento da degradação de DQO de 47,6% para 81% do efluente obtido no pré-tratamento por coagulação.	Yadav, Mukherji e Garg (2013)
Processo biológico com fungo	Remoção de 91,2% da cor do efluente após 168h de biotratamento.	Pizato <i>et al.</i> (2017)

Tratamento biológico por reator anaeróbio tipo UASB	Eficiência média de remoção de DQO em torno de 82% após 70 dias de operação.	Santos <i>et al.</i> (2017)
Ultrafiltração e nanofiltração	Retenção de aproximadamente 100% de DQO e 90% da cor.	Aouni <i>et al.</i> (2012)
Nanofiltração	Remoção de cor entre 40 a 80%	Riera-Torres, Gutiérrez-Bouzán e Crespi (2010)

Fonte: Adaptado pelo autor (2021).

É importante salientar que para a escolha do processo de tratamento correto algumas outras questões precisam ser estudadas, tais como as características do efluente a ser tratado e o destino final dos mesmos, seja para reuso, no corpo receptor ou outro destino; entre outras (FORMENTINI-SCHMITT *et al.*, 2013). Via de regra, buscam-se por tratamentos econômicos e tecnicamente viáveis e que gerem um afluente de maior qualidade, isto é, sem a presença de intermediários tóxicos.

Como exemplificado no Quadro 1 e na Tabela 4 a aplicação de um único método não se mostra eficaz no tratamento do efluente industrial têxtil. Devido a isso, usualmente, dois ou mais métodos de tratamento tem sido empregado de modo a atingir um nível adequado de remoção da carga orgânica presente nos efluentes gerados por esse segmento (HOLKAR *et al.*, 2016; COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2019; RAMOS *et al.*, 2021).

Os métodos combinados de tratamento são conhecidos como híbridos (HOLKAR *et al.*, 2016), diversas técnicas em conjunto têm sido utilizadas no tratamento de efluentes têxteis, como oxidação avançada/Fenton-biológico (SANTOS *et al.*, 2017), coagulação/floculação-filtração/ultrafiltração (BADAWI; ZAHER, 2021), entre outras. Em termos gerais, os processos de tratamento existentes podem ser combinados de diferentes formas, considerando a efetividade final do tratamento.

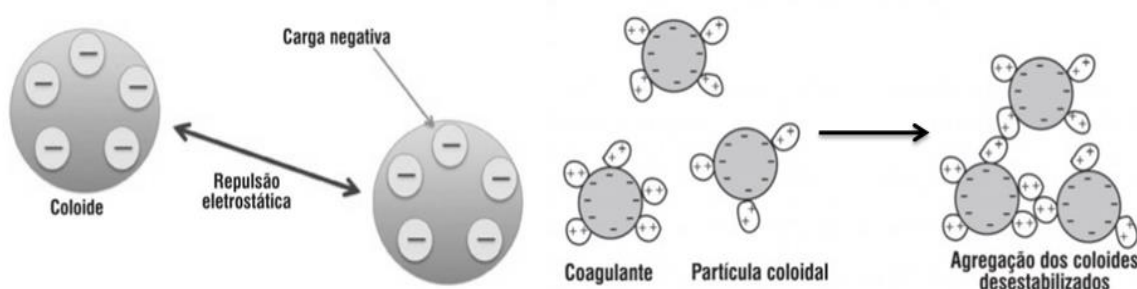
A combinação do tratamento biológico com o químico, por exemplo, é adequada para a remoção da matéria orgânica presente nos efluentes têxteis, tendo em vista a aplicabilidade de cada um desses métodos. A oxidação mineraliza os compostos orgânicos recalcitrantes e os corantes, aumenta a biodegradabilidade do efluente, promovendo então a remoção dos demais poluentes pelo tratamento biológico (HOLKAR *et al.*, 2016). Já GilPavas, Dobrosz-Gómez e Gómez-García (2017) obtiveram bons resultados ao aplicar processos oxidativos avançados por reações do tipo Fenton e Foto-Fenton no tratamento de água residuária têxtil antecedida pelo processo físico-químico de coagulação/floculação.

O tratamento de efluentes têxteis pelos processos combinados de oxidação avançada e coagulação/floculação também merece destaque. A coagulação/floculação é um dos métodos mais adotados atualmente no tratamento de águas residuárias, graças à sua simplicidade de operação, baixo custo e eficiência na remoção de sólidos suspensos e coloides, enquanto os processos oxidativos apresentam bons resultados na mineralização de poluentes persistentes (FAVERO *et al.*, 2018; QUEIROZ *et al.*, 2019; MCYOTTO *et al.*, 2021; RAMOS *et al.*, 2021). A associação desses processos pode garantir viabilidade econômica e ambiental do tratamento.

3.3.1 Processos físico-químicos de coagulação/floculação/decantação

A coagulação é um processo físico-químico que implica na adição de coagulantes, para redução da força eletrostática de repulsão, que mantêm separadas as partículas suspensas e coloidais presentes no efluente. Quase sempre, estas partículas possuem cargas negativas que com a introdução do coagulante, na maioria das vezes de carga positiva, oriundos de íons metálicos de alumínio e/ou ferro, são neutralizadas e desestabilizadas (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2019; SAMSAMI *et al.*, 2020). Na sequência acontece a floculação cuja finalidade é facilitar o transporte das partículas já desestabilizadas no líquido para estas terem contato e formem flocos capazes de serem removidos por sedimentação (SAMSAMI *et al.*, 2020). Estes processos são exemplificados na Figura 4.

Figura 4 — Esquematização do processo de coagulação e floculação.



Fonte: Sasaki (2015); Stoukov (2015).

A coagulação, floculação e decantação é um processo de tratamento bem-sucedido e bastante adotado para clarificação de água, no tratamento de efluentes têxteis este processo tem sido amplamente utilizado como tratamento principal ou pré-tratamento, por promover a remoção de sólidos suspensos, além de aumentar a biodegradabilidade dos efluentes (ANJANEYULU; CHARY; RAJ, 2005; HOLKAR *et al.*, 2016; TIANZHI *et al.*, 2021). A

principal vantagem desse processo diz respeito ao seu custo-benefício. Todavia, o processo possui certos entraves em relação a sua aplicação a efluentes têxteis, entre os quais se destaca a geração de lodo e a descoloração insuficiente de algumas composições coloridas (VERMA; DASH; BHUNIA, 2012).

O sucesso da coagulação, floculação e decantação depende de diversos fatores, especialmente da escolha adequada do coagulante, bem como suas concentrações, e características do efluente (AHMED *et al.*, 2020; MYCOTTO *et al.*, 2021), pois estes fatores influenciam diretamente a aglomeração das partículas, que pode ocorrer através de quatro mecanismos, de ação combinada ou não, que são: compressão da dupla camada; adsorção e neutralização de carga; varredura e formação de pontes (YIN, 2010).

Na compressão da dupla camada, a introdução de um eletrólito indiferente (sais simples, tais como cloreto de sódio) no líquido, resulta na redução da espessura da camada difusa, eliminando a estabilização eletrostática do sistema coloidal, possibilitando, portanto, sua aproximação.

Já o mecanismo de adsorção/neutralização refere-se à neutralização da carga negativa dos coloides, a partir da ação de um coagulante que libera cátions de alumínio ou ferro na água. Este processo ocorre sobre forte agitação, elevado gradiente de velocidade, de maneira a permitir que o coagulante entre em contato rapidamente com as partículas coloidais, promovendo a desestabilização dos coloides e a formação de microflocos. E a ponte entre partículas transcorre quando um polímero proporciona a formação de uma grande cadeia polimérica que adsorve as partículas poluidoras, esse mecanismo acontece quando se emprega um polímero de peso molecular elevado (DI BERNARDO, 2005).

No mecanismo de coagulação por varredura o coagulante é adicionado em maior concentração, promovendo a formação de um precipita do tipo $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Os flocos formados a partir do mecanismo de varredura tendem a ser maiores e sedimentam ou flutam com maior facilidade, quando comparados aos flocos obtidos com a coagulação realizada no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas. O mecanismo por varredura acontece quando um coagulante encapsula partículas em suspensão num floco coloidal, possibilitando sua decantação (DI BERNARDO, 2005).

O potencial zeta é considerado a medida mais precisa para determinar quanto a carga das partículas foi reduzida, ou seja, qual mecanismo ocorreu no processo de coagulação, em síntese, trata-se da fronteira entre a camada compacta e difusa de um coloide, quanto maior o potencial zeta maior a camada difusa do coloide e sua estabilidade, portanto, mais difícil é a formação de flocos (KIM *et al.*, 2014).

Quando o potencial zeta está acima de $+30\mu\text{m}$ e abaixo de $-30\mu\text{m}$ considera-se que as partículas coloidais estão estabilizadas, neste caso, quando há a aproximação de coloides com cargas semelhantes, havendo interação entre as camadas difusas, a força eletrostática entre eles promoverá a repulsão, à medida que se distancia da superfície da partícula coloidal a energia potencial de repulsão é diminuída. Por outro lado, existem forças de atração entre as partículas coloidais, chamadas de forças de van der Waals. O equilíbrio entre as forças eletrostáticas de repulsão e a atração de van der Waals, entre partículas que se movem aleatoriamente em decorrência do bombardeamento pelas moléculas de água (movimento Browniano), favorecem a estabilidade do sistema coloidal. Quando o potencial zeta encontra-se entre $+30\mu\text{m}$ e $-30\mu\text{m}$ o sistema coloidal está desestabilizados, a força de repulsão são diminuídas e as partículas coloidais se aglutinam formando flocos maiores e mais densos (KUMAR *et al.*, 2017).

O processo de tratamento por coagulação deve ser realizado com agitação intensa e em pouco tempo, também conhecido como etapa de mistura rápida, para que o coagulante e o efluente interajam e as partículas de impurezas tornem-se desestabilizadas. A floculação deve ocorrer em agitação moderada e tempo de reação maior, também conhecida como estágio de mistura lenta, para haja o choque e agregação dos microflocos produzidos na coagulação e assim a formação de flocos capazes de sedimentar.

O rendimento do processo de coagulação/floculação pode ser melhorado por meio da seleção adequada de coagulantes e auxiliares floculantes, além da otimização de outros fatores, como pH de coagulação, dosagens de coagulante e floculante, tempo de detenção e gradientes de velocidade de misturas (rápida e lenta), tempo de sedimentação, etc. (VERMA; DASH; BHUNIA, 2012; ARULMATHI *et al.*, 2019).

Quanto ao agente coagulante que deve ser utilizado no processo de coagulação, têm-se no mercado, coagulantes com base inorgânica ou orgânica ou naturais (RAMOS *et al.*, 2021), e segundo Verma, Dash e Bhunia (2012) a escolha desse produto deve ser tomada avaliando-se a eficiência de cada classe, a quantidade e tipo de lodo gerado, além do custo do processo.

Conforme Mcyotto *et al.* (2020), na indústria têxtil a maioria dos corantes utilizados no tingimento do tecido são de caráter aniônico, portanto, o efluente tem natureza aniônica, logo, o coagulante catiônico é preferido em relação aos coagulantes aniônicos e não iônicos, para desestabilização das partículas de impurezas e formação de flocos, garantindo, desse modo, a remoção da carga orgânica dos efluentes.

Coagulantes de polímero inorgânico, como policloreto de alumínio (PAC), policloreto férrico (PFCI) e polissulfato férrico (PFS), são apontados como ótimos coagulantes, pois removem melhor a cor e DQO do efluente, mesmo em pequenas dosagens e também possuem

efetividade em uma faixa mais ampla de pH, reduzindo o custo do tratamento, por isso são amplamente utilizados no tratamento de águas residuárias têxteis (WANG, 2020). Apesar disso, esses coagulantes geram lodos (resíduos) de difícil tratabilidade (RAMOS *et al.*, 2021).

Notadamente, a dosagem de coagulante é considerada um dos fatores mais influentes na eficiência do processo de tratamento por coagulação/floculação. O desempenho de diferentes coagulantes na remoção de DQO e cor de efluentes têxteis estão sumarizadas na Tabela 5.

Tabela 5 — Eficiência de diferentes coagulantes no tratamento de efluentes têxteis.

Coagulante	Dose ótima (mg/L)	Contaminante	DQO removida (%)	Cor removida (%)	Referência
Policloreto de alumínio	400	Corante reativo	-	78,2	Mcyotto <i>et al.</i> (2021)
Policloreto de alumínio	500	Efluente têxtil	41,4	-	Tianzhi <i>et al.</i> (2021)
Cloreto férrico	1000	Efluente têxtil	61	82,7	Ahmed <i>et al.</i> (2020)
Bentonita + alginato de Na	160 + 4	Efluente sintético com corante	-	98,2*	Mcyotto <i>et al.</i> (2020)
Sulfato de alumínio	200	Efluente de lavanderia	93,08	9,02	Silva <i>et al.</i> (2019)
Polianilina	1600	Efluente têxtil	91,45	94,38	Arulmathi <i>et al.</i> (2019)
Sulfato de alumínio	600	Efluente de lavanderia	73,6	-	Dotto <i>et al.</i> (2018)

*% de remoção do corante verde malaquita.

Fonte: Adaptado pelo autor (2021).

A Tabela 5 confirma a importância da escolha correta do coagulante e otimização da sua dosagem para redução da carga poluidora do efluente, e como resultado a minimização dos impactos ambientais causados por estes.

3.3.2 Processos oxidativos avançados

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) se baseiam no emprego de fortes agentes oxidantes, como o ozônio ou peróxido de hidrogênio, podendo estar associado a catalisadores (Fe, FeCl₂, TiO₂) com ou sem fonte de irradiação, para degradação de poluentes (PAULINO;

ARAÚJO; SALGADO, 2015). Nos POAs, a oxidação depende da formação do radical hidroxila ($\text{HO}^\bullet$), pois é esta espécie a principal responsável pela eficiência do processo (HOLKAR *et al.*, 2016; FERNANDES *et al.*, 2021).

Em geral, os processos oxidativos são classificados como homogêneos ou heterogêneos e a formação do radical hidroxila pode ocorrer com ou sem radiação UV, como exposto no Quadro 2.

Quadro 2 — Classificação dos processos oxidativos avançados.

Sistemas	Sem irradiação	Com irradiação
Homogêneos	$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ O_3/OH^- $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ (Fenton)	O_3/UV $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ UV/US $\text{H}_2\text{O}_2/\text{US}$ $\text{Solar}/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ Feixe de elétrons
Heterogêneos	Eletro-Fenton	$\text{TiO}_2/\text{O}_2/\text{UV}$ $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$

Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2016).

Os POAs em condições ideais conseguem converter poluentes refratários em espécies químicas inócuas, podendo levar até a mineralização total desses contaminantes, isto é, nesses processos não há transferência de fase dos poluentes, diferenciando-se de outras tecnologias onde as impurezas apenas mudam de fase (GHANBARI; MORADI, 2015), devido ao alto potencial de oxidação do radical $\text{HO}^\bullet$ e da rapidez em que ocorre essa oxidação (HOLKAR *et al.*, 2016).

Além disso, os radicais hidroxilas formados são altamente reativos e não seletivos, por isso, atacam a maioria das moléculas orgânicas presentes nos efluentes, independentemente da presença de outros compostos, o que configura uma importante vantagem na utilização dessa técnica no tratamento de águas residuárias (PIGNATELLO; OLIVEROS; MACKAY, 2006; FARSHCHI *et al.*, 2019).

Nas águas residuais têxteis os POAs conseguem oxidar boa parte dos produtos químicos orgânicos e inorgânicos, inclusive compostos mais resistentes, como os corantes, por isso, são aplicados principalmente para remoção da cor. São também eficientes na redução de toxicidade e na remoção de DQO (GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2017; GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2019; ILHAN *et al.*, 2019).

Entre os POAs existentes, a reação Fenton tem se sobressaído como uma das técnicas de tratamento mais adotadas, devido à sua eficiência, baixo tempo de reação e simplicidade de operação (JAAFARZADEH *et al.*, 2018). Nesta reação os radicais HO[•] são produzidos pela decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) por íons ferrosos (Fe²⁺) em meio ácido, oportunizando a degradação de compostos xenobióticos ao promover a decomposição do H₂O₂ (GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2017).

Além disso, o processo de reação Fenton torna-se atraente, pois o ferro é um elemento não-tóxico abundante e o H₂O₂ é de simples manipulação e considerado seguro ao meio ambiente (BADAWY *et al.*, 2009). A principal vantagem desse método é a completa oxidação de contaminantes a compostos simples, como CO₂, água e sais inorgânicos.

Resumidamente, a reação Fenton resulta na adição de íons ferrosos e peróxido de hidrogênio, que gera radicais hidroxilas, para a oxidação química dos poluentes e deve ocorrer em temperatura ambiente (ERTUGAY; ACAR, 2017; CETINKAYA *et al.*, 2018). O processo global da reação Fenton é representado pela Equação 1:



A reação é rapidamente decomposta graças à regeneração dos íons ferrosos dados pela redução de íon férrico (Fe³⁺) pelo peróxido de hidrogênio (PERALTA-HERNÁNDEZ *et al.*, 2018), como mostrado na Equação 2:



Uma vez formados, os radicais hidroxilas conseguem atacar rapidamente os grupos cromóforos e as substâncias orgânicas de forma mais geral, presentes no efluente, e causar sua consequente decomposição através da abstração dos átomos de hidrogênio e da adição de ligações instauradas C-C (RAMOS *et al.*, 2021), conforme Equação 3.



Para uma boa reposta de funcionamento do processo Fenton, algumas variáveis devem ser levadas em consideração, como: pH (ácido); temperatura; característica do efluente a ser tratado; concentração dos reagentes (Fe²⁺, H₂O₂); entre outras. Esses aspectos são importantes

porque determinam a eficácia da reação, dado que suas relações podem interferir tanto na produção quanto no consumo dos radicais hidroxila.

Nesse processo, o pH é a variável mais influente, sendo importante que se mantenha na faixa ácida forte (entre 2 e 3), visto que os sais ferrosos precipitam em condições próximas à neutralidade (DIAS *et al.*, 2014). Esse fator é uma limitação do processo Fenton, pois exige acidificação do efluente a ser tratado, o que aumenta os gastos de operação (ZHAO *et al.*, 2018).

Quanto aos mecanismos de remoção dos poluentes no sistema Fenton, sabe-se que estes variam conforme a proporção de reagentes utilizados. Quando há na reação uma massa superior de peróxido em relação ao ferro prevalece a oxidação como fator de degradação das impurezas, todavia, se a quantidade de catalisador excede o precursor de oxidantes a coagulação é o mecanismo predominante de remoção de carga orgânica no sistema (WANG *et al.*, 2008).

O tratamento de efluentes têxteis por reação Fenton tem sido bastante pesquisado, vários trabalhos demonstram a eficiência desta técnica na remoção de diferentes contaminantes presentes nesses efluentes (RIBEIRO *et al.*, 2016; SENNAOUI *et al.*, 2018; VALENZUELA *et al.*, 2020; FERNANDES *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2021). Especificamente para remoção (degradação) dos corantes têxteis, o principal indício de sua eficácia está no desaparecimento da banda de absorção dos grupos cromóforos (LEITE *et al.*, 2016).

Paulino, Araújo e Salgado (2015) estudaram o processo Fenton na descoloração dos corantes Azul de Metileno e Rodamina B e reportaram elevada eficiência na degradação de cor, em 96% para o corante Azul de Metileno e 86% para o corante Rodamina B, quando empregado as concentrações de 0,025 mM de H_2O_2 e 0,05 mM de Fe^{2+} .

Ribeiro *et al.* (2016) obtiveram remoção de 68% de DQO e 88% de turbidez de um efluente têxtil quando utilizaram $[\text{Fe}^{2+}]:[\text{H}_2\text{O}_2]$ em uma razão de massa de 2:2. Ertugay e Acar (2017) estudaram a remoção da cor por reação Fenton, causada pelo corante Azul Direto 71, com concentração inicial de 100 mg/L, e observaram remoção de 80% com apenas 20 minutos de contato sob condições de pH = 3.

Cetinkaya *et al.* (2018) avaliaram o processo Fenton para o tratamento de um efluente têxtil. Os resultados apresentaram um efluente final de boa qualidade tendo sido removido 95% da cor e 70% da matéria orgânica (DQO) ao usarem 0,10 g/L de Fe^{2+} e 2,20 g/L de H_2O_2 por 90 minutos a pH = 3.

Fernandes *et al.* (2021) avaliaram a eficiência de degradação do azo corante Ponceau BS em meio aquoso via Fenton heterogêneo sobre nanopartículas de óxidos de ferro e obtiveram uma degradação máxima desse corante de 57.1% a pH = 3,5. Para os autores a percentagem de

remoção mostrou o caráter promissor da aplicação das nanopartículas magnéticas de ferro na descontaminação de águas residuárias coloridas.

Apesar do que já foi apresentado até aqui a respeito da eficiência dos POAs existentes para o tratamento de efluentes têxteis, é válido saber que estes processos possuem limitações como a inibição da produção de radicais hidroxilas ou seu sequestro durante a reação, por sais e detergentes, e alguns íons inorgânicos utilizados durante a fabricação do tecido, diminuindo a eficiência de alguns sistemas (MACHULEK *et al.*, 2007).

Em geral, a eficácia dos processos oxidativos avançados varia amplamente com os tipos de constituintes presentes nos efluentes têxteis (VERMA; DASH; BHUNIA, 2012; HOLKAR *et al.*, 2016). Intermediários mais tóxicos do que os originais podem ser formados durante o tratamento por esses processos (PUNZI *et al.*, 2015), aminas aromáticas, a título de exemplo, são subprodutos tóxicos comuns da degradação de alguns corantes (WANG *et al.*, 2008). Além do que, na maioria das vezes, o efluente têxtil é alcalino, o que requer o gasto de acidificantes e neutralizantes antes e após a aplicação do tratamento, onerando os custos (ZHAO *et al.*, 2018).

A aplicação da maior parte dos POAs é muito cara e em alguns casos, como elevados volumes de efluentes a ser tratado, essas tecnologias podem não ser economicamente viáveis, considerando o custo e a complexidade envolvida (GUO; WANG; XU, 2019). Sendo assim, as potencialidades dos POAs em degradar compostos tóxicos devem ser exploradas mediante o uso combinado com outros métodos de tratamento, tendo em vista sua viabilidade final.

Isto posto, destaca-se nessa pesquisa o tratamento de efluentes têxteis pelo processo combinado de coagulação/floculação/decantação e reação Fenton. Sendo o primeiro adotado para remoção de sólidos suspensos (turbidez), já que sólidos em abundância pode reduzir a mineralização e eficiência de desinfecção dos poluentes no tratamento subsequente (reação Fenton) (LÓPEZ-LÓPEZ *et al.*, 2015). A integração dos dois tratamentos citados tem se mostrado ser mais barato e mais compatível com o meio ambiente (GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2017; PEREIRA; BRITO, 2018).

Muitos pesquisadores têm estudado processos de tratamento para o efluente industrial têxtil, observando-se nessa pesquisa estudos relevantes nos quais os efluentes têxteis foram tratados pela reação Fenton integrada com processo físico-químico, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 — Exemplos de processo combinado físico-químico (coagulação/floculação/decantação) e reação Fenton para tratamento de efluentes têxteis.

Característica do efluente	Condições	Resultados	Referências
pH = 10,3 DQO = 2072,9 mg/L Cor aparente = 422,28 mg/L Turbidez = 600 NTU	Coagulação/floculação: Polifloc 18 = 1,5 mL AN 905 = 40 mg/L Reação Fenton: $[\text{Fe}^{2+}] = 0,0010 \text{ mol/L}$ $[\text{H}_2\text{O}_2] = 0,0157 \text{ mol/L}$ pH = 3,2 Tempo = 30 min	Remoção de 98,59% da turbidez, 93,67% de cor e 55,56% de DQO.	Favero <i>et al.</i> (2018)
pH = 7,06 DQO = 420 mg/L COT = 124 mg/L Turbidez = 308 NTU	Coagulação/floculação: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 400 \text{ mg/L}$ Reação Fenton: $[\text{Fe}^{2+}] = 1 \text{ mM}$ $[\text{H}_2\text{O}_2] = 14 \text{ mM}$ pH = 3 Tempo = 90 min	Remoção final de 99% da turbidez, 82% da matéria orgânica e clarificação completa do efluente.	GilPavas <i>et al.</i> , (2018)
pH = 9,9 DQO = 865 mg/L COT = 290 mg/L Turbidez = 184 NTU	Coagulação/floculação: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 400 \text{ mg/L}$ Reação Fenton: $[\text{Fe}^{2+}] = 1 \text{ mM}$ $[\text{H}_2\text{O}_2] = 19,6 \text{ mM}$ pH = 3 Tempo = 90 min	Remoção de 74% da DQO e 98% da turbidez do efluente.	GilPavas, Dobrosz-Gómez e Gómez-García, (2017)
pH = 12 DQO = 3360 mg/L	Coagulação/floculação: $\text{FeSO}_4 = 3 \text{ g/L}$ Reação Fenton: $[\text{Fe}^{2+}] = 300 \text{ mg/L}$ $[\text{H}_2\text{O}_2] = 7 \text{ g/L}$ pH = 3-3,5 Tempo = 60 min	Remoção de 99% da cor e 83% da DQO.	Yadav, Mukherji e Garg, (2013)

Fonte: Adaptado pelo autor (2021).

3.4 LEGISLAÇÃO APLICADAS PARA O LANÇAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

O cumprimento à legislação ambiental de lançamento de efluentes, a preservação do meio ambiente e a adequação ao conceito da ecoeficiência são algumas das motivações para a instalação de tecnologias mais robustas de tratamento de águas residuárias.

Como visto, as indústrias do segmento têxtil geram águas residuárias com elevadas cargas de matérias orgânicas e inorgânicas. Embora não haja uma legislação específica para controle e tolerância da existência residual das substâncias oriundas de produtos têxteis, já são aplicados padrões que abordam a redução da toxicidade, especialmente em despejos que serão lançados nos recursos hídricos (SOARES; FERREIRA, 2017).

A nível nacional, a Resolução de nº 430/2011 do CONAMA determina os padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos. Esta, no que lhe concerne, estabelece que resíduos de qualquer natureza podem ser lançados diretamente nos corpos receptores desde que sejam devidamente tratados e obedeçam aos padrões determinados nela. Esta Resolução estabelece metas de remoção de matéria orgânica superiores a 60% para efluentes industriais em geral, a qual é determinada através das análises da DBO (BRASIL, 2011).

Já a nível estadual, o documento vigente é a Resolução de nº 02/2017 do COEMA, também aponta sobre o controle de carga orgânica em efluentes industriais. Está estabelece que só é permitido o lançamento de águas residuárias com teores de DQO até 200 mg/L, para garantir a autodepuração do corpo receptor, estabelecendo-se ainda que na hipótese de não alcançar os valores requeridos, deve-se efetuar modificações no processo de produção ou no controle do tratamento. Vale destacar que esse limite não é referente apenas à indústria têxtil, mas para todos os segmentos industriais (CEARÁ, 2017).

Em ambas as legislações os limites são semelhantes entre si, entretanto, existem diferenças entre alguns parâmetros, como para DBO e cloreto, posto que a legislação estadual não indicou valores mínimos para remoção da DBO e a resolução nacional não considerou valores limites para cloreto, devendo ser considerado os valores mais restritivos. A Tabela 7 mostra os padrões admissíveis de lançamento existentes para os parâmetros de relevância para esta pesquisa.

Tabela 7 — Padrões estaduais e nacionais para o lançamento de efluentes.

Parâmetro	Und.	COEMA nº 02/2017	CONAMA nº 430/2011
pH	-	5 a 9	5 a 9
Temperatura	°C	inferior a 40	inferior a 40
Materiais sedimentáveis	mL/L	≤ 1	≤ 1
DBO	mg/L	-	remoção mínima de 60%
DQO	mg/L	≤ 200	-
SST	mg/L	≤ 100	-
Ferro dissolvido	mg/L	≤ 15	≤ 15
Cloreto	mg/L	-	≤ 250

Fonte: BRASIL (2011); CEARÁ (2017).

Na relação dos parâmetros apresentados os níveis de ferro dissolvido merecem destaque, já que o tratamento por Fenton pode gerar concentrações superiores dessa substância, com necessidade de aplicação de um tratamento posterior para redução do mesmo previamente ao lançamento do efluente (SOON; HAMEED, 2011).

Como visto, nas legislações apresentadas não existem condições específicas para o descarte de efluentes têxteis, apesar do seu alto potencial poluidor, na COEMA nº 02/2017 há apenas menção de parâmetros típicos (cromo, chumbo, cádmio, ferro solúvel e zinco) para a indústria têxtil, os quais não podem deixar de ser observados, mas, os limites destes são iguais para todas as atividades industriais.

3.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Em experimentos em que diversos fatores podem ser capazes de influenciar os resultados, a abordagem experimental tradicional, que consiste na variação de um fator por vez, até a determinação individual do valor ótimo de cada um dos parâmetros avaliados, pode ser bastante dispendiosa e não levar em conta todas as relações entre as variáveis do processo (NOVAES *et al.*, 2017).

De acordo com Barros Neto *et al.* (2002), a determinação da influência das diferentes variáveis inerentes a um experimento frente a uma resposta de interesse é um grande problema na execução dos ensaios. Determinar com assertividade as variáveis escolhidas para serem estudadas, monitorar e quantificar a influência delas nas respostas obtidas, bem como a relação entre essas variáveis, é tarefa complexa e não-trivial.

Nesse sentido, com intuito de otimizar experimentos, reduzir o número de testes e garantir uma abordagem matemática precisa, o planejamento fatorial de experimentos desponta como ferramenta estatística de grande interesse, já que é possível realizar a variação simultânea de todos os níveis das variáveis escolhidas, sendo elas discretas ou contínuas (fatores), a cada experimento, de forma planejada e coerente (NOVAES *et al.*, 2017).

O planejamento fatorial normalmente é representado por b^K , sendo que K representa o número de fatores (variáveis operacionais ou independentes) e “b” o número de níveis escolhidos (+, -). Esta representação mostra que, se em um planejamento forem escolhidos 2 diferentes níveis para 3 fatores (2^3), o número de experimentos diferentes a serem realizados será 8 (BREITKREITZ; SOUZA; POPPI, 2014).

Além dos experimentos principais b^K (níveis e variáveis), o planejamento fatorial pode contemplar pontos centrais (0) e pontos axiais ou estrelas (α), configurando um delineamento

completo (full fatorial), conhecido também como Planejamento Composto Central Rotacional (PCCR), método utilizado nessa pesquisa. Para sua construção, deve-se definir o número de fatores a serem otimizados (K) e o número de réplicas do ponto central. O número de experimentos (N) para sua aplicação é dado por $N = K^2 + 2K + pc$, onde pc é o número de experimentos no ponto central. Os valores α dos pontos axiais dependem do número de variáveis e podem ser calculados por $\alpha = 2^{(k-p)/4}$. Para duas, três e quatro variáveis, por exemplo, seus valores são, respectivamente, 1,41; 1,68 e 2,00 (TARLEY *et al.*, 2009).

Em resumo, o planejamento fatorial fornece suporte empírico para que a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) possa correlacionar as variáveis independentes com as dependentes por meio de um número mínimo de ensaios, possibilitando, portanto, a otimização a resposta buscada, a partir da geração de modelos matemáticos (BEZERRA *et al.*, 2008).

As equações obtidas por meio da MSR podem ser representadas graficamente e sua aplicação permite dentre as outras finalidades: 1) elucidar a maneira com que as variáveis em teste afetam as respostas; 2) determinar as inter-relações entre as variáveis testadas; 3) identificar e otimizar os efeitos das combinações entre as variáveis testadas sobre a resposta obtida (CANDIOTI *et al.*, 2014).

O modelo estatístico considerado neste estudo foi um modelo empírico quadrático de segunda ordem, em que as interações entre os fatores foram consideradas de acordo com o apresentado na Equação 4.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1^2 + b_{12}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que: y = resposta das variáveis (redução percentual de turbidez, DQO, cor aparente); b_0 , $b_1...$ = coeficiente de regressão; e x_1 , $x_2...$ = variáveis em estudo (gradiente de velocidade na coagulação, dosagem de PAC 15, e concentração de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ E H_2O_2).

Com as equações das regressões obtidas na realização dos experimentos integrantes do planejamento executado é possível realizar a análise de desejabilidade, que consiste na otimização das variáveis estudadas. São aplicadas a fim de se obter níveis otimizados para variáveis independentes e aprimorar os processos estudados em termos de eficiência química e de custos (KUMAR *et al.*, 2016).

Esta metodologia baseia-se na transformação de cada resposta individual em uma escala adimensional de desejabilidades individuais (di). A escala de desejabilidades individuais pode variar de 0 (para uma resposta inaceitável) a 1 (para a resposta desejada). Esta transformação torna possível combinar os resultados obtidos para as propriedades medidas em diferentes

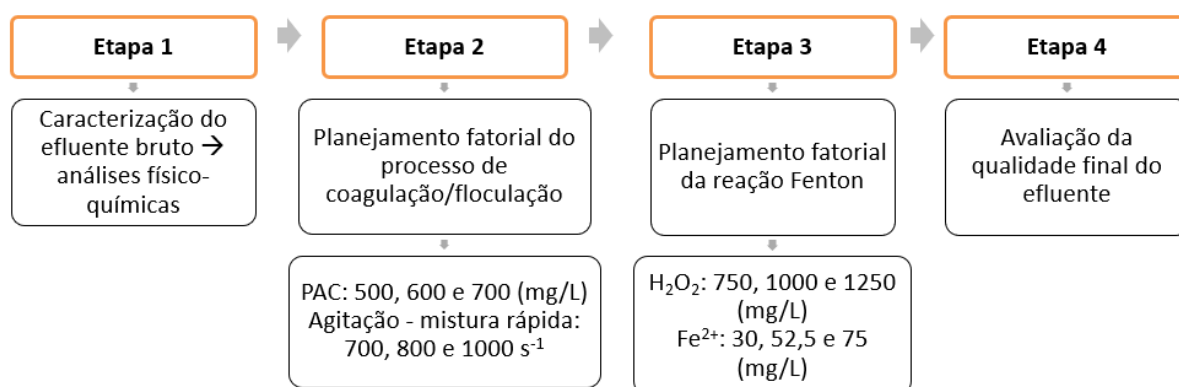
ordens de grandeza. Com as desejabilidades individuais, obtém-se a desejabilidade global (D), definida como a média geométrica das desejabilidades individuais (d_i) e também avaliada na escala de 0 a 1 (COSTA; LOURENÇO; PEREIRA, 2011).

Em geral, o planejamento fatorial tem sido aplicado em diversos estudos envolvendo a otimização de processos de tratamento de efluentes têxteis reais e sintéticos, mostrando-se bastante útil na determinação tanto das concentrações mais efetivas de reagentes químicos quanto das condições experimentais mais favoráveis, de modo a gerar melhor resultado em relação à decomposição dos contaminantes em estudo, menor tempo de processo e economia de custos e testando um número maior de possibilidades (ARULMATHI *et al.*, 2019; ILHAN *et al.*, 2019; AHMED *et al.*, 2020).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para que os objetivos propostos nesta pesquisa fossem alcançados, a metodologia da pesquisa foi dividida em quatro etapas: (1) caracterização do efluente bruto; (2) otimização de variáveis intervenientes no processo de coagulação/floculação/decantação; (3) otimização da concentração dos reagentes no processo de reação Fenton e (4) avaliação da qualidade do efluente após execução do processo combinado otimizado, conforme detalhado no diagrama apresentado na Figura 5.

Figura 5 — Diagrama do procedimento experimental da pesquisa.



Fonte: Autor (2021).

Os experimentos foram executados no Laboratório de Tecnologia Química (LTQ) do Departamento de Química e Meio Ambiente e no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) do Departamento de Construção Civil, ambos localizados no Instituto Federal do Ceará (IFCE), campus Fortaleza.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização dos estudos experimentais foram utilizados reagentes de grau analítico, a exceção do coagulante policloreto de alumínio (PAC 15) que foi adquirido na MR Química. As especificações dos reagentes utilizados nos processos de tratamento do efluente estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 — Reagentes químicos utilizados para o tratamento do efluente real.

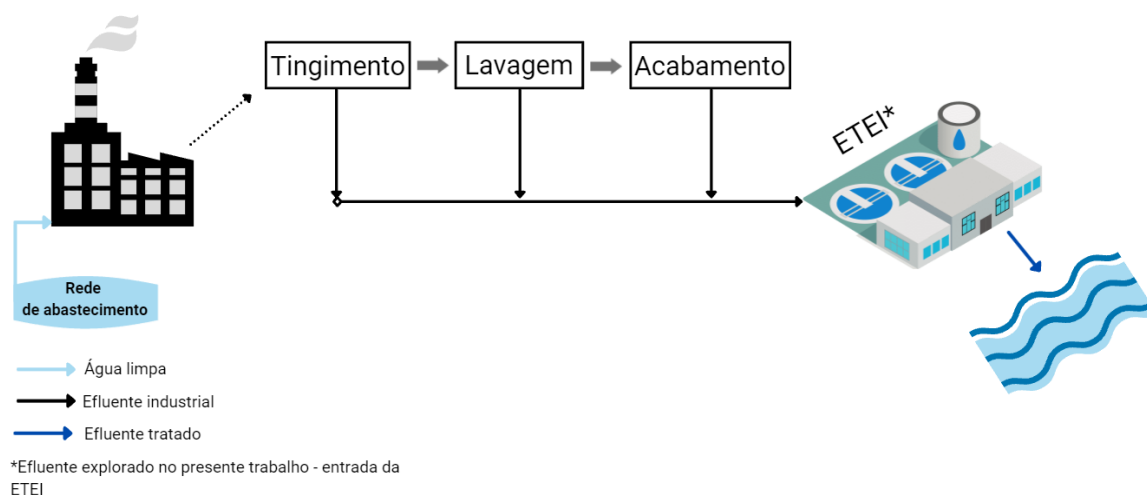
Reagente	Fórmula química	Marca	Pureza
Hidróxido de sódio	NaOH	Synth	99%
Ácido clorídrico	HCl	Merck	99%
Policloreto de alumínio	Al ₂ (OH) ₃ Cl ₃	Compass	15% em Al ₂ O ₃
Sulfato ferroso heptahidratado	FeSO ₄ .7H ₂ O	Dinâmica	99%
Peroxido de hidrogênio	H ₂ O ₂	Neon	35%

Fonte: Autor (2021).

4.2 COLETA DAS AMOSTRAS

A indústria têxtil em que o efluente foi coletado localiza-se na Região Metropolitana de Fortaleza, no município de Maracanaú/CE. A empresa de grande porte tem como linha de frente a fabricação de tecidos índigos e brins, produzindo uma média de 6 milhões de toneladas de tecido/mês, consumindo cerca de 70 mil m³ de água mensalmente, sendo gerado em torno de 26 mil m³/mês de efluente têxtil. A água utilizada pela empresa é proveniente da rede de abastecimento pública (cota destinada para abastecimento industrial). A Figura 6 explica o circuito das águas limpas e do efluente no processo produtivo da referida indústria.

Figura 6 — Fluxo de água no processo produtivo da indústria têxtil concedente do efluente.



Fonte: Autor (2021).

O efluente gerado durante a produção dos tecidos é destinado diretamente à Estação de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI), que opera 24 horas por dia, composta de tratamentos combinado físico-químico (coagulação/floculação/decantação) seguido por biológico (lagoas aeróbias e anaeróbias). O efluente tratado é lançado na rede coletora de esgoto municipal com uma vazão média de 63 m³/h. O efluente utilizado no presente trabalho foi

coletado especificamente na entrada da ETEI (Fig. 6). Foram realizadas 3 campanhas de coleta, em cada campanha foi coletado amostras simples com 20 litros de efluente bruto.

O efluente coletado na primeira coleta (12/01/2021) foi utilizado para ensaios preliminares visando o tratamento do efluente por coagulação/floculação/decantação. A segunda coleta (23/02/2021) serviu para realização dos testes preliminares do processo Fenton e o efluente coletado na terceira campanha, realizada em 04/05/2021, foi utilizado para os experimentos combinados do processo de coagulação/floculação/decantação e reação Fenton.

Após as coletas, as amostras foram estocadas em câmara fria a 4°C e conservadas sob refrigeração até momentos antes de os experimentos serem realizados. Para realização dos ensaios, o efluente foi dividido em alíquotas menores e ficou fora do refrigerador até alcançar temperatura ambiente ($\pm 25^\circ\text{C}$) e posteriormente agitado para homogeneização.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE EFLUENTE BRUTO

Para caracterização dos efluentes foram realizadas análises dos seguintes parâmetros físico-químicos: DQO, pH, turbidez e cor aparente. Todas as análises ocorreram conforme métodos estabelecidos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Os métodos utilizados estão listados no Quadro 3.

Quadro 3 — Metodologias empregadas nas análises laboratoriais.

Parâmetro	Unidade	Método analítico	Referência APHA	Equipamento utilizado
DQO	mg/L	Espectrofotometria	5220 D	Espectrofotômetro Genesys 10S Vis
Turbidez	NTU	Nefelometria	2130 B	Turbidímetro MS Tecnocon TB-2000
Cor aparente	λ (200-800 nm)	Espectrofotometria	-	Espectrofotômetro Genesys 10S Vis
pH	-	Potenciometria	4500 B	pHmetro BEL PHS3BW

Fonte: Autor (2021).

4.4 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/DECANTAÇÃO

Os ensaios de tratabilidade por coagulação, floculação e decantação das amostras de efluente bruto foram realizados em temperatura ambiente, utilizando equipamento de *Jar-Test* MILAN (modelo JT303) com capacidade de 6 jarros, conforme mostra a Figura 7. Em cada ensaio um volume de 500 mL do efluente foi utilizado.

Figura 7 — Ensaios de coagulação/floculação/decantação no *Jar-Test*.



Fonte: Autor (2021).

Os processos de coagulação, floculação e decantação aconteceram mediante condições experimentais definidas, a partir da realização de ensaios preliminares, para avaliar e otimizar os seguintes fatores: dosagem do coagulante policloreto de alumínio (PAC) e gradiente de velocidade na mistura rápida (G_{mr}), que conforme Verma, Dash e Bhunia (2012); Ahmed *et al.* (2020) e Mcyotto *et al.* (2021) afetam na qualidade final do efluente final, quanto as remoções de turbidez, cor e DQO.

Nesse sentido foi realizado um planejamento fatorial completo, com 2 níveis (superior e inferior, +1 e -1) e 2 fatores, com ponto central (0) em triplicata e parâmetros de rotabilidade α alto (+1,414) e α baixo (-1,414), e tendo como variáveis independentes (fatores) a dosagem de coagulante e a gradiente velocidade na mistura rápida e como variáveis dependentes (respostas) os percentuais de remoção de turbidez, cor e DQO.

O gradiente de velocidade de agitação na floculação, bem como o tempo de coagulação, floculação e de decantação não foram incluídas como variáveis, estes foram pré-fixados, com base na realização de ensaios preliminares, assim, foi adotado tempo de 60 segundos para coagulação, gradiente de velocidade na floculação escalonado em 70, 60 e 50 s^{-1} e tempo de floculação de 7 minutos por gradiente, totalizando 21 minutos, e 45 minutos para sedimentação dos flocos formados. A Tabela 9 ilustra a configuração dos ensaios de *Jar-Test*.

Tabela 9 — Configuração adotada para o processo de coagulação/floculação/decantação nos ensaios de *Jar-Test*.

Tempo de coagulação (s)	Gradiente de floculação (s^{-1})	Tempo de floculação (min)	Tempo de decantação (min)
60	70/60/50	21 (7 min para cada)	45

Fonte: Autor (2021).

No processo de coagulação foi empregado como coagulante o policloreto de alumínio a 15% ($Al_2(OH)_3Cl_3$), pois este produto tem apresentado melhores resultados quando se trata da remoção de cor de efluentes têxteis, além de se adaptar bem em uma ampla faixa de pH, não sendo necessário a utilização de mais produtos químicos para sua correção, conforme Verma; Dash; Bhunia (2012) e Favero *et al.* (2018). As dosagens empregadas nessa pesquisa basearam-se na pesquisa de Mcyotto *et al.* (2021), que trataram corantes por processos de coagulação com PAC. O pH do efluente bruto se manteve no seu estado natural para realização dos ensaios.

A faixa analisada para o gradiente de velocidade na coagulação, foi estabelecida baseada em consultas a literatura. Assim, conforme a NBR 12216/1992 deve ser observado nessa fase de tratamento gradientes de velocidade entre 700 e 1100 s^{-1} (ABNT, 1992), ainda de acordo com Di Bernardo (2005) unidades de coagulação por varredura utilizando PAC devem adotar G_{mr} entre 500 e 1200 s^{-1} . Segundo Ahmed *et al.* (2020) a adoção de gradientes de velocidades médias de mistura rápida (> 150 rpm) podem oportunizar melhores remoções de sólidos e outros parâmetros, devido ao cisalhamento reduzido do floco durante sua formação inicial.

O planejamento experimental foi elaborado com auxílio do *software Statgraphics 19*[®]. A Tabela 10 apresenta os valores definidos para cada nível dos fatores investigados nos estudos de coagulação/floculação/decantação.

Tabela 10 — Teores das variáveis estudadas para coagulação/floculação/decantação do efluente têxtil real.

Fator	Níveis				
	$-\alpha (-1,414)^*$	-1	0	1	$+\alpha (1,414)$
PAC 15 (mg/L)	559	600	700	800	841
G_{mr} (s^{-1})	759	800	900	1000	1041

* $\alpha = \pm 1,414$ (valor do ponto estrela no caso de 2 variáveis independentes). Fonte: Autor (2021).

A Tabela 11 apresenta a matriz do planejamento fatorial do conjunto de experimentos que foram realizados nos ensaios de coagulação/floculação/decantação. A ordem dos testes já se encontra randomizada, de modo a garantir a distribuição dos erros.

Tabela 11 — Matriz de experimentos para a coagulação/floculação/decantação do efluente têxtil real.

Ensaio	PAC 15 (mg/L)	$G_{mr} (s^{-1})$	Variáveis resposta
5	700	900	Remoções (%) de turbidez, de cor aparente e de 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: Autor (2021).

Todos os ensaios foram realizados em duplicata. Concluído o processo de tratamento, foram retiradas alíquotas sobrenadantes do efluente para monitoramento da remoção de turbidez, DQO e cor aparente (variáveis respostas). O percentual de remoção desses parâmetros foi calculado de acordo com a Equação 5, para avaliação da eficiência do tratamento.

$$Remoção (\%) = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 \quad \text{Eq. (5)}$$

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

A amostra sobrenadante obtida que oportunizou melhores respostas, em relação a remoção de turbidez, cor e DQO, segundo planejamento experimental, foi separada para realização do processo Fenton.

4.5 ENSAIOS DO PROCESSO FENTON

O líquido sobrenadante, volume de aproximadamente 130mL, do efluente pré-tratado por coagulação/floculação/decantação correspondente ao ensaio em que se obteve as melhores remoções das variáveis-respostas selecionadas foi submetido ao processo de oxidação avançada do tipo Fenton a fim de verificar a eficiência desse tratamento na remoção de cor e DQO.

Os estudos de oxidação avançada pela reação Fenton foram realizados com auxílio de um shaker orbital da SOLAB (modelo SL 222), com agitação constante em 150 rpm, conforme mostra a Figura 8. O pH do efluente coagulado/floculado/decantado foi ajustado para $3 \pm 0,5$ com soluções de HCl 0,5 M ou NaOH 0,5 M, pois conforme já descrito o processo Fenton tende a ter melhor êxito em pH ácido entre 2 e 3 (ZHAO *et al.*, 2018; FARSHCHI *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2021).

Figura 8 — Ensaio reação Fenton em incubadora shaker orbital.



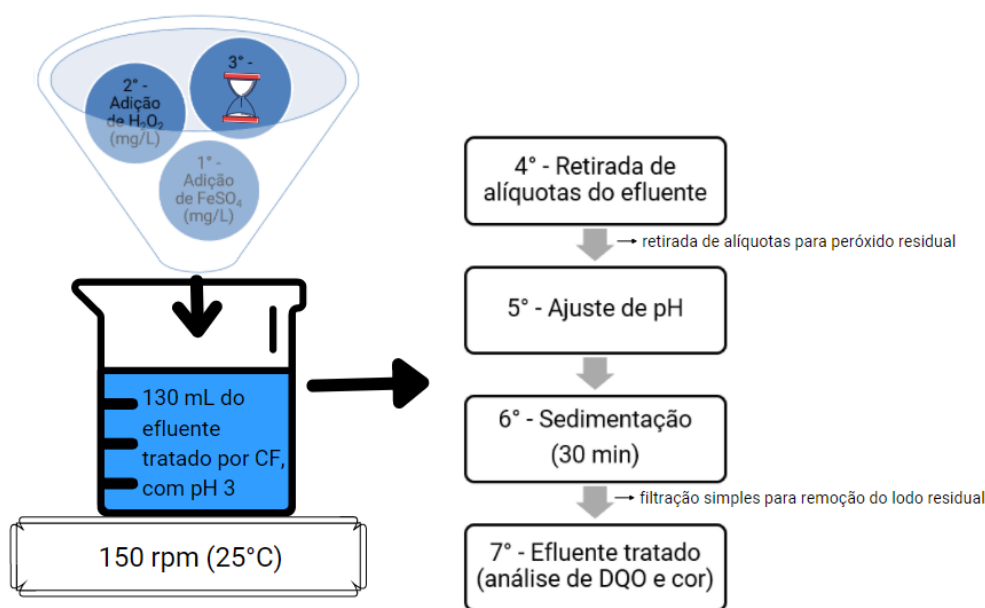
Fonte: Autor (2021).

Para iniciar o processo de reação Fenton, quantidades determinadas de sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) provenientes de uma solução estoque previamente preparadas foram adicionadas ao efluente. As concentrações empregadas desses reagentes foram determinadas a partir de ensaios preliminares referenciadas nos trabalhos de GilPavas, Dobrosz-Gómez e Gómez-García (2017), Drumm *et al.* (2018), Favero *et al.* (2018), Ilhan *et al.* (2019) e Saleh *et al.* (2019).

O tempo do tratamento foi estabelecido em 60 minutos e o monitoramento da eficiência de remoção de cor e DQO (Equação 4) foi realizado em intervalos de tempos ao longo da reação (5, 15, 30, 45 e 60 min). Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente (25 °C).

Após cada tempo reacional estudado foram retiradas alíquotas para análises de DQO, cor e H_2O_2 residual. O peróxido residual foi medido segundo o método espectrofotométrico do metavanadato de amônio, adaptado de Nogueira *et al.* (2005). Para analisar a cor e a DQO foi necessário cessar a reação de oxidação e remover o peróxido de hidrogênio residual, para isso o pH das alíquotas retiradas foi ajustado com solução de NaOH 0,5 M para um valor próximo ao neutro ($7 \pm 0,5$) promovendo a precipitação do ferro dissolvido na forma de hidróxido de ferro. O procedimento experimental executado nesta etapa está apresentado na Figura 9.

Figura 9 — Esquema de tratamento do efluente têxtil coagulado/floculado/decantado segundo reação Fenton.



Fonte: Autor (2021).

Para otimização variáveis no tratamento Fenton foi utilizado um planejamento fatorial 2^2 para realização dos ensaios de oxidação avançada do efluente têxtil real pré-tratado por coagulação, floculação e decantação. As variáveis independentes (fatores) estudadas foram as concentrações de: H_2O_2 (agente oxidante) e $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (catalisador) e as variáveis respostas (dependentes) foram as eficiências de remoção (%) de cor e DQO. A Tabela 12 mostra o planejamento fatorial completo construído a partir do *software Statgraphics 19*®.

Tabela 12 — Descrição das variáveis estudadas no tratamento Fenton do efluente têxtil real após tratamento inicial por coagulação/floculação/decantação.

Fator	Níveis				
	$-\alpha$ (-1,414)	-1	0	1	$+\alpha$ (1,414)
FeSO ₄ .7H ₂ O (mg/L)	21	30	52,5	75	84
H ₂ O ₂ (mg/L)	646	750	1000	1250	1354

Fonte: Autor (2021).

Os ensaios Fenton foram realizados com pontos centrais (0) em triplicata e de forma aleatória para assegurar a distribuição dos erros não considerados, com o grau de confiança de 95%. A Tabela 13 apresenta a matriz experimental geral dos ensaios realizados.

Tabela 13 — Matriz do conjunto de experimentos da reação Fenton.

Ensaio	FeSO ₄ .7H ₂ O (mg/L)	H ₂ O ₂ (mg/L)	Variáveis respostas
1	84	1000	Remoções (%) de cor aparente e de 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: Autor (2021).

Todos os ensaios foram realizados em duplicata. Assim como no processo de tratamento por coagulação/floculação/decantação, o percentual de remoção da cor e DQO foi calculado conforme Equação 5.

4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS DADOS

Com o objetivo de avaliar se havia diferença significativa entre as amostras brutas e tratadas pelos processos propostos nas condições otimizadas foram aplicadas algumas análises estatísticas utilizando os *Softwares Statgraphics 19[®]* e *Statistica 10*. A significância dos fatores, suas relações e efeitos sobre as variáveis repostas (dependentes) foi determinada usando Análise de Variância (ANOVA). Para cada variável dependente determinou-se o valor de F (teste F) e também o *p-valor* (significância). Valores de $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ para regressão indicam que os modelos matemáticos gerados se encontram validados e valores de *p* inferiores a 0,05 indicam que a variável relacionada foi significativa no domínio experimental avaliado, dentro de um intervalo de confiança de 95%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE EFLUENTE BRUTO

Durante este trabalho foram realizadas três campanhas (janeiro a maio de 2021) de amostragens do efluente têxtil real, limitadas pelas condições de logística de obtenção e concessão das amostras. A caracterização físico-química dos efluente coletados está apresentada na Tabela 14.

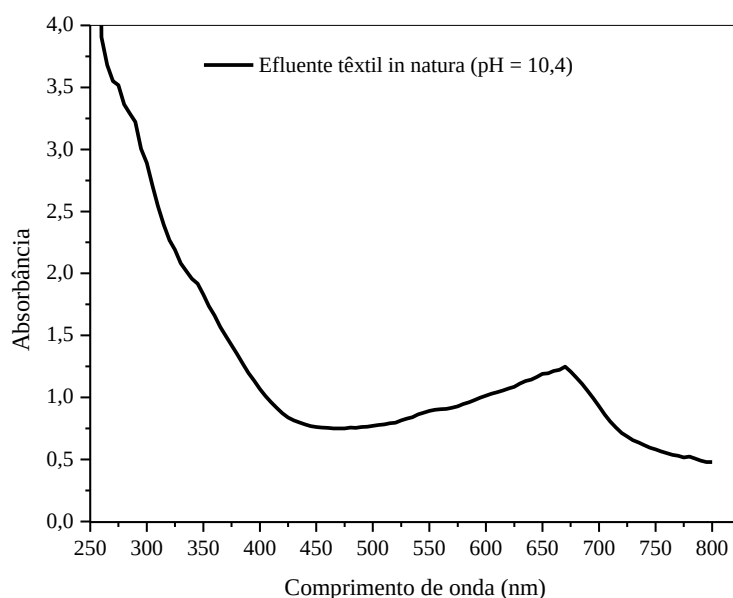
Tabela 14 — Caracterização físico-química do efluente têxtil *in natura*.

Parâmetro	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3
Turbidez (NTU)	185	216	238
pH	11,0	11,5	10,4
DQO (mg/L)	1716,5	2066,3	1937,9
Cor (abs. a 670 nm da solução 10%)	0,198	0,232	0,201

Fonte: Autor (2021).

O efluente coletado apresentou uma intensa coloração azul em razão da aplicação do corante *indigo blue* amplamente utilizado pela indústria que cedeu as amostras de efluente e a maior absorção ocorreu na região do espectro visível em comprimento de onda de 670 nm, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 — Espectro de absorção no UV-Vis do efluente bruto referente a coleta 3.



Fonte: Autor (2021).

As amostras coletadas não revelaram discrepâncias expressivas em relação à cor do efluente, registrando-se absorvância entre 0,198 e 0,232 quando monitorados a 670 nm. Além disso, observa-se que o efluente apresenta uma banda de absorção significativa na região do ultravioleta (Fig. 9), referente à fração aromática do corante *indigo blue*.

Observaram-se valores elevados de carga orgânica presente no efluente bruto, expressos pela DQO, o que pode ser explicado devido a composição diversificada do efluente coletado, que possui contribuições de corantes (*indigo blue*, *por exemplo*) e diversos compostos orgânicos (surfactantes, fixadores, coagulantes etc.) e inorgânicos. Segundo Orts *et al.* (2018) os teores de DQO indicam a presença de corantes e outros aditivos inorgânicos usados nas operações de beneficiamento têxtil.

Diversas pesquisas reportam valores concordantes com os obtidos para este parâmetro. Favero *et al.* (2018) verificaram valores de DQO de 2073 mg/L, Torres *et al.* (2019) observaram valores de 1130 mg/L de DQO e Guillen Zevallos *et al.* (2021) registraram DQO acima de 1400 mg/L. DQO elevada pode ser um indicador da presença de diversas substâncias capazes de consumir oxigênio (PIZATO *et al.*, 2017), de forma que a escolha de processos biológicos de tratamento pode não ser adequada para esses tipos de efluentes.

Ao se analisar a distribuição dos valores médios mensais dos dados de monitoramento de DQO do efluente bruto estudado, cedidos pela indústria para o período de janeiro de 2021, registra-se amplas flutuações ($\pm 35\%$ de variação, desvio padrão = 320,5 mg/L) e distribuição temporal irregular, o que evidencia a grande variabilidade das características físico-químicas desse tipo de efluente.

Outro fato a ser considerado é o caráter alcalino registrado (pH entre 10 e 12). Este valor de pH está associado a presença de partículas suspensas (coloides e matéria orgânica) com carga negativa e aos excessos de agentes alcalinizantes utilizados na fixação dos corantes (PIZATO *et al.*, 2017; ZHAO *et al.*, 2018). O corante *indigo blue* utilizado pela empresa no tingimento do tecido é insolúvel em água, e para que este passe a ter afinidade química pela fibra celulósica é preciso que ocorra uma reação de oxirredução, onde o corante é reduzido à forma *Leucoindigo* pelo ditionito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) em solução alcalina (NaOH) (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005), justificando a basicidade elevada do efluente estudado.

Levando em conta as condições e os limites padrões de lançamento de efluentes exigidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e pela Resolução COEMA nº 02/2017 (Tabela 7), o efluente têxtil bruto não atende aos critérios para ser descartado, como pode ser observado pelos valores de DQO que chegaram a ser maiores que 2000 mg/L e as legislações citadas não permite lançamento com teores de DQO maior que 200 mg/L, sendo necessário o tratamento desse antes

de sua emissão no corpo hídrico, para que os parâmetros analisados estejam dentro dos limites exigidos por essas resoluções.

5.2 TRATAMENTO COMBINADO DO EFLUENTE TÊXTIL BRUTO

5.2.1 Tratamento do efluente por coagulação/floculação/decantação

Os resultados apresentados referentes aos ensaios de coagulação/floculação/decantação foram realizados com a amostra de efluente 3, enquanto os efluentes coletados nas campanhas 1 e 2 foram utilizados para ensaios preliminares que nortearam a definição das condições experimentais testadas.

A ação do policloreto de alumínio em diferentes dosagens e a variação do gradiente de velocidade na coagulação (G_{mr}) foi investigada segundo um planejamento fatorial completo, para determinação do efeito dessas variáveis no tratamento do efluente estudado. A Tabela 15 apresenta os resultados referentes a eficiência de remoção (%) dos parâmetros monitorados (turbidez, cor e DQO) para cada ensaio previsto no planejamento.

Tabela 15 — Resultados experimentais das eficiências de remoção % de turbidez, cor e DQO do efluente têxtil via tratamento físico-químico por coagulação/floculação/decantação.

Ensaio	Fatores		Remoção (%)			Teores residuais		
	PAC 15 (mg/L)	G_{mr} (s^{-1})	Turbidez	Cor	DQO	Turbidez (NTU)	Cor aparente	DQO (mg/L)
5	700	900	97,7	63,5	55,8	5,47	0,07	856,6
2	800	1000	97,5	68,8	49,1	5,95	0,06	986,4
11	700	900	97,9	66,9	49,3	5,00	0,07	982,5
4	841	900	98,4	75,2	48,8	3,81	0,05	992,2
10	559	900	97,2	57,4	45,6	6,66	0,09	1054,2
1	700	900	98,1	69,1	50,1	4,52	0,06	967,0
7	600	800	97,8	60,3	30,3	5,24	0,08	1350,7
8	700	1041	97,1	64,5	32,9	6,90	0,07	1300,3
3	700	759	97,7	70,3	37,4	5,47	0,06	1213,1
9	600	1000	97,1	51,6	53,1	6,95	0,10	908,9
6	800	800	98,6	70,2	28,6	3,33	0,06	1383,7

Parâmetros de entrada (coleta 3): Turbidez = 238 NTU, Absorbância: 0,201 (sol. 10%) e DQO = 1938 mg/L.
Fonte: Autor (2021).

Em geral, observa-se a partir da Tabela 15 que em todas as condições experimentais testadas foram encontrados bons resultados de remoções de turbidez e cor do efluente, com

reduções de turbidez superior a 97% e de cor entre 51,6% e 75,2%. Para a DQO a eficiência de remoção variou entre 28,6% e 55,8%, sendo que no ensaio 5 (700 mg/L de PAC e 900 s⁻¹ de G_{mr}) obteve-se a melhor resposta de remoção desse parâmetro (55,8%), com concentração residual de 856,6 mg/L.

As condições operacionais referentes ao ponto central estudado, apresentada nos ensaios 1, 5 e 11 (700 mg/L de PAC e 900 s⁻¹ de G_{mr}), se mostram coerentes para os valores obtidos nas 3 variáveis-respostas, com pouca variação entre os percentuais de remoção, correspondentes a coeficientes de variação (*CV*) de 0,20%; 4,24% e 6,85% e desvios padrões (σ) de 0,20; 2,82 e 3,54, respectivamente para turbidez, cor e DQO.

Esses valores estão próximos aos encontrados por Tianzhi *et al.* (2021) que estudaram o efeito da coagulação no tratamento de águas residuais têxteis, empregando o policloreto de alumínio, polissulfato de alumínio e policloreto de alumínio e ferro como agentes coagulantes. Os autores observaram remoções de 95,3% dos sólidos suspensos e 37,6% da DQO usando 500 mg/L de PAC, tratando um efluente com DQO entre 266 e 320 mg/L. Estes resultados mostram a eficiência do tratamento físico-químico proposto, visto que mesmo em níveis mais alto de poluição, como é o caso do efluente estudado nessa pesquisa, houve boa redução dos parâmetros avaliados.

Bons resultados também foram observados Favero *et al.* (2017) que utilizaram PAC (Polifloc 18) e AN 905 (floculante) no tratamento de um efluente têxtil, com DQO inicial de 2072,97 mg/L e turbidez de 606 NTU. Os autores relataram redução de 44,3% da DQO e 98,3% da turbidez no efluente usando 1,5 mL de PAC/L adicionado de 40 mg/L do floculante. Essa dosagem é superior a utilizado nesta pesquisa onde se adicionou apenas 0,65 mL de PAC/L, o que era de se esperar, visto que o efluente tratado pelos autores apresentava maiores teores de turbidez e matéria orgânica.

Outros autores obtiveram também desempenhos semelhantes aos obtidos nessa pesquisa em relação à remoção de matéria orgânica com emprego de menores dosagens de policloreto de alumínio, como Bazrafshan, Alipour e Mahvi (2015) que constataram a remoção de 45% da DQO de um efluente têxtil com DQO inicial de 1346 mg/L ao utilizarem 30 mg/L de PAC. Essa variação na concentração do coagulante ocorre sobretudo devido as características das águas residuais, relacionadas aos produtos químicos e insumos utilizados durante a fabricação do tecido, especialmente pela presença maior ou menor de substâncias não biodegradáveis.

Em geral, o tratamento físico-químico de coagulação/floculação/decantação se mostrou satisfatório para remoção da turbidez e de cor do efluente têxtil, e que segundo Tianzhi *et al.*

(2021) esses processos tem desempenhado um papel importante no pré-tratamento de águas residuais têxteis para a remoção de sólidos suspensos.

Todavia, foi pouco eficiente na remoção de poluentes orgânicos solúveis presentes na amostra, representados, neste caso, pela DQO, o que sucinta a necessidade de um tratamento terciário, por exemplo do tipo oxidação avançada, para adequar a composição do efluente visando descarte, visto que a DQO remanescente ($> 850 \text{ mg/L}$ em todos os ensaios) não atende o limite permitido de lançamento para este parâmetro estabelecido pela legislação do estado do Ceará (COEMA nº 02/2017), que só consente o descarte se a DQO do efluente tratado for $\leq 200 \text{ mg/L}$.

Geralmente os coagulantes a base de sais de alumínio, como o utilizado nessa pesquisa, são eficientes para remoções de sólidos suspensos e material coloidal, que podem não está diretamente ligado à carga orgânica do efluente. Além do mais, a remoção de 100% dos sólidos suspensos e coloides presentes nos efluentes têxteis pode representar cerca de 50% da redução da sua carga orgânica (GILPAVAS *et al.*, 2018) o que foi atestado neste trabalho, visto que as remoções de DQO não foram maiores que 55%.

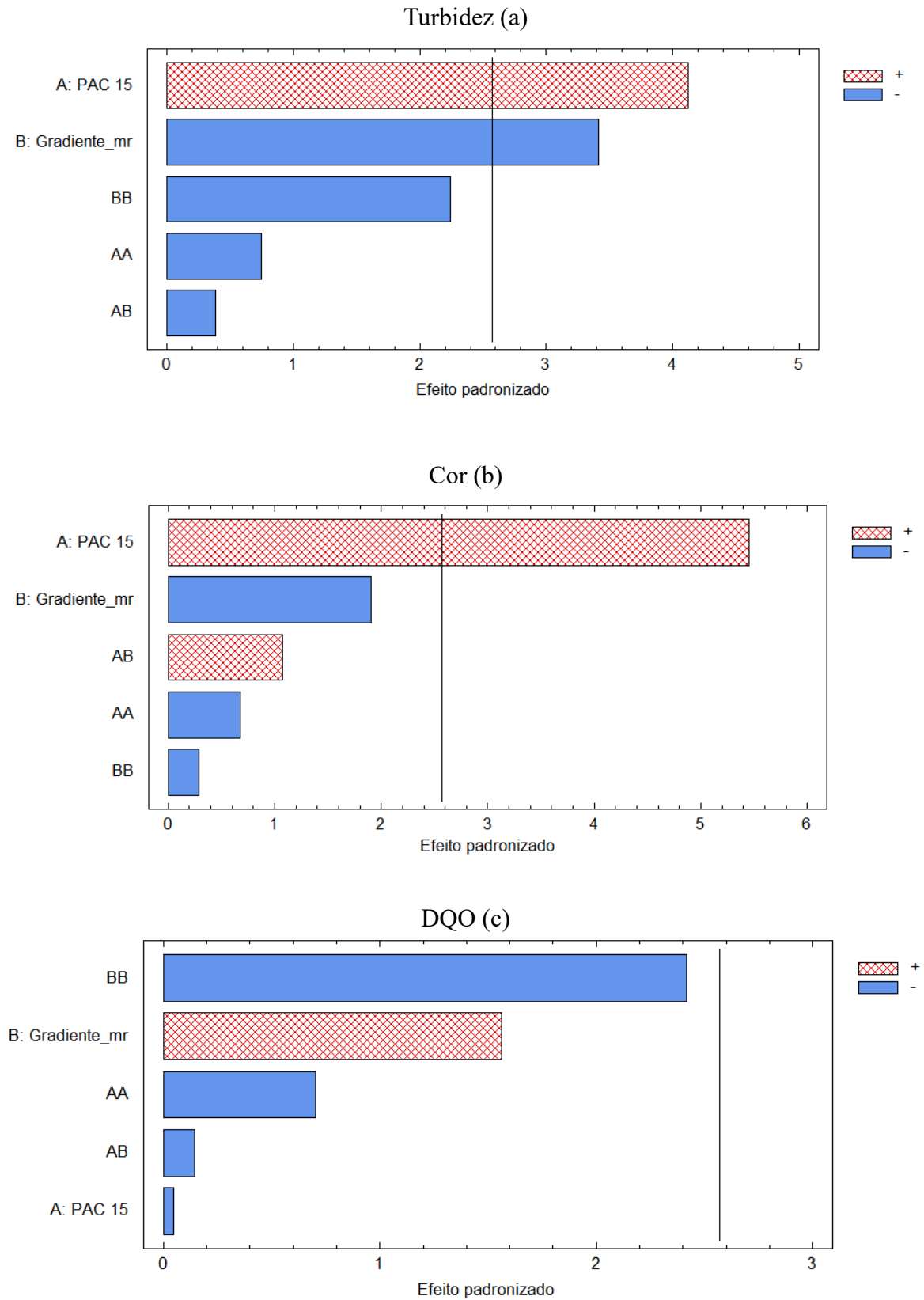
O processo de coagulação/floculação/decantação tem sido bastante utilizado ao longo do tempo como pré-tratamento para inúmeros tipos de efluentes industriais, inclusive para os efluentes têxteis, tendo em conta as inúmeras vantagens desse processo, como simplicidade de operação, baixo custo e alta eficiência na remoção de sólidos suspensos e coloidais, este último confirmado nesta pesquisa.

5.2.1.1 Efeito das variáveis de coagulação, floculação e decantação

O diagrama de Pareto foi utilizado para ilustrar a significância estatística ($p < 0,05$) de cada variável estudada (dosagem de PAC 15 e G_{mr}) e suas interações. Este diagrama representa graficamente um perfil de efeitos, do mais alto para o mais baixo em magnitude. Seu sinal indica se um aumento no nível da variável apresenta efeito positivo (+) ou negativo (-) na variável resposta.

A Figura 11, a seguir, apresenta o diagrama de Pareto para a eficiência de remoção dos parâmetros turbidez, cor e DQO em função dos fatores estudados: dose de coagulante (A) e gradiente de velocidade na fase de mistura rápida (B).

Figura 11 — Gráfico de Pareto para os efeitos dos fatores sobre a remoção (%) de turbidez (a), de cor (b) e de DQO (c) para o processo de coagulação/floculação/decantação do efluente têxtil.



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 11a é possível verificar que a dosagem de PAC (A) produz um efeito positivo significativo para remoção de turbidez, seu efeito indica que a maior eficiência foi obtida nos níveis mais elevados deste fator dentro das faixas estudadas, assim como também foi o fator com maior efeito dentre os investigados, evidenciando que o aumento da dosagem de PAC promove uma melhor remoção desse parâmetro. Em contrapartida, o gradiente de velocidade na mistura rápida (B) apresenta um efeito significativo inverso (negativo), de forma que níveis menos elevados deste fator aponta para melhores remoções de turbidez.

A análise de influência das variáveis independentes, para remoção de cor, por meio do diagrama de Pareto da Figura 11b revela que apenas a dosagem do coagulante - PAC (A) foi uma variável determinante ($p < 0,05$) no tratamento e seu sinal positivo indica que a maior eficiência de remoção de cor foi obtida nos níveis mais altos dessa variável, conforme observa-se nos ensaios 3, 4 e 6 (Tabela 15).

Quanto a remoção de DQO, os resultados indicados pelo diagrama de Pareto da Figura 11c mostram que os dois fatores estudados, em seus termos lineares, quadráticos e de interação, não influenciaram significativamente na redução desse parâmetro, mas é interessante destacar que a interação quadrática de G_{mr} (BB), é o fator que apresentou maior efeito, indicando que o melhor gradiente de velocidade se encontra dentro da faixa estudada.

Diferente do que foi observado para remoção de cor e turbidez, na remoção da DQO o PAC foi o fator com menor efeito sob essa variável resposta, isso pode estar relacionado a faixa de dosagem investigada, e/ou ao fato da possível presença de coloides (provenientes de corantes e surfactantes) com excesso de carga que impede que o coagulante os neutralize ou estabilize para formar flocos capazes de sedimentarem, que pode nesse caso estarem diretamente ligados a DQO do efluente

A partir da análise realizada, percebe-se que apenas a dosagem do coagulante utilizado, (PAC 15) mostrou ser um fator significativamente eficiente ($p < 0,05$), contribuindo de maneira positiva para remoção de turbidez e cor do efluente têxtil, o efluente estudado tem natureza aniônica e o PAC, por outro lado, é catiônico, induzindo a neutralização eficiente de cargas, removendo assim os sólidos suspensos e coloides presentes no meio. Considerando que o efeito da agitação não foi significativo, pode-se inferir pela escolha de menores valores de G_{mr} , diminuindo assim os custos com energia quando se considera o uso de agitadores mecanizados.

A avaliação estatística via análise de variância (ANOVA) para determinação dos modelos matemáticos referentes a remoção dos parâmetros estudados (turbidez, cor e DQO) foi executada a partir da regressão dos resultados experimentais. Nessa avaliação pode-se observar a qualidade do ajuste de cada modelo proposto, assim como a validação dos mesmos.

A Tabela 16 apresenta os resultados da ANOVA para as remoções de turbidez, cor e DQO no efluente têxtil *in natura*.

Tabela 16 — ANOVA para as remoções % de turbidez, cor e DQO no tratamento do efluente têxtil *in natura* por coagulação/floculação/decantação.

Parâmetro	Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor
Remoção de turbidez	Modelo	2,32	5	0,4633	7,59	0,0221
	Resíduos	0,3054	5	0,0611	-	-
	Falta de ajuste	0,2254	3	0,0751	1,88	0,3660 ^{ns}
	Erro puro	0,0800	2	0,0400	-	-
	Total	2,62	10	-	-	-
$R^2 = 0,8835$, $R^2_{adj} = 0,7671$.						
Remoção de cor	Modelo	404,36	5	80,87	7,95	0,0200
	Resíduos	50,87	5	10,17	-	-
	Falta de ajuste	34,95	3	11,65	1,46	0,4306 ^{ns}
	Erro puro	15,92	2	7,96	-	-
	Total	455,23	10	-	-	-
$R^2 = 0,8883$, $R^2_{adj} = 0,7765$.						
Remoção de DQO	Modelo	581,63	5	116,33	1,67	0,2935
	Resíduos	348,13	5	69,63	-	-
	Falta de ajuste	323,01	3	107,67	8,57	0,1063 ^{ns}
	Erro puro	25,13	2	12,56	-	-
	Total	929,76	10	-	-	-
$R^2 = 0,6256$, $R^2_{adj} = 0,2511$.						

Nota: SQ = soma dos quadrados; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrática; ns: não significativo ($p > 0,05$); F tabelado para a regressão = 5,05; F tabelado para falta de ajuste = 19,16. Fonte: Autor (2021).

O coeficiente de determinação do modelo proposto para remoção de turbidez foi de 0,7671 ($R^2_{adj} = 76,7\%$), indicando que os resultados experimentais se ajustaram, relativamente bem, ao modelo proposto, já que seu valor ficou próximo de 1.

Em relação a degradação da cor do efluente o modelo proposto é capaz de explicar 77,6% (R^2_{adj}) da variabilidade na porcentagem de remoção desse parâmetro, destacando-se como o modelo que apresentou melhor ajuste. Para a remoção de DQO 75% da variação total dos dados experimentais não pode ser explicada pelo modelo obtido.

Os modelos para cor e turbidez podem ser usados para fins preditivos, pois apresentam valores de R^2 maior que 0,80 (MANAN *et al.*, 2019). Além disso, os modelos obtidos para essas duas variáveis são confiáveis, pois a diferença entre R^2 e R^2_{adj} é inferior a 0,20 (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Para maior validação estatística dos modelos empíricos gerados por meio da regressão dos dados experimentais obtidos, foi realizado o teste de Fisher (teste F) para um nível de confiança de 95%. Conforme pode ser verificado na Tabela 15, os valores de $F_{\text{calculado}}$ para remoção de turbidez (7,59) e cor (7,95) foram maiores que o valor de F_{tabelado} (5,05), de forma tal que os modelos propostos para as referidas variáveis se apresentam validados.

A mesma análise de validação foi executada para remoção de DQO e o F_{cal} foi igual a 1,66; o qual é menor que o F_{tabelado} para a regressão (5,05); indicando que o modelo gerado não promove um bom ajuste dos dados experimentais obtidos. Ademais, a falta de ajuste foi não significativa ao nível de 5% de probabilidade para as variáveis dependentes estudadas, visto que em todos os casos os valores de F_{cal} foram menores que o F_{tabelado} para falta de ajuste (19,16).

Os modelos matemáticos para as remoções percentuais de turbidez, cor e DQO em função da dosagem do coagulante e do gradiente de velocidade empregado durante a mistura rápida estão apresentados, respectivamente, nas Equações 6, 7 e 8.

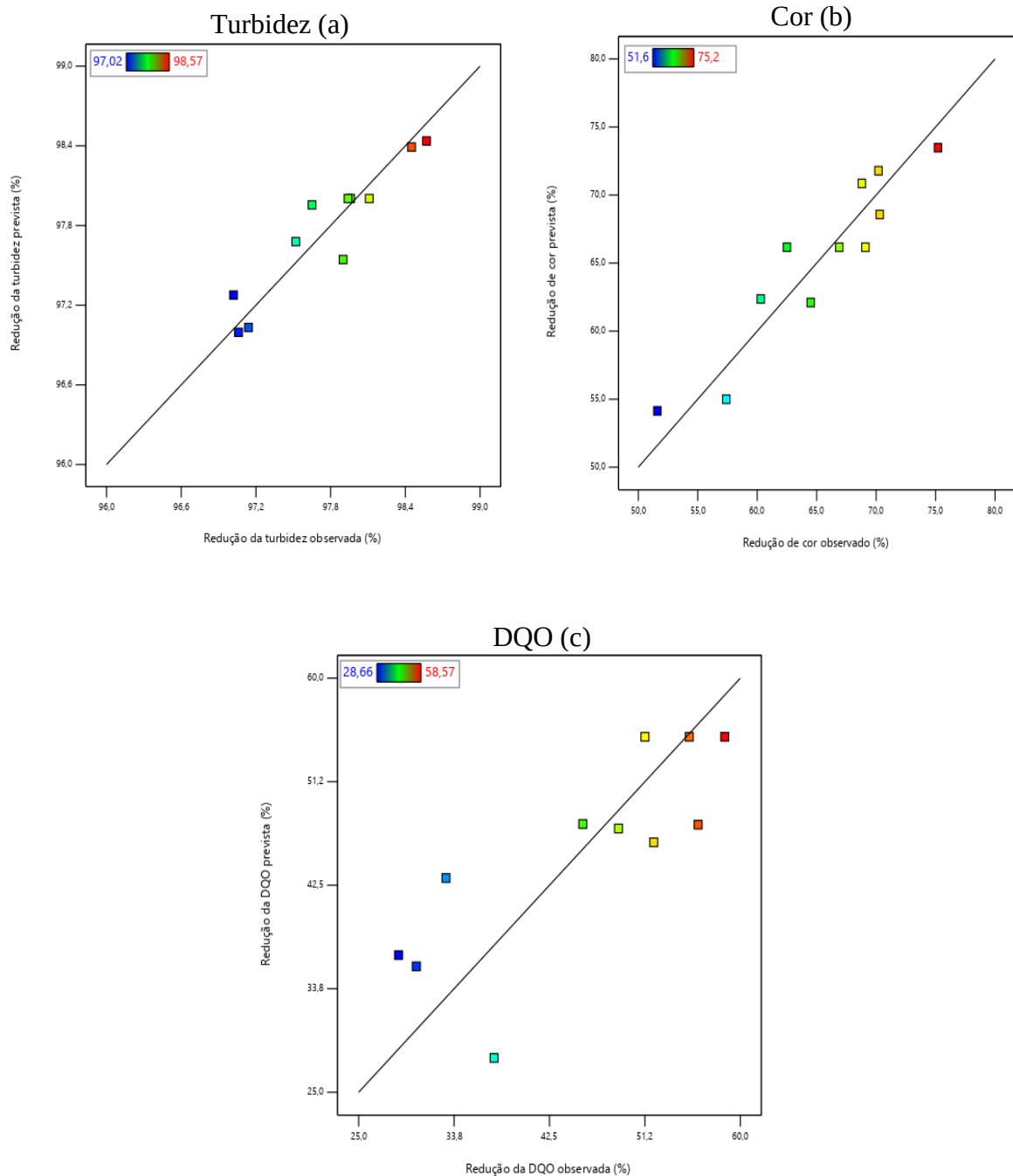
$$\begin{aligned} \text{Turbidez removida (\%)} = & 73,6833 + 0,017173 \times PAC + 0,040815 \times G_{mr} - \\ & 0,0000031249 \times PAC^2 - 0,00001 \times PAC \times G_{mr} - 0,0000206252 \times G_{mr}^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$\begin{aligned} \text{Cor removida (\%)} = & 53,8109 + 0,059469 \times PAC - 0,045998 \times G_{mr} - \\ & 0,000113126 \times PAC^2 + 0,0001825 \times PAC \times G_{mr} - 0,000058128 \times G_{mr}^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\begin{aligned} \text{DQO removida (\%)} = & -836,96 + 0,399112 \times PAC + 1,61942 \times G_{mr} - \\ & 0,0002492 \times PAC^2 - 0,0000575 \times PAC \times G_{mr} - 0,0008517 \times G_{mr}^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. (8)}$$

Apesar de alguns fatores não terem tido influência significativa nas variáveis-respostas estudadas, como, por exemplo, o G_{mr} na remoção da cor, todos foram mantidos nos modelos matemáticos para que o erro fosse minimizado. Na Figura 12 estão apresentados os gráficos dos valores previstos *versus* os resultados observados para cada variável resposta.

Figura 12 — Curvas preditos versus observados para as remoções (%) de turbidez (a), cor (b) e DQO (c) segundo o tratamento por coagulação, floculação e decantação.

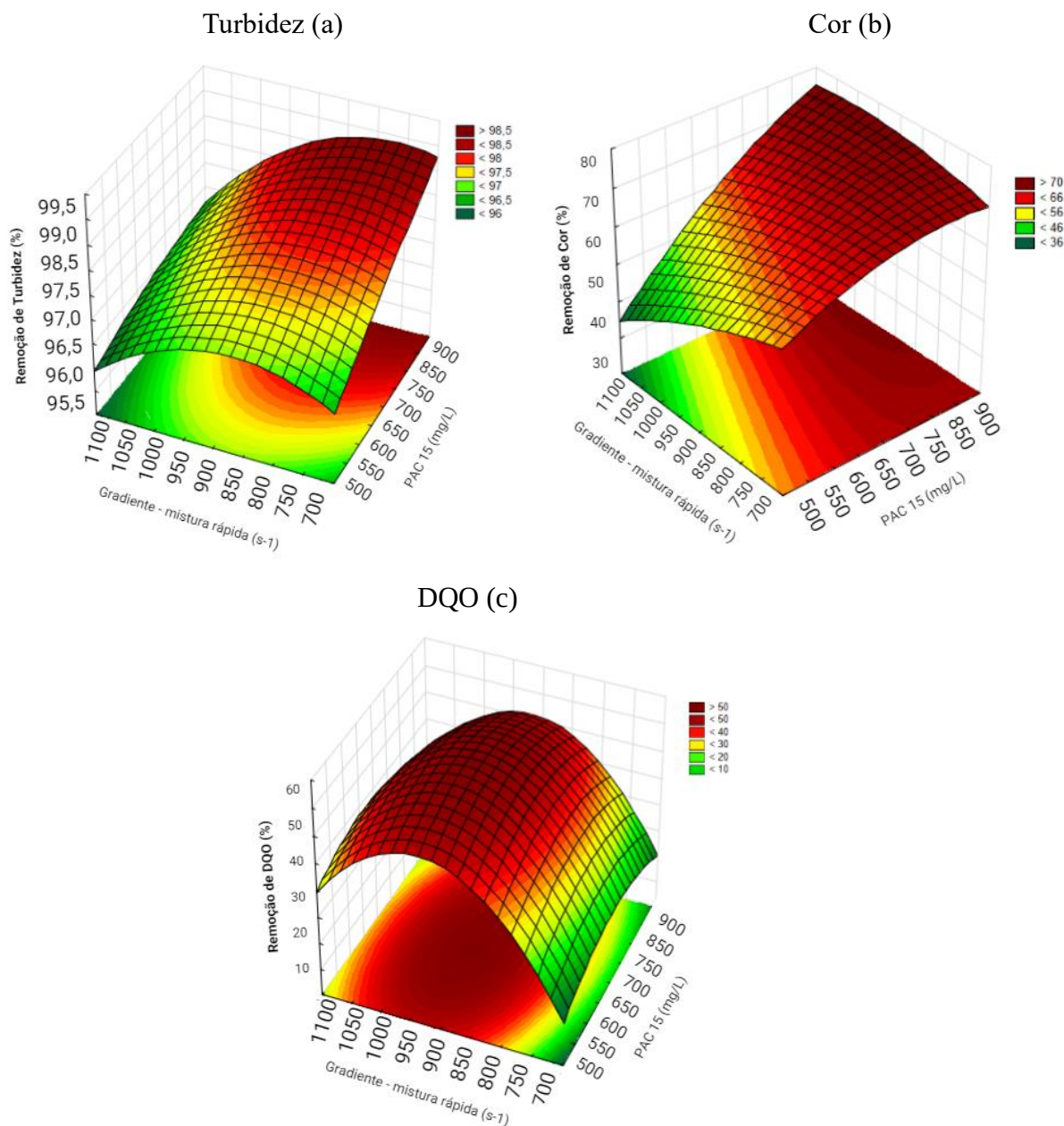


Fonte: Autor (2021).

Notadamente, a exceção da variável DQO (Fig. 12c), os pontos estão bem distribuídos próximos a linha de tendência para a remoção de turbidez e de cor nas Figuras 12a e 12b, respectivamente. A boa concordância entre os valores experimentais e previstos, como exposto pelas Figuras, garante a confiabilidade e qualidade do modelo, ratificando que os mesmos não possuem falta de ajuste.

Os modelos matemáticos de regressão propostos foram utilizados para plotagem dos gráficos das superfícies de resposta ilustrados na Figura 13.

Figura 13 — Superfícies de resposta para as eficiências de remoção (%) de turbidez (a), cor (b) e DQO (c) do efluente têxtil por coagulação, floculação e decantação.



Fonte: Autor (2021).

Analisando a Figura 13a nota-se que a coagulação/floculação/decantação apresentaram eficiências de remoção de turbidez superiores a 95% em todos os ensaios. A condição ótima encontrada, segundo planejamento estatístico, ocorre na máxima dosagem de PAC estudada (841 mg/L) e gradiente de 785 s⁻¹ correspondente a 98,6% de remoção da turbidez existente no

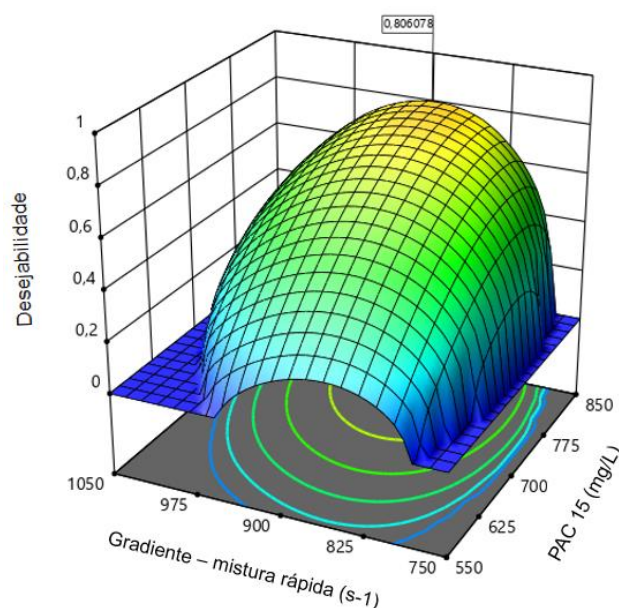
efluente. Apesar disso, resultados superiores a 97% também foram obtidos com o emprego de menores dosagens de PAC, recomendando ser necessária uma análise detalhada de custos para apontar a melhor dosagem de coagulante frente à demanda de remoção de turbidez pela indústria.

Quanto à descoloração do efluente (Fig. 13b) verifica-se que quanto maior a dosagem do coagulante melhor o desempenho do sistema de tratamento, de forma que a faixa de dosagem do PAC com maior percentual de remoção apresentou-se entre 750 e 850 mg/L. Além disso, destaca-se que o gradiente de velocidade não apresenta influência sob a remoção de cor. O ponto ótimo determinado pelo planejamento estatístico para essa variável apresentou dosagem de 841 mg/L de PAC (dosagem máxima empregada) e G_{mr} de 925 s^{-1} , com remoção de cor estimada de 73,5%.

Com relação a remoção de DQO (Fig. 13c) observa-se que a adoção de G_{mr} acima de 900 s^{-1} indica melhores resultados para redução da matéria orgânica do efluente, verificando-se uma máxima remoção. Segundo planejamento estatístico, as condições ótimas desse parâmetro se referem ao emprego de G_{mr} igual a 927 s^{-1} e PAC com doses acima de 690 mg/L, sugerindo uma remoção estimada de 52,3% de DQO.

A análise de desejabilidade para o processo de coagulação/floculação/decantação está apresentada na Figura 14.

Figura 14 — Curva de desejabilidade para as eficiências de remoção % de turbidez, cor e DQO do efluente têxtil via tratamento físico-químico por coagulação/floculação/decantação.



Fonte: Autor (2021).

A desejabilidade máxima encontrada foi de 0,806 para valores de 836,02 mg/L de PAC e G_{mr} de 889,86 s^{-1} . Comparativamente o ensaio 4 (841 mg/L de PAC e 900 s^{-1} G_{mr}) foi o que mais se aproximou destas coordenadas dentro do universo experimental estudado e neste teste as remoções encontradas para turbidez, cor e DQO foram, respectivamente, de 98,4%; 75,2% e 48,8%. As condições obtidas na análise de desejabilidade (836,02 mg/L de PAC e G_{mr} de 900 s^{-1}) foram adotadas para o posterior tratamento Fenton.

A Tabela 17 apresenta a caracterização físico-química da amostra de efluente têxtil real após o tratamento por coagulação, floculação e decantação usando 836 mg/L de PAC e G_{mr} de 900 s^{-1} (condição ótima).

Tabela 17 — Caracterização do efluente têxtil após coagulação/floculação/decantação com dosagem de coagulante PAC 15 de 836 mg/L e sob gradiente de velocidade de 900 s^{-1} .

Parâmetro	Efluente bruto	Após coagulação/floculação/decantação
Turbidez (NTU)	238	3,81
pH	10,4	9,17
Cor (abs. a 670 nm)	0,201 (Solução 10%)	0,05
DQO (mg/L)	1937,9	992,2

Fonte: Autor (2021).

A Figura 15 apresenta as imagens do efluente no seu estado bruto e após a realização do processo de coagulação/floculação/decantação.

Figura 15 — Efluente têxtil bruto e tratado pelo processo de coagulação/floculação/decantação.



Fonte: Autor (2021).

Durante o processo de tratamento houve pouca mudança do pH do efluente. O PAC não alterou significativamente o pH do efluente após tratamento, isso pode ter ocorrido devido a alcalinidade do meio, possivelmente o efluente possuía alta alcalinidade não afetando os teores do pH, além do mais a elevada alcalinidade do efluente bruto indica a sua capacidade tampão, que minimiza a queda acentuada do pH de coagulação.

O efluente tem natureza aniônica, o PAC, por outro lado, é catiônico, portanto, foi capaz de induzir a neutralização da carga das impurezas presentes, removendo assim a cor do efluente por meio da coagulação.

Avaliando os resultados obtidos a partir do tratamento do efluente têxtil por processo de coagulação/floculação/decantação nota-se que mesmo no ensaio que registrou maior percentual de remoção da matéria orgânica (DQO residual > 900 mg/L), o efluente final não atingiu o padrão permitido de lançamento para este parâmetro estabelecido pela legislação do estado do Ceará (COEMA nº 02/2017), que só permite o descarte de efluentes industriais quando os valores de DQO são menores ou iguais a 200 mg/L.

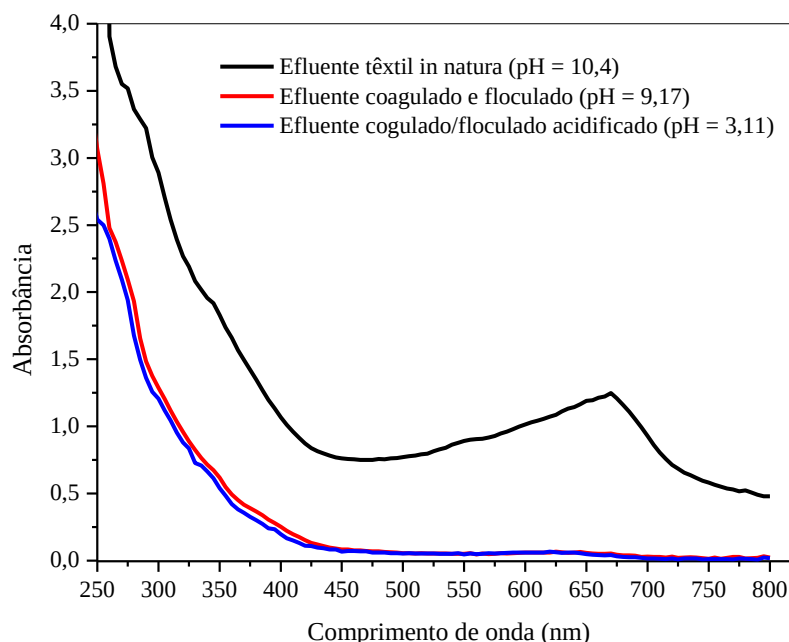
Assim o tratamento complementar via reagente de Fenton pode ser combinado com o processo de coagulação/floculação/decantação, principalmente para reduzir os valores relacionados à DQO, que mesmo após o tratamento físico-químico ainda não atendem aos padrões atuais para a descarga de efluentes em corpos d'água e, portanto, não seriam adequados para reutilização para fins não potáveis. Os estudos de tratamento do efluente coagulado e floculado por tratamento oxidativo avançado estão apresentados a seguir.

5.2.2 Tratamento do efluente coagulado, floculado e decantado por reação Fenton

O tratamento via reagente de Fenton foi aplicado a amostra sobrenadante remanescente do processo de coagulação/floculação/decantação nas condições operacionais ótimas de 836 mg/L de PAC 15 e G_{mr} de 900 s⁻¹, que produziram o maior valor de desejabilidade, visando o monitoramento das remoções de cor e DQO residual do efluente coagulado e floculado. A turbidez não foi monitorada devido à alta eficiência de remoção no tratamento físico-químico.

Inicialmente, o efluente coagulado/floculado/decantado foi acidificado com solução de HCl 0,5 M até pH $3 \pm 0,5$ para promoção do mecanismo Fenton de geração de radicais hidroxilos (Equação 2). Os espectros de absorção das amostras de efluente bruto e acidificados estão apresentados na Figura 16.

Figura 16 — Espectros de absorção UV-Vis para a solução do efluente têxtil em meio natural (pH = 10,4) e em meio ácido (pH = 3,11).



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 16 observa-se que a acidificação da amostra praticamente não altera os perfis e picos de absorção molecular das espécies químicas presentes no efluente.

Os ensaios por reação Fenton objetivou investigar as melhores dosagens (em mg/L) de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e H_2O_2 para remoção de DQO e cor do efluente pré-tratado. A Tabela 18 apresenta os valores referentes ao percentual de remoção das variáveis-respostas para cada ensaio após 30 minutos de reação oxidativa.

Tabela 18 — Resultados experimentais das eficiências de remoção de cor e DQO do efluente têxtil coagulado, flocculado e decantado após tratamento pelo processo Fenton.

Ensaio	Fatores		Remoção (%)		Teores residuais	
	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (mg/L)	H_2O_2 (mg/L)	DQO	Cor	DQO (mg/L)	Cor aparente
1	84	1000	37,9	94,1	616,2	0,003
6	52,5	1354	69,1	95,1	306,6	0,002
3	52,5	1000	85,1	95,6	147,8	0,002
11	52,5	1000	70,6	95,5	291,7	0,002
10	30	1250	51,3	94,3	483,2	0,003

5	21	1000	48,9	93,2	507	0,003
4	75	1250	49,1	94,4	505	0,003
2	75	750	49,2	92,9	504	0,004
9	52,5	1000	80,3	95,1	195,5	0,002
7	52,5	646	28,9	93,9	705,5	0,003
8	30	750	39,1	92,5	604,2	0,004

Parâmetros de entrada: Absorbância: 0,050 e DQO = 992,2 mg/L. Fonte: Autor (2021).

No tratamento Fenton com 30 minutos de reação, observa-se que a degradação da matéria orgânica (DQO) variou na ordem de 28% a 86%, com destaque para o ensaio 3 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 52,5 \text{ mg/L}$ e $\text{H}_2\text{O}_2 = 1000 \text{ mg/L}$) no qual a remoção de DQO foi a mais elevada (85,1%), com concentração residual de 147,8 mg/L. Com os experimentos, constatou-se ainda que quando maiores concentrações de H_2O_2 (1250 e 1353 mg/L) foram empregadas a degradação foi reduzida em até 35%, mostrando um efeito inibidor do excesso de oxidante no meio.

Apesar dos bons resultados não houve a mineralização completa da carga orgânica do efluente, o que pode ser explicado em função da natureza recalcitrante dos coprodutos formados durante a oxidação Fenton (FERNANDES *et al.*, 2019). Em geral, em função da sua baixa seletividade, o radical hidroxila formado durante a reação degrada a matéria orgânica refratária presente no efluente em um curto espaço de tempo, reduzindo os valores de DQO.

Em relação ao corante ocorre uma degradação dos grupos cromóforos, incrementando a descoloração do meio, o que pode ser notado com a elevada degradação da cor em todos os ensaios (superior a 90%), independente das concentrações de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ou H_2O_2 utilizadas.

A literatura retrata o sucesso da reação Fenton na remoção de cor e DQO de efluentes têxteis. Ilhan *et al.* (2019) ao estudarem a tratabilidade de um efluente têxtil pela reação Fenton, obtiveram em 150 minutos de reação remoções de cor de 98,6% e de DQO de 84,6% aplicando 1093 mg/L de FeSO_4 e 1600 mg/L de H_2O_2 , em um efluente têxtil com DQO inicial de 1550 mg/L.

Pereira e Brito (2018) investigando o tratamento de um efluente têxtil, com DQO inicial de 1400 mg/L, por coagulação/floculação/decantação seguido por reação Fenton, registraram remoção de 75,3% de DQO e 94,1% dos fenóis totais presentes no efluente quando utilizaram 13 mg/L de Fe^{2+} (64,5 mg/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e 200 mg/L de H_2O_2 . Esses resultados evidenciam a eficiência do processo Fenton na mineralização de poluentes e demonstra que a integração desses tratamentos pode reduzir o uso dos reagentes aplicados na reação Fenton, que em escala

industrial é considerado oneroso, podendo ser um processo mais sustentável para as indústrias têxteis.

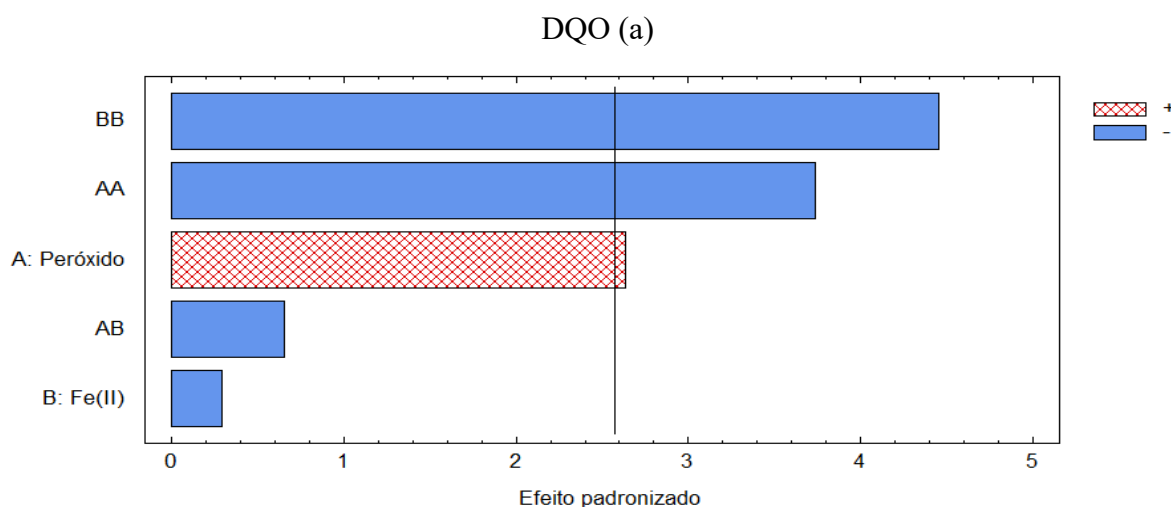
Araújo, Isquibola, Rodrigues (2020) ao investigarem a degradação do corante índigo blue (concentração = $2,24 \times 10^{-4}$ mol/L), mesma categoria de corante empregado pela empresa concedente do efluente estudado, observaram a sua degradação total após 2h de reação Fenton, utilizando peróxido de hidrogênio na concentração de 500 mg/L e íons Fe^{2+} na ordem de 2 mg/L (9,92 mg/L de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

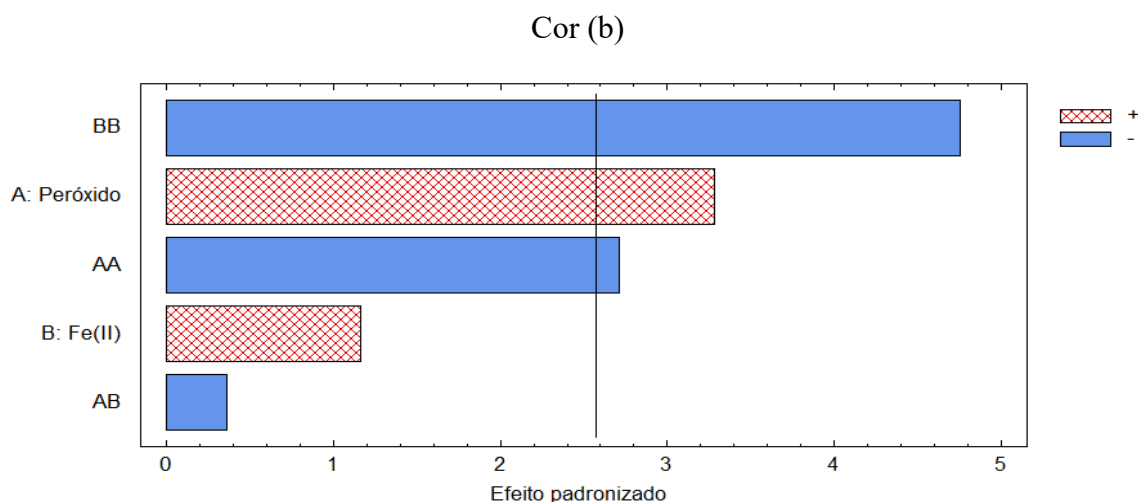
A concentração de H_2O_2 foi monitorada ao término do processo em todos os ensaios realizados. Os resultados demonstraram uma concentração residual máxima de H_2O_2 residual de 30 mg/L. Em todos os experimentos realizados, com exceção do ensaio 1, a concentração de ferro empregada foi abaixo de 15 mg/L, que ainda foi consumido durante a reação, ficando dentro do nível requerido pela Resolução n° 430/2011 do CONAMA, a qual estipula uma concentração residual máxima permitida de 15 mg/L de ferro para o lançamento de despejos em corpos receptores.

5.2.2.1 Efeito das variáveis na oxidação avançada Fenton

Para análise estatística do efeito de cada fator sob as variáveis respostas investigadas (A – concentração de H_2O_2 e B – concentração de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) foram gerados gráficos de Pareto (nível de 5% de significância). Os perfis obtidos estão apresentados na Figura 17.

Figura 17 — Gráfico de Pareto para os efeitos dos fatores sobre a remoção de DQO (a) e de cor (b) para o tratamento do efluente coagulado, floculado e decantado pelo processo Fenton.





Fonte: Autor (2021).

O diagrama de Pareto para remoção de DQO (Fig. 17a) mostra que as variáveis de concentração de H_2O_2 e de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ em termos quadráticos (AA e BB) apresentam efeito negativo significativo, que aponta para uma concentração ótima de ambos os reagentes dentro do intervalo estudado, mas em menores níveis. Ao passo que em componente linear a concentração de H_2O_2 (A) é um fator que possui efeito levemente significativo positivo, ou seja, a degradação da matéria orgânica ocorre com sucesso em concentrações mais altas de H_2O_2 . Efeitos semelhantes foram reportados por GilPavas *et al.* (2018), os autores registraram a concentração de peróxido de hidrogênio como um fator significativo positivo para remoção da DQO de um efluente têxtil, por processo Fenton.

A análise de influência das variáveis independentes para remoção de cor evidenciadas no diagrama de Pareto (Fig. 17b) mostra que as concentrações de H_2O_2 e de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ em componentes quadráticas (AA e BB) foram significativas para o aumento da descoloração do efluente coagulado. Assim, a concentração dos reagentes que apresenta melhor eficiência na remoção de cor se encontra dentro do intervalo investigado. Um efeito positivo em termos lineares foi observado para as concentrações de H_2O_2 e de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, o que está de acordo com o esperado neste tipo de processo oxidativo, dentro de certos limites reacionais.

A partir da análise realizada, percebe-se que a concentração de oxidante (H_2O_2) segundo o planejamento estatístico se mostrou como variável mais significante no tratamento do efluente têxtil. Em geral, quando há na reação uma massa superior de peróxido em relação ao ferro prevalece a oxidação como fator de degradação das impurezas (WANG *et al.*, 2008).

Para validar o ajuste dos modelos matemáticos propostos pelos resultados obtidos, a significância do modelo e a falta de ajuste foram estimadas pela análise de variância, conforme a Tabela 19.

Tabela 19 — ANOVA para as remoções de cor e DQO no tratamento do efluente coagulado, floculado e decantado pelo processo Fenton.

Parâmetro	Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{cal}	p-valor
Remoção de DQO	Modelo	2906,09	5	581,22	6,75	0,0281
	Resíduos	430,13	5	86,03	-	-
	Falta de ajuste	321,01	3	107,00	1,96	0,3556 ^{ns}
	Erro puro	109,13	2	54,56	-	-
	Total	3332,21	10	-	-	-
R ² = 0,8709, R ² _{adj} = 0,7418.						
Remoção de cor	Modelo	9,84	5	1,97	8,63	0,0168
	Resíduos	1,14	5	0,2282	-	-
	Falta de ajuste	1,00	3	0,3336	4,77	0,1783 ^{ns}
	Erro puro	0,1400	2	0,0700	-	-
	Total	10,99	10	-	-	-
R ² = 0,8762, R ² _{adj} = 0,7923.						

Nota: SQ = soma dos quadrados; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrática; ns: não significativo ($p > 0,05$); F tabelado para a regressão = 5,05; F tabelado para falta de ajuste = 19,16. Fonte: Autor (2021).

Em relação a degradação da matéria orgânica do efluente, o modelo proposto é capaz de explicar 74% da variabilidade no percentual de remoção desse parâmetro. Para redução da cor apenas 20,77% da variação total não pode ser explicada pelo modelo empírico, o que é adequado, pois quanto mais variação é explicada pelo modelo, mais próximo os pontos experimentais estão da linha de tendência da regressão. Todos os modelos gerados podem ser usados para fins preditivos, pois apresentam valores de R² superiores a 0,80. Ademais, os modelos obtidos são ditos como confiáveis, pois a diferença entre R² e R²_{ajustado} é inferior a 0,20 (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010; MANAN *et al.*, 2019).

O teste F para validação estatística dos modelos gerados a partir da regressão dos resultados obtidos experimentalmente, em que se considera um F_{tabelado} de 5,05; mostra que os modelos propostos para a remoção % de DQO (F = 6,45) e de cor (F = 8,63) a 95% de confiança encontram-se validados, visto que o F_{calculado} para remoção de DQO e cor é maior que o F_{tabelado}. Ademais, a falta de ajuste foi não significativa ao nível de 5% de probabilidade para as variáveis dependentes investigadas, já que em todos os casos os valores de F_{calculado} foram menores que o F_{tabelado} para falta de ajuste (19,16).

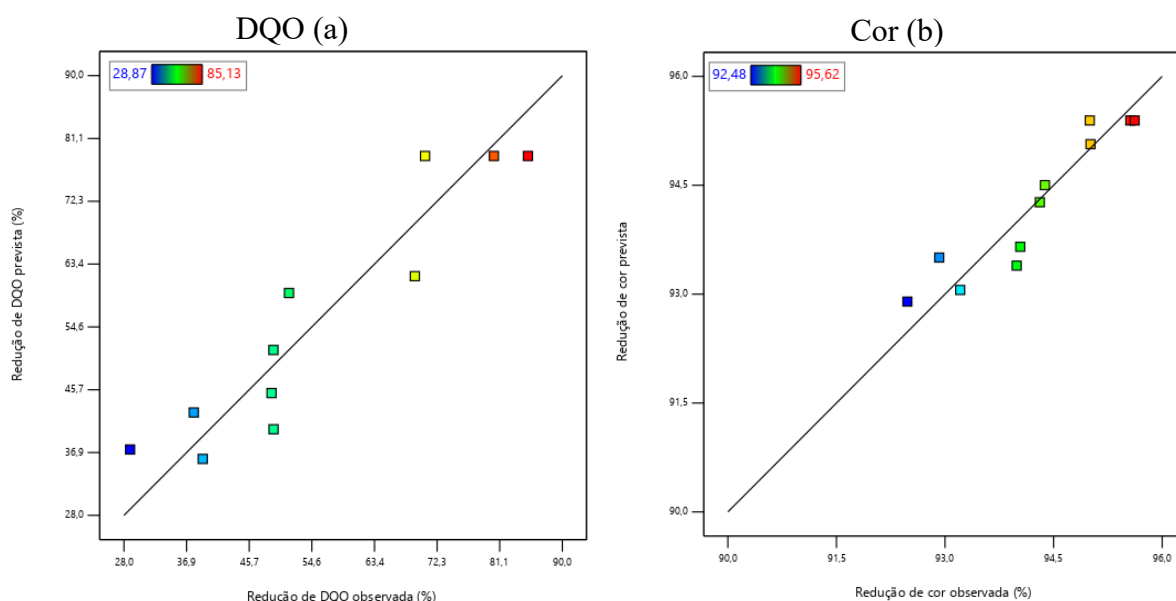
Os modelos matemáticos empíricos propostos referentes as remoções de DQO e cor para a reação Fenton estão apresentados nas Equações 9 e 10, respectivamente.

$$DQO \text{ removida (\%)} = -310,23183 + 0,529769 \times H_2O_2 + 4,10932 \times Fe^{2+} - 0,000543 \times H_2O_2 \times Fe^{2+} - 0,000233 \times H_2O_2^2 - 0,034373 \times Fe^{2+2} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$Cor \text{ removida (\%)} = 76,81714 + 0,021843 \times H_2O_2 + 0,237181 \times Fe^{2+} - 0,000016 \times H_2O_2 \times Fe^{2+} - 0,00000930672 \times H_2O_2^2 - 0,002013 \times Fe^{2+2} \quad \text{Eq. (10)}$$

A Figura 18 apresenta a curva de valores observados e de preditos pelos modelos para descrição das remoções de DQO e cor do efluente coagulado/floculado/decantado após tratamento por reação Fenton.

Figura 18 — Curvas preditos versus observados para as remoções de DQO (a) e de cor (b) no tratamento do efluente coagulado, floculado e decantado pelo processo Fenton.



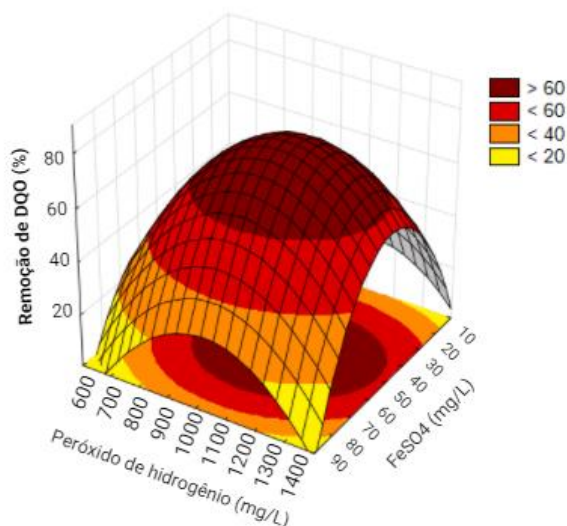
Fonte: Autor (2021).

Conforme observado nas Figuras 18a e 87b, todos os modelos matemáticos de regressão oportunizaram predição satisfatória dos dados experimentais, explicado através da distribuição dos pontos em torno da linha de tendência.

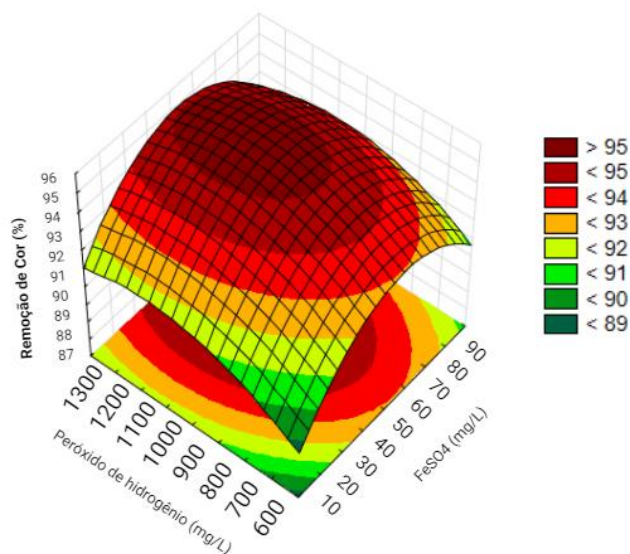
O método de superfície de resposta foi utilizado para modelar e otimizar as condições de remoções de DQO e cor. As superfícies de resposta são apresentadas na Figura 19.

Figura 19 — Superfícies de resposta para as eficiências de remoção de DQO (a) e de cor (b) no efluente coagulado/floculado/decantado após tratamento via processo Fenton.

DQO (a)



Cor (b)



Fonte: Autor (2021).

Analisando a Figura 19a observa-se que a degradação de DQO máxima prevista pelo modelo matemático proposto foi de 80% e que esta ocorreu para uma concentração de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ de 51,28 mg/L e H_2O_2 de 1075,49 mg/L. Ademais as dosagens desses reagentes no ponto central do planejamento estatístico revelam melhores percentuais de redução da DQO. De modo geral, as melhores eficiências de remoção de DQO podem ser encontradas nas concentrações de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ entre 44 e 55 mg/L e de H_2O_2 entre 960 e 1240 mg/L.

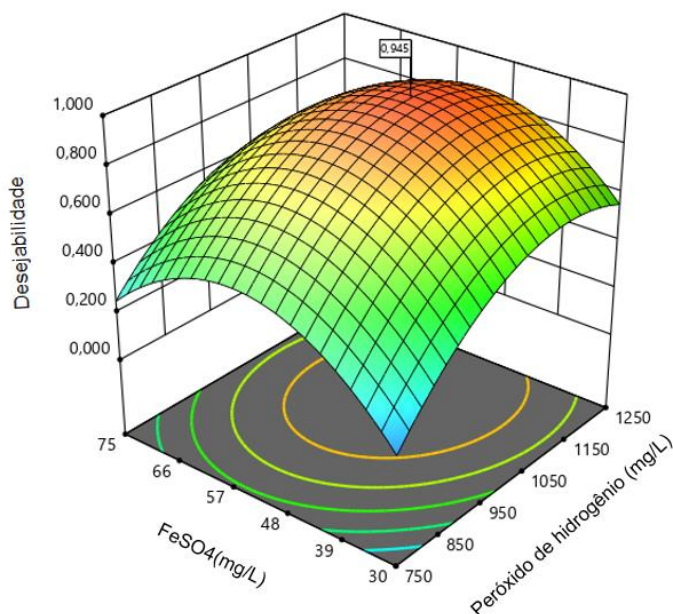
Ribeiro *et al.* (2016) também monitoraram os valores de remoção de DQO em função das concentrações de íons de Fe^{2+} e H_2O_2 (em mg/L) e observaram que, as melhores condições de remoção da matéria orgânica ocorreram quando foram utilizadas as dosagens médias e mais altas de reagentes, no qual foi removido mais de 68% da DQO de um efluente têxtil, indicando, um efeito similar ao observado na superfície de resposta da Figura 18a.

Com relação a remoção de cor (Fig. 19b) constata-se que a concentração de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ no menor nível estudado (-1) não é totalmente satisfatória para que o mesmo exerça um efeito catalisador adequado no meio reacional. O incremento na remoção da cor com o aumento da dosagem do catalisador, demonstra que a reação é favorecida pela presença dos sítios ativos na superfície do catalisador que atuam na produção dos radicais $\text{HO}\cdot$ responsáveis pela oxidação da molécula (HASSANI *et al.*, 2018).

Notadamente em todos os ensaios deste estudo a remoção de cor foi superior a 90%, fato que pode ser explicado pela eficácia dos radicais hidroxilas na mineralização de poluentes complexos, tais como os corantes presentes nesses efluentes industriais (ERTUGAY; ARCAR; 2017; SENNAOUI *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2021).

A análise de desejabilidade para o planejamento estatístico da reação Fenton está apresentada na Figura 20.

Figura 20 — Curva de desejabilidade para as eficiências de remoção % de DQO e de cor do efluente têxtil coagulado/floculado/decantado via tratamento Fenton.



Fonte: Autor (2021).

A desejabilidade máxima global encontrada foi de 0,94, para concentrações ótimas de 52,84 mg/L de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e 1097,21 mg/L de H_2O_2 . Comparativamente, as concentrações dos reagentes empregadas no ponto central investigado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ = 52,5 mg/L e H_2O_2 = 1000 mg/L, ensaios 3, 9 e 11) foram relativamente próximas as ótimas obtidas, proporcionando remoções satisfatórias de DQO e cor, demonstrando que o intervalo investigado supriu as necessidades de remoção desses parâmetros.

GilPavas, Dobrosz-Gomez e Gomez-García (2017) observaram remoção de 74% de DQO em um efluente têxtil usando 56 mg/L de ions de Fe^{2+} e 1224 mg/L de H_2O_2 , os quais são concentrações superiores às encontradas neste trabalho. Cetinkaya *et al.* (2018) registraram redução de DQO de 70% em um efluente têxtil utilizando 100 mg/L Fe^{2+} e 1400 mg/L de H_2O_2 . Estes valores são também superiores as concentrações ótimas determinadas neste estudo.

5.3 QUALIDADE DO EFLUENTE FINAL

Após o tratamento do efluente têxtil pelo processo combinado de coagulação, floculação e decantação e reação Fenton verifica-se descoloração quase total da cor do efluente e remoção elevada da DQO. No caso da DQO o tratamento combinado permitiu a redução deste parâmetro para limites dentro da faixa de lançamento de efluentes industriais estabelecida na Resolução COEMA nº 02/2017 (< 200 mg/L).

A Tabela 20 apresenta os valores dos parâmetros monitorados após emprego dos tratamentos físico-químico e oxidativo no efluente têxtil real.

Tabela 20 — 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 reação Fenton*
Turbidez	238	3,81	**
pH	10,4	9,17	7,03
Abs. 670 nm	0,201 (1:10)	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 H_2O_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 neutralidade, considerando as condições de descarte do efluente. **A turbidez foi monitorada apenas no tratamento físico-químico. Fonte: Autor (2021).

Na Tabela 20 constata-se ao final do tratamento combinado eficiências de remoções (%) de turbidez, cor e de DQO correspondentes a 98,4, 99,9% e 92,4%, respectivamente. Outros autores demonstram a eficiência da integração dos processos físico-químicos com reação

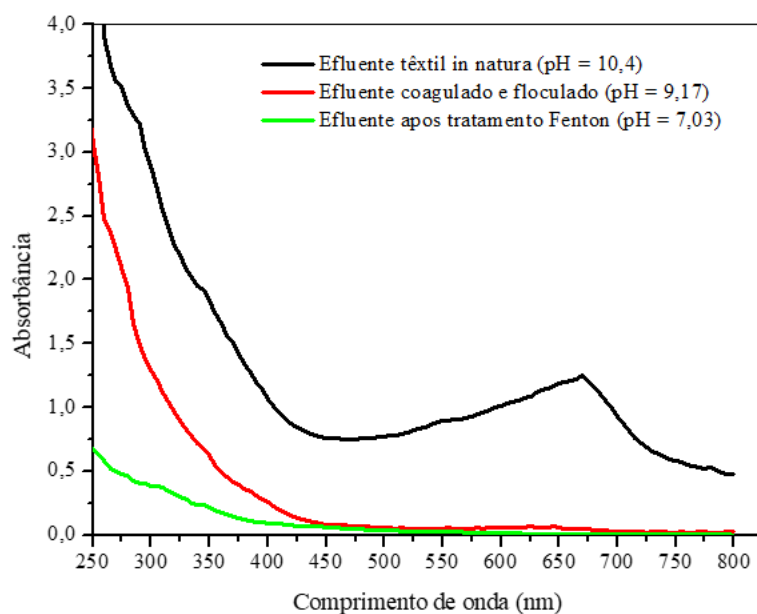
Fenton para tratar efluentes têxteis. Pereira e Brito (2018) relataram que, com a associação desses métodos, foi possível remover mais de 75% da DQO de um efluente têxtil, com emprego de 0,80 mg/L de polímero aniônico (coagulante) e adição de 13 mg/L de íons de Fe^{+2} e 200 mg/L de peróxido de hidrogênio

GilPavas, Dobrosz-Gómez e Gómez-García (2017) ao combinar esses processos para o tratamento de um efluente têxtil, registraram a remoção de 74% da DQO, quando utilizaram 700 mg/L de sulfato de alumínio e concentração de $\text{Fe}^{2+} = 270$ mg/L e de $\text{H}_2\text{O}_2 = 670$ mg/L.

López-López *et al.* (2015) adotando processos combinados de coagulação/floculação e reação Fenton mostraram remoções quase que totais da cor de um efluente têxtil, com emprego de 500 mg/L de PAC 18, 500 mg/L de H_2O_2 e 40 mg/L de Fe^{2+} . Todos esses estudos apresentados validam os resultados obtidos nessa pesquisa.

Os perfis de absorção molecular no UV-Vis do efluente bruto, e após tratamento por coagulação/floculação/decantação e sistema Fenton podem ser vistos na Figura 21.

Figura 21 — Espectros no UV-Vis do efluente têxtil bruto após o processo combinado de coagulação/floculação/decantação e Fenton utilizado nesta pesquisa.



Fonte: 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, proporcionando uma descoloração e degradação significativa 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, indicando 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.

Por fim, a Figura 22 apresenta as imagens do efluente têxtil real no seu estado bruto e após a realização do tratamento combinado proposto.

Figura 22 — Efluente têxtil bruto e tratado pelo processo combinado físico-químico de coagulação/floculação/decantação e reação Fenton.



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 22, é observado visualmente o quanto o tratamento empregado impactou na cor do efluente. Em geral, o efluente tratado, para turbidez, DQO e cor, se encontrou em conformidade com os valores estabelecidos nas Resoluções CONAMA n° 430/2011 e COEMA n° 02/2017. De maneira geral o tratamento combinado se mostrou promissor na remoção de contaminantes presentes no efluente têxtil.

6 CONCLUSÕES

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a eficiência e aplicabilidade do processo combinado de coagulação/floculação/decantação e processo oxidativo Fenton no tratamento de um efluente têxtil real. Assim, a partir dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- O planejamento experimental fatorial empregado no tratamento físico-químico por coagulação e floculação mostrou remoções máximas de 98,4% de turbidez; 75,2% de cor e 55,8% de DQO.
- A dosagem do policloreto de alumínio (PAC) e o gradiente de velocidade (G_{mr}) foram parâmetros significativos ($p < 0,05$) na remoção da turbidez do efluente, enquanto para remoção de cor apenas a dosagem do PAC foi significativa. De maneira geral, a concentração do coagulante foi o fator crucial para otimização do tratamento por coagulação e floculação.
- Os valores de PAC = 836 mg/L e em $G_{mr} = 900 \text{ s}^{-1}$ produziram a melhor condição de desejabilidade frente as variáveis-respostas estudadas. Nessas condições, os teores remanescentes de turbidez, absorvância (670 nm) e DQO do efluente foram de 3,81 NTU; absorvância de 0,050 e DQO residual de 992,2 mg/L.
- A análise de variância realizada para cada variável, dependente do processo de coagulação e floculação, permitiu observar que apenas os modelos empíricos para remoção % de turbidez e cor foram estatisticamente significativos e preditivos para um nível de 95% de confiança.
- No delineamento experimental fatorial realizado para obtenção das condições ótimas do tratamento via reação Fenton registrou-se como reduções máximas os percentuais de 95,6% de cor e 85,1% DQO e uma taxa residual máxima de H_2O_2 de 4,12%. Os valores de 52,5 mg/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e de 1000 mg/L de H_2O_2 são condições de desejabilidade máxima em relação a remoção de DQO e cor. Nessas condições, os teores remanescentes de absorvância (670 nm) e DQO do efluente foram de 0,002 e 147,4 mg/L, respectivamente.
- No processo Fenton foi possível afirmar que os modelos propostos para remoção de cor e DQO foram estatisticamente significativos e preditivos para um nível de 95% de confiança.
- A caracterização do efluente tratado via reação Fenton mostrou que o tratamento oxidativo foi eficiente na remoção da matéria orgânica e na decomposição dos grupos cromóforos dos corantes, garantindo que a cor e a DQO do efluente têxtil estivesse em conformidade com os padrões de lançamento da legislação brasileira e estadual.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados e discussões apresentados nesse trabalho recomenda-se que os seguintes pontos sejam considerados:

- Realização de ensaios de biodegradabilidade no início e no final dos sistemas de tratamento.
- Avaliação técnica-econômica dos processos propostos, considerando não apenas os custos operacionais, mas todos os outros custos relacionados à construção, instalação, manutenção e operação rotineiras do sistema.
- Identificação quanto a possível formação de compostos intermediários (subprodutos) durante o tratamento via reação Fenton.
- Realização de novos experimentos na região experimental apontada como ótima para o processo Fenton, a fim de aferir os parâmetros do modelo.
- Monitoramento do residual de ferro do processo Fenton.
- Caracterização do lodo gerado no processo de tratamento por reação Fenton.
- Investigação de outros parâmetros físico-químicos afim de apontar se a qualidade final do efluente tratado está de acordo com a Resolução CONAMA nº 430/2011 sobre condições e padrões de lançamento.
- Avaliação do emprego de complexantes orgânicos às reações de Fenton, visando a possibilidade de realização do tratamento em um pH neutro ou básico, visto que os efluentes têxteis reais normalmente são altamente alcalinos.

REFERÊNCIAS

- ALATON, I. A.; BALCIOGLU, I. A.; BAHNEMANN, D. W. Advanced oxidation of a reactive dyebath effluent: comparison of O₃, H₂O₂/UV-C and TiO₂/ UV-A processes. **Water Research**, v. 36, n. 5, p. 1143-1154, 2002.
- ABIT. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. Cartilha Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira. Brasília. 2013. Disponível em: <http://www.abit.org.br/conteudo/links/publicacoes/cartilha_rtcc.pdf>. Acesso em: 26 de setembro de 2020.
- ANJANEYULU, Y., SREEDHARA CHARY, N.; SAMUEL SUMAN RAJ, D. Decolourization of industrial effluents – Available methods and emerging technologies – A review. **Rev Environ Sci Biotechnol**, v. 4, p. 245-273, 2005.
- AOUNI, A. *et al.* Reactive dyes rejection and textile effluent treatment study using ultrafiltration and nanofiltration processes. **Desalination**, v. 297, p. 87-96, 2012.
- APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 ed. Washington: APHA, 2012.
- ARAÚJO, H. N.; ISQUIBOLA, G.; RODRIGUES, E. C (2020) Estudo da degradação do corante índigo blue por meio de diferentes processos oxidativos avançados. *Sinergia*, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 133-136.
- ARULMATHI, P. *et al.* Treatment of textile wastewater by coagulation–flocculation process using gossypium herbaceum and polyaniline coagulants. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 47, n. 7, p. 1800464, 2019.
- BADAWI, A. K.; ZAHER, K. Hybrid treatment system for real textile wastewater remediation based on coagulation/flocculation, adsorption and filtration processes: Performance and economic evaluation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, p. 101963, 2021.
- BADAWY, M. I. *et al.* Fenton-biological treatment processes for the removal of some pharmaceuticals from industrial wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v. 167, n. 1-3, p. 567-574, 2009.
- BAEK, M. H. *et al.* Removal of Malachite Green from aqueous solution using degreased coffee bean. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, n. 1-3, p. 820-828, 2010.
- BARROS NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria. Bookman Editora, 2010.
- BAZRAFESHAN, E.; ALIPOUR, M. R.; MAHVI, A. H. Textile wastewater treatment by application of combined chemical coagulation, electrocoagulation, and adsorption processes. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 20, p. 9203-9215, 2015.

BERKESSA, Y. W. *et al.* Treatment of anthraquinone dye textile wastewater using anaerobic dynamic membrane bioreactor: Performance and microbial dynamics. **Chemosphere**, v. 238, p. 124539, 2020.

BETANCUR C., B. *et al.* Potencial zeta como criterio de optimización de dosificación de coagulante en planta de tratamiento de agua potable. **Dyna**, v. 79, n. 175, p. 166-172, 2012.
BHATIA, D. *et al.* Biological methods for textile dye removal from wastewater: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 19, p. 1836-1876, 2017.

BEZERRA, M. A. *et al.* Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, v. 76, n. 5, p. 965-977, 2008.

BILIŃSKA, L. *et al.* Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse. **Chemical Engineering Journal**, v. 358, p. 992-1001, 2019.

BISSCHOPS, I.; SPANJERS, H. Literature review on textile wastewater characterisation. **Environmental Technology**, v. 24, n. 11, p. 1399-1411, 2003.

BRASIL. CONAMA - Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63, 2005.

BRASIL. COEMA (Estado CE) - Resolução nº 02, de 02 de fevereiro de 2017, dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes permitidos no Estado do Ceará. Diário Oficial do Estado, série 3, ano IX nº 37.

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.

BREITKREITZ, M. C.; SOUZA, A. M. de; POPPI, R. J. Experimento didático de quimiometria para planejamento de experimentos: avaliação das condições experimentais na determinação espectrofotométrica de ferro II com o-fenantrolina. Um tutorial, parte III. **Química Nova**, v. 37, p. 564-573, 2014.

CAMPOS, V. M.; BRITO, N. N. de. Tratamento de efluente têxtil utilizando coagulação/floculação e Fenton. **Revista de Química Industrial**, v. 82, n. 743, p. 11-17, 2014.

CETINKAYA, S. G. *et al.* Comparison of classic Fenton with ultrasound Fenton processes on industrial textile wastewater. **Sustainable Environment Research**, v. 28, n. 4, p. 165-170, 2018.

COLLIVIGNARELLI, M. C. *et al.* Treatments for color removal from wastewater: State of the art. **Journal of Environmental Management**, v. 236, p. 727-745, 2019.

COSTA, N. R.; LOURENÇO, J.; PEREIRA, Z. L. Desirability function approach: a review and performance evaluation in adverse conditions. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 107, n. 2, p. 234-244, 2011.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. di B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005. v. 2.

DOTTO, J. *et al.* Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 656-665, 2018.

DRUMM, F. C. *et al.* Response surface methodology approach for the optimization of tartrazine removal by heterogeneous photo-Fenton process using mesostructured Fe₂O₃-supported ZSM-5 prepared by chitin-templating. **Chemical Engineering Communications**, v. 205, n. 4, p. 445-455, 2018.

ERTUGAY, N.; ACAR, F. N. 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, 2017.

FARSHCHI, M. E.; AGHDASINIA, H.; KHATAEE, A. 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, 2019.

FAVERO, B. M. *et al.* 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, 2018.

FERNANDES, S. M. *et al.* Oxidação Fenton do azo corante Ponceau BS usando nanopartículas de óxido de ferro como catalisador. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 14, n. 2, p. 899-916, 2021.

FIEMG. Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. Guia técnico ambiental da indústria têxtil. Minas Gerais: FIEM, 2014. Disponível em: <https://www7.fiemg.com.br/Cms_Data/Contents/central/Media/Documentos/Biblioteca/PDFs/FIEMG/MeioAmbiente/2014/CartilhasPublica%C3%A7%C3%B5es/FI-0054-14-CARTILHA-PRODUCAO-MAIS-LIMPA-INTRANET.pdf>. Acesso em: 26 de setembro de 2020.

GAROLE, V. J. *et al.* 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.

GHANBARI, F.; MORADI, M. A comparative study of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxi-coagulation for decolorization of real textile wastewater: electrical energy consumption and biodegradability improvement. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 1, p. 499-506, 2015.

GILPAVAS, E. *et al.* 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.

GILPAVAS, E.; DOBROSZ-GÓMEZ, I.; GÓMEZ-GARCÍA, M. Á. 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, 2017.

GILPAVAS, E.; DOBROSZ-GÓMEZ, I.; GÓMEZ-GARCÍA, MIGUEL-ÁNGEL. Optimization and toxicity assessment of a combined electrocoagulation, $H_2O_2/Fe^{2+}/UV$ and activated carbon adsorption for textile wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 551-560, 2019.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 1, p. 71-78, fev. 2000.

GUILLEN ZEVALLOS, M. O. *et al.* Tratamiento fisicoquímico de los efluentes del proceso de lavado de lana en una industria textil de Arequipa. **Rev. Soc. Quím. Perú.**, v. 86, n. 4, p. 428-438, 2020.

GUO, X.; WANG, K.; XU, Y. Tartaric acid enhanced $CuFe_2O_4$ -catalyzed heterogeneous photo Fenton-like degradation of methylene blue. **Materials Science and Engineering**, v. 245, p. 75-84, 2019.

HAO, O. J.; KIM, H.; CHIANG, PEN-CHI. Decolorization of wastewater. **Critical reviews in Environmental Science and Technology**, v. 30, n. 4, p. 449-505, 2000.

HASSANI, A. *et al.* Enhanced removal of basic violet 10 by heterogeneous sono-Fenton process using magnetite nanoparticles. **Ultrasonics sonochemistry**, v. 42, p. 390-402, 2018.

HOLKAR, C. R. *et al.* A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 351-366, 2016.

HOSSAIN, M. S. *et al.* Reuse of textile mill ETP sludge in environmental friendly bricks—effect of gamma radiation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 151, p. 77-83, 2018.

HUSSAIN, T.; WAHAB, A. A critical review of the current water conservation practices in textile wet processing. **Journal of Cleaner Production**, v. 198, p. 806-819, 2018.

ILHAN, F. *et al.* Treatability of raw textile wastewater using Fenton process and its comparison with chemical coagulation. **Desalination and Water Treatment**, v. 162, p. 142, 2019.

ISLAM, M. R., MOSTAFA, M. G. Caracterização de efluente de tingimento têxtil e seu tratamento com cloreto de polialumínio. **Appl Water Sci**, v. 10, p. 119, 2020.

JAAFARZADEH, N. *et al.* The performance study on ultrasonic/ Fe_3O_4/H_2O_2 for degradation of azo dye and real textile wastewater treatment. **Journal of Molecular Liquids**, v. 256, p. 462-470, 2018.

JEFFERSON, B. *et al.* Application of charge measurement to water treatment processes. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 4, n. 5-6, p. 49-56, 2004.

KARAM, A.; BAKHOUM, E. S.; ZAHER, K. Coagulation/flocculation process for textile mill effluent treatment: experimental and numerical perspectives. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 14, n. 5, p. 1-13, 2021.

KARTHIK, T.; RATHINAMOORTHY, R. Recycling and reuse of textile effluent sludge. In: *Environmental Implications of Recycling and Recycled Products*. Springer, Singapore, 2015. p. 213-258.

KHAN, S. MALIK, A. Toxicity evaluation of textile effluents and role of native soil bacterium in biodegradation of a textile dye. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 5, p. 4446-4458, 2018.

KIM, HYUN-CHUL *et al.* Treating laundry waste water: Cationic polymers for removal of contaminants and decreased fouling in microfiltration. **Journal of Membrane Science**, v. 456, n., p. 167–174, 2014.

KUMAR, A.; DIXIT, C. K. Methods for characterization of nanoparticles. In: *Advances in nanomedicine for the delivery of therapeutic nucleic acids*. Woodhead Publishing, p. 43-58, 2017.

LEITE, L. S. *et al.* Monitoring ecotoxicity of disperse red 1 dye during photo-Fenton degradation. **Chemosphere**, v. 148, p. 511-517, 2016.

LELLIS, B. *et al.* 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, 2019.

LÓPEZ-LÓPEZ, C. *et al.* Combined treatment of textile wastewater by coagulation–flocculation and advanced oxidation processes. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 30, p. 13987-13994, 2015.

MACHULEK, A. *et al.* Abatement of the inhibitory effect of chloride anions on the photo-Fenton process. **Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 24, p. 8459-8463, 2007.

MALATO, S. *et al.* Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. **Catalysis Today**, v. 147, n. 1, p. 1-59, 2009.

MANAN, T. S. B. *et al.* Application of response surface methodology for the optimization of polycyclic aromatic hydrocarbons degradation from potable water using photo-Fenton oxidation process. **Science of the Total Environment**, v. 665, p. 196-212, 2019.

MARTINS, L. M. *et al.* Application of Fenton, photo-Fenton and UV/H₂O₂ in treating synthetic textile wastewater containing the dye Black Biozol UC. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 261-270, 2011.

MCYOTTO, F. *et al.* Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation. **Chemical Engineering Journal**, v. 405, n. 4, p. 126-137, 2021.

MCYOTTO, F. O. *et al.* Eco-friendly decolorization of cationic dyes by coagulation using natural coagulant Bentonite and biodegradable flocculant Sodium Alginate. **SDRP J. Earth Sci. Environ. Stud.**, v. 5, p. 51-60, 2020.

MENDES, C. R.; DILARRI, G.; PELEGRINI, R. T. Aplicação da biomassa *Saccharomyces cerevisiae* como agente adsorvente do corante Direct Orange 2GL e os possíveis mecanismos de interações adsorbato/adsorvente. **Matéria**, v. 20, n. 4, p. 898-908, 2015.

NAVARRO, P.; GABALDÓN, J. A.; GÓMEZ-LÓPEZ, V. M. Degradation of an azo dye by fast and innovative pulsed light/H₂O₂ advanced oxidation process. **Dyes and Pigments**, v. 136, n. 1, p. 887-892, 2017.

NIEBISCH, C. H. *et al.* Assessment of *Heteroporus biennis* secretion extracts for decolorization of textile dyes. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 88, p. 20-28, 2014.

NOVAES, C. G. *et al.* Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies de resposta-Parte I: variáveis de processo. **Revista Virtual Química**, v. 9, n. 3, p. 1284-1215, 2017.

ORTS, F. *et al.* Electrochemical treatment of real textile wastewater: Trichromy Procion HEXL[®]. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 808, p. 387-394, 2018.

PASCHOAL, F. M. M.; TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Química Nova**, v. 28, p. 766-772, 2005.

PAULINO, T. R. S.; ARAÚJO, R. S.; SALGADO, B. C. B. Estudo de oxidação avançada de corantes básicos via reação Fenton (Fe²⁺/H₂O₂). **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 20, n. 3, p. 347-352, 2015.

PERALTA-HERNÁNDEZ, J. M. *et al.* Photo and solar Fenton processes for wastewater treatment. In: *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*. Butterworth-Heinemann, 2018. p. 223-237.

PEREIRA, C. A. M.; BRITO, N. N. Integration of treatment technologies with Fenton reagent for laboratory effluent remediation. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 5, p. 1-21, 2018.

PIGNATELLO, J. J.; OLIVEROS, E.; MACKAY, A. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. **Critical reviews in Environmental Science and Technology**, v. 36, p. 1-84, 2006.

PIZATO, E. *et al.* Caracterização de efluente têxtil e avaliação da capacidade de remoção de cor utilizando o fungo *Lasiodiplodia theobromae* MMPI. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 22, n. 5, p. 1027-1035, 2017.

PUNZI, M. *et al.* Combined anaerobic–ozonation process for treatment of textile wastewater: Removal of acute toxicity and mutagenicity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 292, p. 52-60, 2015.

- QUEIROZ, M. T. A. *et al.* Reestruturação na forma do tratamento de efluentes têxteis: uma proposta embasada em fundamentos teóricos. **Gestão & Produção**, v. 26, n. 1, p. 1-14, 2019.
- RAMOS, M. D. N. *et al.* A critical analysis of the alternative treatments applied to effluents from Brazilian textile industries. **Journal of Water Process Engineering**, v. 43, p. 102273, 2021.
- RAMOS, M. D. N. *et al.* Critical analysis of the characteristics of industrial effluents from the textile sector in Brazil. **Revista Virtual Química**, v. 12, n. 4, p. 913-929, 2020.
- RIBEIRO, F.W.P. *et al.* Eletrodegradação de Ponceau 2R utilizando anodos dimensionalmente estáveis e Ti/Pt. **Química Nova**, v. 36, n. 1, p. 85-90, 2013.
- RIBEIRO, M. C. M. *et al.* Textile wastewater reuse after additional treatment by Fenton's reagent. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 7, p. 1-11, 2016.
- 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**, v. 252, n. 1-3, p. 53-59, 2010.
- ROSA, J. M. *et al.* 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, 2019.
- SALEH, R.; TAUFIK, A. Degradation of methylene blue and congo-red dyes using Fenton, photo-Fenton, sono-Fenton, and sonophoto-Fenton methods in the presence of iron (II, III) oxide/zinc oxide/graphene (Fe₃O₄/ZnO/graphene) composites. **Separation and Purification Technology**, v. 210, p. 563-573, 2019.
- SALGADO, B. C. B. *et al.* Descoloração de efluentes aquosos sintéticos e têxtil contendo corantes índigo e azo via processos Fenton e foto-assistidos (UV e UV/H₂O₂). **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 1-8, 2009.
- SAMSAMI, S. *et al.* Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 143, p. 138-163, 2020.
- SANTOS, E. M. A. *et al.* Reator anaeróbio tipo UASB conjugado com processo Fenton para remoção de cor e demanda química de oxigênio de água residuária sintética de indústria têxtil. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 22, n. 2, p. 285-292, 2017.
- SENNAOUI, A. *et al.* Advanced oxidation of reactive yellow 17 dye: a comparison between Fenton, Photo-Fenton, Electro-Fenton, Anodic Oxidation and Heterogeneous Photocatalysis Processes. **Port. Electrochim. Acta**, v. 36, n. 3, p. 163-178, 2018.
- SHEN, X.; MAA, J. P. Y. A camera and image processing system for floc size distributions of suspended particles. **Marine Geology**, Gloucester Point, v. 376, n. 1, p. 132-146, 2016.

SILVA, A. M. *et al.* Low-cost flow photoreactor for degradation of Reactive Black 5 dye by UV/H₂O₂, Fenton and photo-Fenton processes: a performance comparison. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, p. 20-31, 2021.

SILVA, J. G. S., MENDES JUNIOR, R. S., LOBATO, A. K. C. L. Coagulantes naturais utilizados no tratamento de efluentes em indústrias têxteis. **Cadernos de Prospecção**, v. 13, n. 5, p. 1450-1460, 2020.

SILVA, L. D. *et al.* Eficiência da coagulação, floculação e decantação como tratamento primário de efluente têxtil. **Revista Geama**, v., n., p. 36-40, 2019.

SOON, A. N.; HAMEED, B. H. Heterogeneous catalytic treatment of synthetic dyes in aqueous media using Fenton and photo-assisted Fenton process. **Desalination**, v. 269, n. 1-3, p. 1-16, 2011.

TASNEEM, A. *et al.* Textile Wastewater Treatment by Combination of Chemical and Phytoremediation Processes. **Pollution**, v. 7, n. 1, p. 43-54, 2021.

TAVANGAR, T. *et al.* Toward real textile wastewater treatment: Membrane fouling control and effective fractionation of dyes/inorganic salts using a hybrid electrocoagulation–Nanofiltration process. **Separation and Purification Technology**, v. 216, p. 115-125, 2019.

TARLEY, C. R. T. *et al.* Chemometric tools in electroanalytical chemistry: methods for optimization based on factorial design and response surface methodology. **Microchemical Journal**, v. 92, n. 1, p. 58-67, 2009.

TIANZHI, W. *et al.* Effect of coagulation on bio-treatment of textile wastewater: Quantitative evaluation and application. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 7, p. 127798, 2021.

TORRES, N. H. *et al.* Real textile effluents treatment using coagulation/flocculation followed by electrochemical oxidation process and ecotoxicological assessment. **Chemosphere**, v. 236, n. 2, p. 124309, 2019.

URIBE VALENZUELA, C. L. *et al.* Reúso en procesos de blanqueo textil de los efluentes provenientes de tinturas con colorantes reactivos negros decolorados mediante el método de fenton. **Rev. Soc. Quím. Perú**, Lima, v. 86, n. 3, p. 300-314, 2020.

VALENZUELA, C. L. U. *et al.* Reúso en procesos de blanqueo textil de los efluentes provenientes de tinturas con colorantes reactivos negros decolorados mediante el método de fenton. **Rev. Soc. Quím. Perú**, v. 86, n. 3, p. 300-314, 2020.

VERMA, A. K.; DASH, R. R.; BHUNIA, P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. **Journal of Environmental Management**, v. 93, n. 1, p. 154-168, 2012.

VIKRANT, K. *et al.* Recent advancements in bioremediation of dye: current status and challenges. **Bioresource Technology**, v. 253, p. 355-367, 2018.

VILAR, V. J. P. *et al.* Treatment of textile wastewaters by solar-driven advanced oxidation processes. **Solar Energy**, v. 85, n. 9, p. 1927-1934, 2011.

VU, A. T.; XUAN, T. N.; LEE, C. H. Preparation of mesoporous $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ composite from rice husk as an efficient heterogeneous Fenton-like catalyst for degradation of organic dyes. **Journal of Water Process Engineering**, v. 28, p. 169-180, 2019.

WANG, D. M. Environmental protection in clothing industry. In: sustainable development: Proceedings of the 2015 International Conference on sustainable development (ICSD2015). 2016. p. 729-735.

WANG, K. H. The status quo and development trend of printing and dyeing wastewater treatment technology[J]. **Resource Conservation and Environmental Protection**, v. 12, p. 79-80, 2019.

WANG, X. *et al.* Treatment of jean-wash wastewater by combined coagulation, hydrolysis/acidification and Fenton oxidation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 153, n. 1-2, p. 810-816, 2008.

YADAV, A.; MUKHERJI, S.; GARG, A. Removal of chemical oxygen demand and color from simulated textile wastewater using a combination of chemical/physicochemical processes. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 30, p. 10063-10071, 2013.

YAO, MENG; NAN, JUN; CHEN, TING. Effect of particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation processes. **Desalination**, v. 354, p.116-124, 2014.

YIN, C. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. **Process Biochemistry**, v. 45, n. 9, p. 1437-1444, 2010.