

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Andressa Teixeira de Souza Salgado



**Avaliação de Processos de Tratamento para Remoção
de Corante Índigo de Efluentes Industriais Têxteis**

RIO DE JANEIRO

2024

Andressa Teixeira de Souza Salgado

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DE CORANTE
ÍNDIGO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS TÊXTEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Químico Industrial.

Orientadora: Juacyara Carbonelli Campos

Rio de Janeiro

2024

CIP - Catalogação na Publicação

S164a Salgado, Andressa Teixeira de Souza
Avaliação de Processos de Tratamento para Remoção
de Corante Índigo de Efluentes Industriais Têxteis
/ Andressa Teixeira de Souza Salgado. -- Rio de
Janeiro, 2024.
62 f.

Orientadora: Juacyara Carbonelli Campos.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Química Industrial, 2024.

1. Tratamento de efluentes. 2. Corante índigo. 3.
Efluentes têxteis. 4. Monografia (Graduação -
UFRJ/EQ). I. Campos, Juacyara Carbonelli, orient.
II. Título.

Andressa Teixeira de Souza Salgado

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DE CORANTE
ÍNDIGO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS TÊXTEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Químico
Industrial.

Aprovado em 17 de julho de 2024.

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro

Marcelo Mendes Viana, D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro

Marllon Robert dos Santos Valentim, Doutorando, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro
2024

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Alzira e Carlos, por todo esforço dedicado à minha educação, por sempre acreditarem no meu potencial e me apoiarem em todos os momentos. Obrigada por me guiarem com tanto cuidado e companheirismo, cada passo dado foi e será por vocês.

À minha prima Michelle, por sua generosidade, palavras de positividade e por se fazer presente de forma tão especial em minha vida.

Às minhas amigas Beatriz, Bruna, Fernanda, Cristiana e Talita, por todos os momentos que compartilhamos, por me trazerem conforto e me inspirarem a ser uma pessoa melhor em vários aspectos. Obrigada por compreenderem minha ausência nesses últimos meses e por todo o apoio que me deram.

Aos amigos e colegas que conheci na Escola de Química, em especial, à Stephanie, Ariane e Giselle, por dividirem desde o início essa jornada comigo, por serem as melhores duplas de laboratório e pelos momentos de glória e desespero nas bibliotecas e salas de estudo. Obrigada por me incentivarem e sempre me acolherem.

À ATOMUM e ao Instituto de Engenharia Nuclear, por proporcionarem minha primeira oportunidade de estágio. Em especial, à Isabel e Valeska, pela paciência, confiança, carinho, incentivo e por todo conhecimento compartilhado.

À professora Juacyara Carbonelli pela orientação, confiança e contribuições que tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho.

À banca composta pelo professor Marcelo Mendes e pelo pesquisador Marllon Robert dos Santos, que dedicaram tempo e expertise para avaliar e contribuir com este trabalho.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro por oferecer um ensino de qualidade e gratuito, e aos professores da Escola de Química pela dedicação em transmitir seus conhecimentos.

E a todos que de alguma forma marcaram essa trajetória, minha sincera gratidão!

“I am still in progress, and I hope that I always will be.”

Michelle Obama

RESUMO

SALGADO, Andressa Teixeira de Souza. **Avaliação de Processos de Tratamento para Remoção de Corante Índigo de Efluentes Industriais Têxteis**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A indústria têxtil brasileira, importante setor econômico do país, destaca-se na produção de *denim*, usado na fabricação de *jeans*, e está entre os maiores produtores globais de malhas. Entretanto, esta indústria enfrenta desafios significativos relacionados ao uso intensivo de água e à geração de efluentes altamente poluentes e com forte coloração. O corante índigo, utilizado predominantemente para a coloração de *jeans*, não é completamente fixado ao tecido durante o tingimento, resultando em um descarte significativo nos efluentes. O descarte sem tratamento desses efluentes causa impactos negativos no meio ambiente e potenciais riscos à saúde humana e de organismos aquáticos. O tratamento de efluentes têxteis é um desafio para esta indústria devido à complexidade da composição do efluente e à estabilidade química e recalcitrância dos corantes, desta forma, é necessário identificar processos de tratamento eficazes que atendam as normas ambientais vigentes e que sejam economicamente viáveis. O presente trabalho avaliou, por meio de pesquisa bibliográfica, os principais processos de tratamento para a remoção do corante índigo de efluentes têxteis, pontuando as vantagens e desvantagens de cada processo, e comparando-os quanto à eficiência, custo e capacidade de degradação do corante. A análise revelou que os processos oxidativos avançados, a filtração por membranas e a biodegradação se destacam pela elevada eficiência, enquanto os processos de biossorção, coagulação e adsorção apresentaram menor custo. Já os processos oxidativos e a biodegradação são capazes de degradar completamente ou transformar o corante em substâncias menos tóxicas. Processos como filtração por membrana e oxidativos, são eficazes para a reutilização da água do efluente, enquanto o processo de filtração por membrana também oferece a possibilidade de reúso do corante. Por fim, verificou-se também que a integração de diferentes processos é uma estratégia promissora para melhorar a eficiência geral do tratamento e reduzir custos.

Palavras-chave: efluentes têxteis; corante índigo; tratamento de efluentes.

ABSTRACT

SALGADO, Andressa Teixeira de Souza. **Evaluation of Treatment Processes for the Removal of Indigo Dye from Textile Industrial Effluents**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The Brazilian textile industry, an important economic sector in the country, stands out in the production of denim, used in the manufacture of jeans, and is among the largest global producers of knitwear. However, this industry faces significant challenges related to intensive water use and the generation of highly polluting effluents with strong coloration. Indigo dye, predominantly used for coloring jeans, is not completely fixed to the fabric during dyeing, resulting in significant disposal in the effluents. The untreated discharge of these effluents causes negative environmental impacts and potential health risks to humans and aquatic organisms. The treatment of textile effluents is a challenge for this industry due to the complex composition of the effluent and the chemical stability and recalcitrance of the dyes. Therefore, it is necessary to identify effective treatment processes that meet current environmental standards and are economically viable. This study evaluated, through bibliographic research, the main treatment processes for the removal of indigo dye from textile effluents, highlighting the advantages and disadvantages of each process and comparing them in terms of efficiency, cost, and dye degradation capacity. The analysis revealed that advanced oxidative processes, membrane filtration, and biodegradation stand out for their high efficiency, while biosorption, coagulation, and adsorption processes presented lower costs. Additionally, oxidative processes and biodegradation are capable of completely degrading or transforming the dye into less toxic substances. Processes such as membrane filtration and oxidative processes are effective for the reuse of effluent water, while membrane filtration also offers the possibility of dye reuse. Finally, it was found that the integration of different processes is a promising strategy to improve the overall efficiency of the treatment and reduce costs.

Keywords: textile wastewater; indigo dye; wastewater treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura molecular do corante índigo.....	20
Figura 2 - Planta Indigofera tinctoria e corante índigo.....	20
Figura 3 - Estrutura molecular do corante leucoíndigo.	21
Figura 4 - Estrutura molecular do corante índigo carmim.....	21
Figura 5 - Reação de redução e oxidação do corante índigo.	22
Figura 6 - Processo de tingimento industrial com corante índigo.	23
Figura 7 - Lançamento de efluente sem tratamento no rio Capibaribe por uma lavanderia de jeans.....	24
Figura 8 - Fluxograma do processo de beneficiamento na indústria têxtil e os efluentes gerados em cada etapa.....	26
Figura 9- Fluxograma do processo de tratamento combinado comumente empregado em indústrias têxteis.	29
Figura 10 - Fluxograma dos diversos processos utilizados para a remoção de corantes.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Líderes do setor têxtil (em % da produção mundial).	15
Tabela 2 - Classificação dos corantes por estrutura química com seus respectivos grupos cromóforos e principais propriedades.....	17
Tabela 3 - Classificação dos corantes quanto ao método de aplicação e tipo de fibra empregada.	19
Tabela 4 - Características físico-químicas típicas de efluentes têxteis.....	27
Tabela 5 - Processos de tratamento de efluentes líquidos.	28
Tabela 6 - Sistemas homogêneos e heterogêneos de processos oxidativos avançados.	40
Tabela 7 - Eficiências dos processos de remoção do corante índigo segundo vários autores. .	41
Tabela 8 - Custo para diferentes processos de tratamento.....	44
Tabela 9 - Avaliação dos processos de remoção do corante índigo.	46
Tabela 10 - Processos combinados.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIT Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção

CNI Confederação Nacional da Indústria

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO Demanda Química de Oxigênio

FIEG Federação das Indústrias do Estado de Goiás

INEA Instituto Estadual do Ambiente

pH Potencial Hidrogeniônico

POAs Processos Oxidativos Avançados

SISNAMA Sistema Nacional do Meio Ambiente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 A INDÚSTRIA TÊXTIL.....	15
3.2 CORANTES	16
3.2.1 Corante Índigo	19
3.3 PROCESSO DE TINGIMENTO COM CORANTE ÍNDIGO	21
3.4 IMPACTO AMBIENTAL E TOXICIDADE DO CORANTE ÍNDIGO	23
3.5 CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS TÊXTEIS	25
3.6 TRATAMENTOS DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL	27
3.7 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA	31
4 METODOLOGIA	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 TRATAMENTOS BIOLÓGICOS	35
5.1.1 Biossorção	35
5.1.2 Biodegradação	36
5.2 TRATAMENTOS FÍSICOS	36
5.2.1 Adsorção	36
5.2.2 Filtração por membranas	37
5.3 TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS.....	38
5.3.1 Coagulação	38
5.3.2 Eletrocoagulação	39
5.4 TRATAMENTOS QUÍMICOS: PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS	40
5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO	41
6 CONCLUSÕES	50
7 REFERÊNCIAS	51
ANEXO A – CONDIÇÕES E PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES	59
ANEXO B – REMOÇÕES MÍNIMAS PARA CARGA ORGÂNICA BIODEGRADÁVEL E NÃO BIODEGRADÁVEL DE EFLUENTES INDUSTRIAIS	60

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil brasileira possui forte impacto socioeconômico. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), o Brasil está entre os cinco maiores produtores mundiais de *denim*, tecido usado na fabricação do *Jeans*, e entre os quatro maiores produtores de malhas do mundo, com faturamento de R\$ 190 bilhões e produção têxtil de 2,16 milhões de toneladas em 2021. Além disso, o setor de confecção é o segundo maior empregador da indústria de transformação, com 1,34 milhão de empregos diretos (ABIT, 2023).

Apesar da importância socioeconômica, a indústria têxtil tem como desvantagem a alta demanda de recursos hídricos. A produção de roupas é responsável por cerca de 20% da poluição industrial da água, somente o processo de tingimento do tecido consome 5 trilhões de litros de água por ano no mundo (Drew e Yehounme, 2017).

Dentre os setores industriais que utilizam corantes em seus processos, o setor têxtil é um dos mais poluentes, consumindo mais de 10.000 toneladas de corantes dentre as 70 milhões de toneladas de corantes sintéticos produzidos anualmente pelo mundo (Al-Tohamy *et al.*, 2022). Os corantes sintéticos como o índigo blue e o índigo carmim estão entre os mais utilizados por essa indústria, principalmente para o tingimento de *jeans*. Durante o processo de tingimento, cerca de 5 a 20% do corante não é fixado ao tecido e é descartado como efluente (Paschoal e Tremiliosi-Filho, 2005). Esses corantes são recalcitrantes e apresentam grande dificuldade de remoção das águas residuais devido a sua estabilidade química (Castillo-Suárez *et al.*, 2023).

O efluente têxtil possui compostos tóxicos, muitos corantes presentes nesse efluente possuem caráter mutagênico e carcinogênico, sendo prejudiciais à saúde humana e aos organismos aquáticos (Al-Tohamy *et al.*, 2022). Esse efluente apresenta forte coloração, elevada DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio), além de pH alcalino. Se ele não for tratado adequadamente, além do impacto visual, pode provocar danos ao ecossistema aquático do corpo hídrico receptor (Ozturk *et al.*, 2009). A liberação de matéria orgânica causa turbidez e dificulta a penetração da luz solar na camada de água, prejudicando a realização da fotossíntese pelas plantas aquáticas e consequentemente diminuindo o oxigênio disponível para os organismos presentes (Al-Tohamy *et al.*, 2022).

O tratamento de águas residuais contendo corantes é uma das maiores dificuldades enfrentadas pela indústria têxtil. A complexa estrutura molecular aromática e alta estabilidade dos corantes sintéticos, como o corante índigo, dificultam sua degradação por processos mais convencionais, uma vez que são produzidos visando a resistência à transpiração, lavagem, luz

e agentes oxidantes (Guaratini e Zanoni, 2000). Essas características desafiadoras têm motivado diversas pesquisas com diferentes processos para a remoção de corante índigo de efluentes têxteis. A principal abordagem de tratamento combina processos convencionais com técnicas avançadas, sendo empregados processos como: adsorção, processos oxidativos avançados (ozonização, fotocátalise, Fenton, e fotoeletro-Fenton), separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração e nanofiltração) e eletrocoagulação (Rendón-Castrillón *et al.*, 2023; Chowdhury *et al.*, 2020).

O presente trabalho é motivado pela necessidade de encontrar processos eficazes e economicamente viáveis para a remoção do corante índigo de efluentes industriais têxteis, devido ao seu impacto ambiental significativo e à dificuldade de tratamento desses efluentes. Neste contexto, o trabalho se propôs a reunir pesquisas científicas que investiguem tratamentos eficazes e apropriados para a remoção do corante índigo, visando discutir os principais processos utilizados, comparando seus aspectos positivos e negativos, eficácia e custo, contribuindo para a compilação e disseminação das possibilidades de tratamento disponíveis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho visa avaliar quais processos de tratamento disponíveis são mais adequados para a remoção do corante índigo remanescente em efluentes da indústria têxtil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Identificar os principais processos de tratamento para a remoção do corante índigo em efluentes da indústria têxtil;
- Destacar as vantagens e as desvantagens dos processos de tratamento identificados para a remoção do corante índigo;
- Comparar os processos de tratamento quanto à eficiência, custo e capacidade de degradação do corante.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A INDÚSTRIA TÊXTIL

O setor têxtil e de confecção é um dos mais complexos e tradicionais setores industriais do mundo. Esse setor possui uma longa cadeia produtiva que engloba desde a produção de matérias-primas, como fibras e filamentos, até a confecção, em que os tecidos e malhas são transformados em peças acabadas, podendo ser destinadas a diversos fins, como vestuário, produtos têxteis para uso doméstico (artigos de cama, mesa e banho) ou para aplicações industriais (lonas e sacarias) (CNI, 2017). Suas indústrias estão presentes em diversos países, desde os mais desenvolvidos até os de menor desenvolvimento econômico (CNI, 2017).

Segundo a Federação das Indústrias do Estado de Goiás (FIEG, 2020), o continente asiático é responsável por 70% da produção têxtil mundial e concentra os principais produtores têxteis, com destaque para China, Índia, Paquistão, Indonésia, Taiwan, Coreia do Sul e Tailândia. Neste cenário, a China ocupa a posição de liderança e concentra cerca de 50% de toda a produção mundial (FIEG, 2020).

Na América do Sul, o Brasil é o único país com relevância, representando 2,4% da produção mundial de têxteis e ocupando a quinta posição no *ranking* mundial (FIEG, 2020), como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Líderes do setor têxtil (em % da produção mundial).

País	Produção de têxteis
China	50,20%
Índia	6,90%
Estados Unidos	5,30%
Paquistão	3,60%
Brasil	2,40%
Indonésia	2,40%
Taiwan	2,30%
Turquia	1,90%
Coreia do Sul	1,80%
Tailândia	1,10%

Fonte: Adaptado de FIEG, 2020.

Apesar de ser um dos grandes produtores mundiais do setor têxtil, o Brasil ainda tem uma participação pequena no mercado internacional, ocupando o trigésimo terceiro lugar no *ranking* de exportação de produtos têxteis e vestuário (FIEG, 2020), o que reflete uma produção majoritariamente focada no mercado interno.

O Brasil possui a maior cadeia têxtil e de confecção integrada do Ocidente, uma vez que produz desde as fibras (naturais e químicas) até o vestuário, contemplando as etapas de fiação, tecelagem, beneficiamento e confecção do produto final (CNI, 2017). Além disso, o país é autossuficiente na produção de algodão, destacando-se como o quarto maior produtor e o terceiro maior consumidor global de *denim*, fatores que desempenham um papel fundamental no reconhecimento internacional do Brasil na indústria de *jeanswear* (CNI, 2017).

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI), o setor têxtil e de confecção nacional possui mais de 32 mil empresas distribuídas nos 27 Estados. Dentre todas as regiões, a Sudeste se destaca como a principal produtora têxtil no país, sendo responsável por 48,29% da produção nacional, outras regiões importantes são Sul e Nordeste com 32,65% e 16,18% da produção têxtil, respectivamente (Mendes Júnior, 2017). Ainda segundo o autor, os Estados com maior destaque são São Paulo, que concentra 37,44% da produção nacional, e Santa Catarina, que apresenta 22,62%. Em relação a mão de obra, a região sudeste também se destaca ao empregar 49,4% da mão de obra do setor (CNI, 2017). A CNI destaca ainda o Estado de São Paulo, que conta com 27,7% da mão de obra empregada nas diferentes etapas da cadeia produtiva, seguido por Santa Catarina e Minas Gerais, com 15,5% e 13,5% do pessoal ocupado, respectivamente.

O processamento têxtil pode ser simplificado em 3 etapas: fiação, tecelagem e beneficiamento. O processo de fiação compreende a etapa de obtenção do fio a partir das fibras têxteis utilizadas como matéria-prima. Em seguida, ocorre a tecelagem, onde os fios são entrelaçados para formar tecidos planos ou de malha, criando sua estrutura básica. Posteriormente, ocorre o beneficiamento, que visa melhorar as características estéticas e funcionais dos tecidos (FEAM, 2014). Dentre os processos da etapa de beneficiamento, encontra-se o processo de tingimento, no qual são aplicados os corantes.

3.2 CORANTES

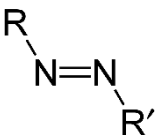
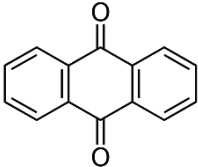
Os corantes são substâncias químicas orgânicas ou inorgânicas, obtidas por meio de fontes naturais ou de maneira sintética, que têm por função colorir variados substratos como tecidos, couro, papel, entre outros (Zanoni e Yamanaka, 2016). Quando comparados aos corantes naturais, os corantes sintéticos apresentam menor custo de produção, maior variedade de cores e tonalidades, maior grau de pureza, alto controle de fidelidade da cor e melhor fixação, o que justifica seu amplo uso em diversos setores industriais, como o têxtil, o de papel, o de plásticos, o farmacêutico, o de cosmético e o alimentício (Zanoni e Yamanaka, 2016).

Para a indústria têxtil, o corante tem a finalidade de conferir cor a uma fibra que pode ser de origem natural, como algodão, lã e linho, ou sintética, como poliéster e *nylon*. A escolha do corante depende de fatores como o processo de tingimento, a afinidade pela fibra e as características que permitam solidez a agentes desencadeadores de desbotamento como a luz, fricção e suor, além de ser economicamente viável (Guaratini e Zanoni, 2000; Veloso, 2012).

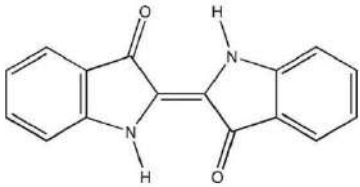
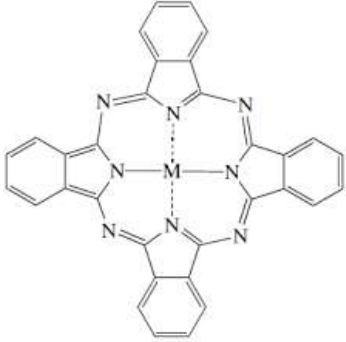
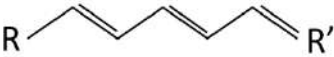
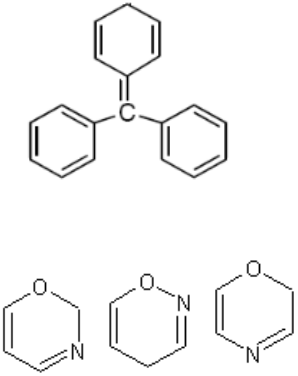
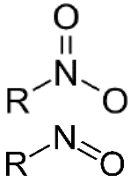
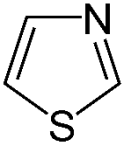
Os corantes podem ser classificados de acordo com sua estrutura química ou pelo modo de fixação à fibra, desta forma, o mesmo corante pode possuir mais de uma nomenclatura. Em sua estrutura, as moléculas de corantes apresentam dois componentes principais: o grupo cromóforo, que possui anéis aromáticos ou duplas ligações conjugadas, responsável pela coloração devido à absorção seletiva da luz visível, e o grupo dos auxocromos, que podem alterar a tonalidade da cor e são importantes para a fixação do corante à fibra (Zanoni e Yamanaka, 2016).

Em relação à estrutura química, os corantes podem ser classificados em: azo; antraquinona; indigoide; ftalocianinas; metina, polimetina e polienos; di e triarilmetina e oxazina; sulfurosos; nitro e nitrosos (Zanoni e Yamanaka, 2016). Essa diferenciação está relacionada ao grupo cromóforo da molécula de corante, dos quais pode-se destacar os azo ($-N=N-$), carbonil ($-C=O$), metino ($-CH=$), nitro ($-NO_2$), p-quinona e o-quinona (Santos et al., 2007). A Tabela 2 apresenta a classificação dos corantes quanto a sua estrutura química, destacando seus respectivos grupos cromóforos e principais características.

Tabela 2 - Classificação dos corantes por estrutura química com seus respectivos grupos cromóforos e principais propriedades.

Classificação por estrutura química	Grupo cromóforo	Principais propriedades
Azo		Ampla variedade de cores, brilho, resistência à luz, bom custo-benefício
Antraquinona		Ampla variedade de cores, brilho, estabilidade, resistência à luz, baixo custo-benefício devido à baixa fixação

Continuação Tabela 2 - Classificação dos corantes por estrutura química com seus respectivos grupos cromóforos e principais propriedades.

Classificação por estrutura química	Grupo cromóforo	Principais propriedades
Indigoide		Tonalidades sólidas, baixa solubilidade, resistência à luz e ao calor, baixa resistência à lavagem e alta fixação
Ftalocianinas	 (M: metal)	Cores intensas, brilho, resistência à luz e ao calor, boa fixação, bom custo-benefício
Metina, polimetina e polienos		Ampla variedade de cores, brilho, eventualmente fluorescência
Di e triarilmetina e oxazina		Cores intensas, brilho, resistência à luz, alguns apresentam toxicidade
Nitro e nitrosos		Boa resistência à luz, baixo custo e bom rendimento no tingimento
Sulfurosos		Tonalidades escuras, insolúveis em água, baixo custo

A classificação dos corantes quanto ao método de fixação à fibra está associada ao tipo de fibra têxtil empregada e aos grupos de auxocromos existentes nas moléculas de corante, podendo ser denominados de: corantes reativos, diretos, azoicos, ácidos, à cuba, catiônicos, dispersos e branqueadores (Zanoni e Yamanaka, 2016). Os grupos auxocromos atuam como doadores ou receptores de elétrons, o que possibilita a interação com as cargas presentes na superfície da fibra. Como exemplos de auxocromos, têm-se: os grupos aminas (-NH₂), carboxílicos (-COOH), sulfonados (-SO₃H) e hidroxílicos (-OH) (dos Santos et al., 2007). A Tabela 3 dispõe as diversas classes de corantes, relacionando-as com os tipos de fibras têxteis aos quais se destinam.

Tabela 3 - Classificação dos corantes quanto ao método de aplicação e tipo de fibra empregada.

Classificação pelo método de fixação à fibra	Fibras
Reativos	Algodão, lã, seda e <i>nylon</i>
Diretos	Algodão, viscose, seda e <i>nylon</i>
Azoicos	Algodão, viscose, acetato de celulose e poliéster
Dispersos	Poliéster, acetato de celulose, acrílico e <i>nylon</i>
Ácidos	<i>Nylon</i> , lã, seda, couro
À cuba	Algodão e viscose
Branqueadores ópticos	Aplicado a todas as fibras
Catiônicos	Lã, seda, algodão e acrílico

Fonte: Adaptado de Zanoni e Yamanaka, 2016.

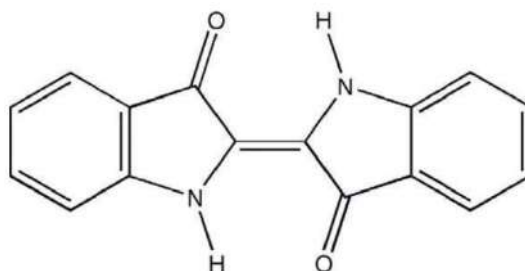
3.2.1 Corante Índigo

Os corantes indigoides são considerados os mais antigos, pois foram utilizados por mais de cinco mil anos para o tingimento de lã, linho e algodão. Dentre os corantes indigoides sintetizados, o índigo ou índigo blue é o mais importante desta classe, sendo extensamente utilizado na indústria têxtil para tingimento de fios de algodão empregados na manufatura de *jeans* (Hunger, 2003).

O índigo blue costumava ser extraído de plantas como as da espécie *Indigofera tinctoria* antes da produção industrial do índigo por rotas de síntese (Zanoni e Yamanaka, 2016). Em

1870, o químico alemão Adolf von Baeyer obteve o primeiro índigo sintético, relatando em 1883 sua estrutura química, apresentada na Figura 1 (Zanoni e Yamanaka, 2016). A Figura 2 mostra a planta *Indigofera tinctoria* e o corante índigo comercial.

Figura 1 - Estrutura molecular do corante índigo.



Fonte: de Araujo *et al.*, 2020.

Figura 2 - Planta *Indigofera tinctoria* e corante índigo.

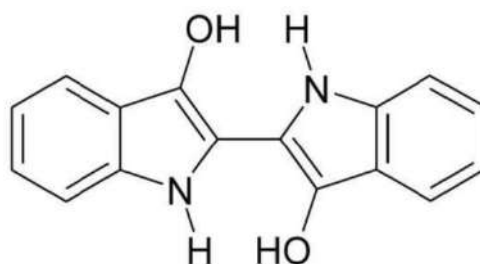


Fonte: Saikhao *et al.*, 2022.

O índigo blue é um composto de coloração azul com fórmula química $C_{16}H_{10}N_2O_2$. A presença do grupo cetônico ($C=O$) em sua estrutura torna esse composto insolúvel em água. No entanto, quando se altera na forma reduzida ($C-OH$), torna-se solúvel e o corante passa a ter afinidade química pela fibra (Paschoal e Tremiliosi-Filho, 2005).

Quanto ao método de fixação à fibra, o índigo blue é classificado como um corante à cuba, sendo necessária a sua redução química à forma leucoíndigo, uma vez que somente nesta forma é solúvel e possui alta afinidade pela fibra (Zanoni e Yamanaka, 2016). A Figura 3 mostra a estrutura molecular da forma leucoíndigo.

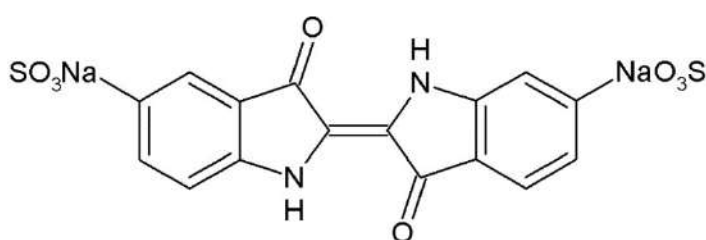
Figura 3 - Estrutura molecular do corante leucoíndigo.



Fonte: de Araujo *et al.*, 2020.

Uma variedade de corantes derivados do índigo pode ser obtida modificando-se os anéis aromáticos. Um exemplo é o índigo carmim que é obtido pela sulfonação do índigo. Este corante é empregado em indústrias alimentícias, de cosméticos e, assim como o índigo, também é utilizado pela indústria têxtil (Chowdhury *et al.*, 2020). A estrutura química do índigo carmim é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura molecular do corante índigo carmim.



Fonte: Zanoni e Yamanaka, 2016.

3.3 PROCESSO DE TINGIMENTO COM CORANTE ÍNDIGO

A etapa de tingimento tem como objetivo a coloração uniforme do tecido por meio da aplicação de corantes e auxiliares de tingimento. Segundo Alcântara e Daltin (1996), o processo de tingimento pode ser dividido em três fases: montagem, fixação e tratamento final.

Na montagem, ocorre a transferência do corante para a superfície da fibra por esgotamento ou impregnação. No processo de esgotamento, o tecido fica em contato com uma solução contendo o corante por um longo período, já no processo de impregnação, o corante entra em contato com a fibra por meio de uma força mecânica, em que o tecido é prensado por dois rolos após imersão na solução contendo o corante (Alcântara e Daltin, 1996).

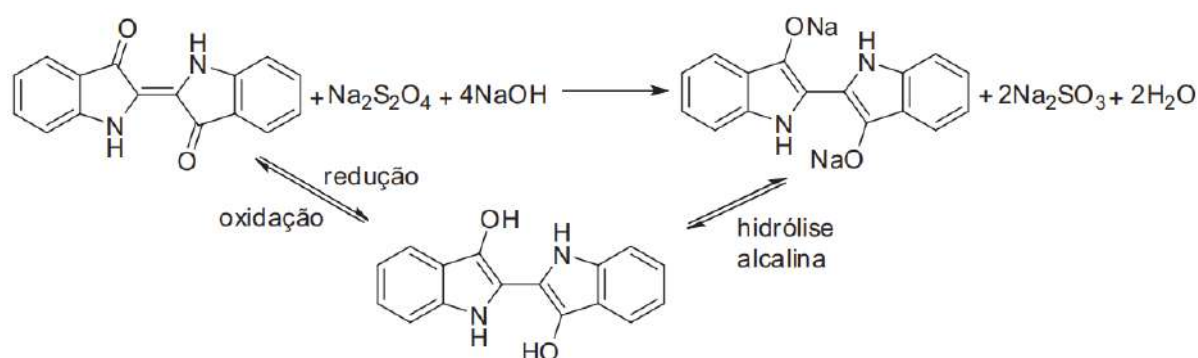
A etapa de fixação pode ocorrer pela reação entre o corante e o tecido, pela insolubilização do corante que era solúvel durante a montagem ou por impedimento físico, quando a fibra é alterada de um estado dilatado para um mais fechado (Alcântara e Daltin, 1996).

A última etapa é o tratamento final que consiste numa lavagem à quente com detergentes, seguido por enxágue para remover o excesso de corantes. Isto evita que o corante não fixado à fibra se solte quando o tecido fique umedecido novamente, seja pelo suor, durante o uso da roupa, ou pela lavagem, manchando outras peças (Alcântara e Daltin, 1996).

O grau de fixação é função de vários fatores como temperatura, pH, tempo e auxiliares de tingimento (Juliano e Pacheco, 2008). São exemplos de auxiliares de tingimento os umectantes, os antiespumantes, os ajustadores de pH, os sequestrantes, entre outros. Dentre esses auxiliares químicos, os tensoativos têm grande importância, pois são necessários para homogeneização de corantes insolúveis em água e para acelerar a umectação do tecido (Alcântara e Daltin, 1996).

O tingimento com índigo ocorre por meio da redução do corante à forma leucoíndigo por um agente redutor forte em meio alcalino, sendo o hidrossulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) o redutor mais utilizado no tingimento industrial. A redução se faz necessária para que o corante se torne solúvel em água, permitindo a adsorção e difusão do corante na fibra celulósica (Hossain et al., 2016). A Figura 5 apresenta as reações de redução e oxidação do índigo em meio alcalino.

Figura 5 - Reação de redução e oxidação do corante índigo.



Fonte: München et al., 2015.

O processamento de tingimento industrial com índigo consiste em mergulhar repetidamente a fibra celulósica em banhos contendo uma solução aquosa de corante na forma leucoíndigo, hidróxido de sódio e hidrossulfito de sódio (Hsu et al., 2018). Entre um banho e outro, é necessário expor a fibra ao oxigênio do ar para que ocorra a oxidação da forma

leucoíndigo que apresenta coloração amarelo esverdeada, regenerando a forma original do corante de coloração azul que se adere à fibra, esse processo é repetido até que se alcance a cor desejada (Hsu et al., 2018). A Figura 6 mostra o processo industrial de tingimento por impregnação do corante índigo.

Figura 6 - Processo de tingimento industrial com corante índigo.



Fonte: Silva, 2019.

Ao contrário da maioria dos corantes, o índigo não se liga covalentemente ao algodão, mas é fixado ao material por adesão física. O índigo adsorvido é resistente a detergentes usados na lavagem, mas se desprende com abrasão persistente expondo o núcleo branco do fio, produzindo a aparência desgastada característica da calça *jeans* (Hsu et al., 2018).

Métodos químicos que utilizam agentes oxidantes/redutores ou mecânicos que utilizam pedra-pomes são comumente empregados para a lavagem do *jeans*, mas outros métodos como o uso de laser e enzimas também são aplicados para obter o aspecto envelhecido da peça (Maryan et al., 2015). Esses processos implicam em problemas ambientais, pois grandes quantidades do corante são liberadas junto ao efluente, resultando em uma água altamente colorida.

3.4 IMPACTO AMBIENTAL E TOXICIDADE DO CORANTE ÍNDIGO

A etapa de tingimento contribui com um alto nível de contaminação do efluente têxtil, uma vez que grande parte do corante utilizado no banho não é retida pelo tecido (20-30%), de modo que a cor, o DBO e o DQO aumentam consideravelmente (Castillo-Suárez et al., 2023). Além disso, no tingimento com índigo, juntamente com o corante não fixado, altas concentrações de álcali e agente redutor são perdidas continuamente como efluentes

(Chowdhury et al., 2020). Assim, o corante não retido nesse processo é perdido durante a limpeza do tanque de tingimento após a preparação do banho e durante a drenagem do banho após a finalização do processo de tingimento (Javaid e Qazi, 2019).

Conforme discutido anteriormente, apesar do processo de lavagem do *jeans* ser responsável pelo aspecto envelhecido desejável da peça, essa remoção localizada do corante é outra etapa que contribui para a geração de um efluente altamente colorido, que tem efeitos deletérios no meio ambiente.

De acordo com Castillo-Suárez et al. (2023), os corantes sintéticos índigo blue e índigo carmim apresentam estabilidade química e fotolítica, o que dificulta sua remoção de águas residuais, sendo considerados, portanto, como compostos recalcitrantes.

Aproximadamente 280.000 toneladas de corantes por ano são transformadas em efluentes líquidos pela indústria têxtil em todo o mundo, e com apenas uma quantidade inferior a 1 mg/L, sua presença torna-se visível na água (Tkaczyk et al., 2020). A Figura 7 mostra o lançamento de efluente sem tratamento no Rio Capibaribe por uma lavanderia de *jeans* no município de Toritama em Pernambuco.

Figura 7 - Lançamento de efluente sem tratamento no rio Capibaribe por uma lavanderia de *jeans*.



Fonte: Cometti et al., 2016.

A contaminação de águas naturais por corantes pode aumentar a turbidez, o que reduz o processo de fotossíntese e a quantidade de oxigênio dissolvido na água, alterando o ecossistema aquático (Chowdhury et al., 2020). A diminuição da atividade fotossintética inibe o crescimento

das plantas aquáticas, e a redução de oxigênio disponível causa hipóxia nos peixes, comprometendo seu sistema imunológico tornando-os suscetíveis a várias doenças (Al-Tohamy, 2022).

Quanto à toxicidade, a descarga de águas residuais contendo corante índigo no meio ambiente pode causar irritação na pele e nos olhos, lesões na córnea e na conjuntiva, dermatite, irritação do trato respiratório e gastrointestinal e câncer em humanos com contato constante e prolongado, sendo considerado um poluente altamente tóxico (Castillo-Suárez et al., 2023).

Tkaczyk et al. (2020) destacam ainda a capacidade bioacumulativa dos corantes sintéticos. Estes compostos são acumulados progressivamente de um nível trófico para o outro, causando a biomagnificação, de forma que os seres do topo da cadeia trófica, como o ser humano, apresentam maiores concentrações do composto contaminante.

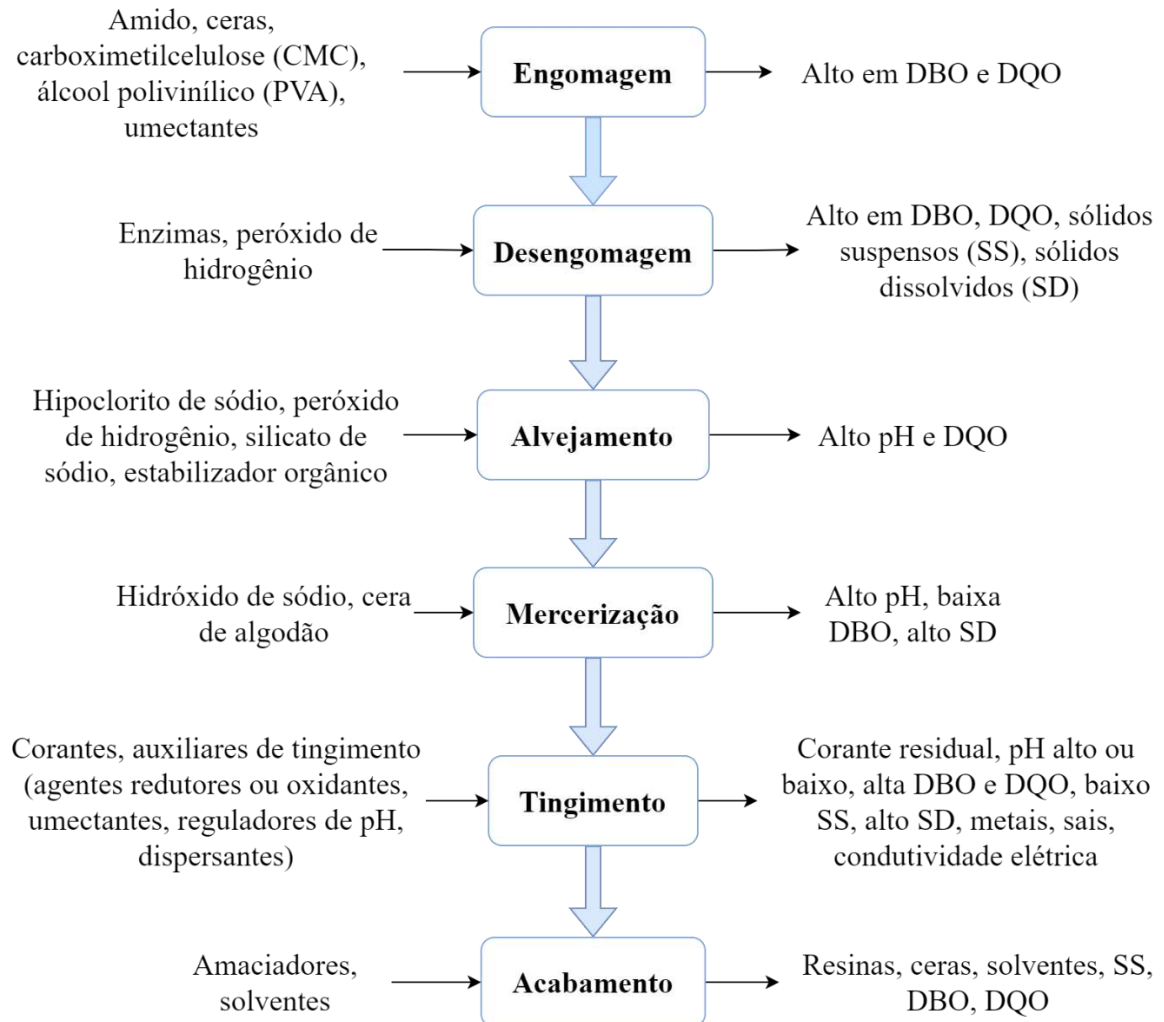
Desta forma, é evidente a urgência em implementar processos eficientes para a remoção do corante índigo de águas residuárias, em conformidade com as regulamentações ambientais vigentes, para mitigar a contaminação hídrica e os impactos negativos no ecossistema aquático, bem como os riscos à saúde humana, contribuindo para a sustentabilidade e a responsabilidade social das indústrias têxteis.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS TÊXTEIS

A caracterização do efluente têxtil se apresenta como um processo complexo, devido à grande variabilidade de sua composição, que depende da tecnologia e dos processos industriais empregados, do tipo de fibra e dos produtos químicos utilizados (FEAM, 2014).

A água é utilizada em praticamente todos os processos da etapa de beneficiamento, o que resulta em efluentes de composição variada (Ramos et al., 2020). A Figura 8 mostra um fluxograma do processo produtivo para tecidos de algodão com a composição do efluente gerado em cada processo do beneficiamento, bem como os produtos químicos empregados.

Figura 8 - Fluxograma do processo de beneficiamento na indústria têxtil e os efluentes gerados em cada etapa.



Fonte: Adaptado de Kabir et al., 2019; Bidu et al., 2021 e Holkar et al., 2016.

Segundo Yaseen e Scholz (2019), os efluentes têxteis apresentam características como coloração intensa, pH e temperatura elevados, alta DBO e DQO e grandes quantidades de sólidos suspensos, metais e sais, que precisam ser monitorados e comparados com os padrões estabelecidos pela legislação antes do descarte do efluente no corpo hídrico receptor.

A Tabela 4 apresenta as características físico-químicas típicas de efluentes industriais têxteis de acordo com diferentes autores.

Tabela 4 - Características físico-químicas típicas de efluentes têxteis.

Referência Parâmetro	Ghaly et al. (2014)	Kehinde e Aziz (2014)	Kalra et al. (2011)
Temperatura (°C)	35-45	21-62	35-45
pH	6-10	6,95-11,8	6-10
Cor (mg Pt-Co/L)	50-2.500	50-2.500	50-2.500
DQO (mg/L)	150-12.000	150-30.0000	150-10.000
DBO (mg/L)	80-6.000	80-6.000	100-4.000
Sólidos Totais (mg/L)	-	6.000-7.000	-
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	15-8.000	15-8.000	100-5.000
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	2.900-3.100	2.900-3.100	1.800-6.000

Fonte: Adaptado de Yaseen e Scholz, 2019.

Diante disto, a compreensão da composição dos efluentes têxteis é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficientes de tratamento e mitigação dos impactos ambientais.

3.6 TRATAMENTOS DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL

Devido aos danos ambientais que os corantes e outros produtos auxiliares utilizados no beneficiamento têxtil podem causar, os efluentes líquidos gerados pelas indústrias têxteis precisam ser tratados para reduzir a carga de contaminantes a níveis aceitáveis pela legislação ambiental, garantindo a qualidade dos corpos d'água receptores (FEAM, 2014). Desta forma, torna-se essencial a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias adequadas para o tratamento deste tipo de efluente.

Os tratamentos podem ser divididos em preliminares, primários, secundários e terciários (Von Sperling e Chernicharo, 2005).

A função do tratamento preliminar é remover os sólidos grosseiros em suspensão e preparar o efluente para o tratamento subsequente (Von Sperling e Chernicharo, 2005).

O tratamento primário é responsável pela remoção de sólidos sedimentáveis e uma parte da matéria orgânica (Von Sperling e Chernicharo, 2005). Assim, neste nível de tratamento, o efluente ainda possui um alto teor de matéria orgânica, sendo esta a razão pela qual é precursor dos tratamentos secundários (Beltrame, 2000).

O tratamento secundário visa a remoção da matéria orgânica por meio dos processos biológicos, em que os microrganismos convertem a matéria orgânica biodegradável do efluente em gases, material celular e outros componentes (Von Sperling e Chernicharo, 2005).

O tratamento terciário tem por objetivo remover poluentes específicos que geralmente são tóxicos ou não biodegradáveis como os corantes, ou remover poluentes que não foram suficientemente removidos pelos tratamentos anteriores (Von Sperling e Chernicharo, 2005). Este tipo de tratamento envolve tecnologias mais avançadas e de alto custo, razão pela qual ainda é pouco utilizado a nível industrial (Beltrame, 2000). A Tabela 5 apresenta um resumo dos processos de tratamento de efluentes líquidos.

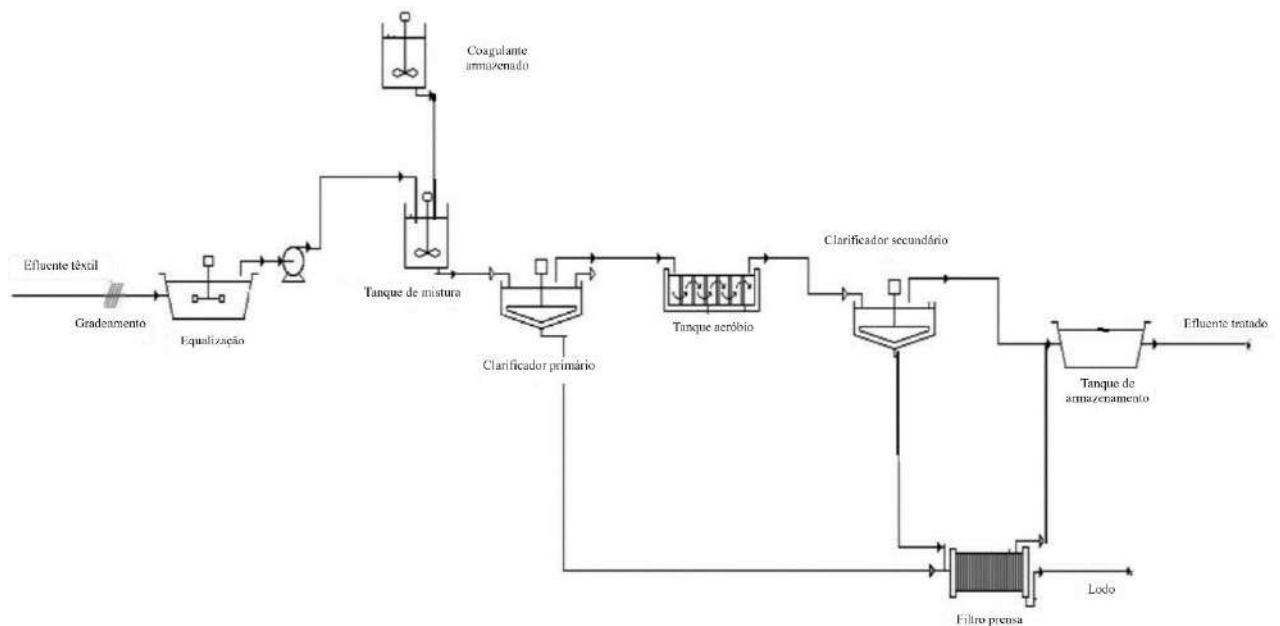
Tabela 5 - Processos de tratamento de efluentes líquidos.

Tratamento	Tipo de Processo	Operação Unitária
Preliminar	Físico	Gradeamento
		Equalização
	Químico	Neutralização
Primário	Físico	Clarificação
		Sedimentação
		Flotação
	Físico-químico	Coagulação
		Precipitação
Secundário	Físico	Sedimentação
		Lodos ativados
	Biológico	Lagoas de aeração
		Filtros biológicos
Terciário	Físico	Carvão ativado
		Ultrafiltração
		Osiose inversa
	Químico	Oxidação avançada

Fonte: Adaptado de Almeida, 2018.

O tratamento de águas residuárias contendo corantes não é trivial, pois estes possuem estruturas moleculares aromáticas complexas e alta estabilidade que dificultam sua degradação (Chowdhury et al., 2020). Assim, para melhorar a eficiência de remoção do corante é feita uma combinação de tratamentos para suprir as limitações de cada processo quando aplicado isoladamente. Em geral, na indústria têxtil os processos mais utilizados são os tratamentos físico-químicos de coagulação e precipitação, seguido por tratamento biológico via sistema de lodo ativado (Kunz et al., 2002). A Figura 9 mostra um fluxograma desta combinação de tratamentos.

Figura 9- Fluxograma do processo de tratamento combinado comumente empregado em indústrias têxteis.



Fonte: Bidu et al., 2021.

O esquema de tratamento apresentado na Figura 9 começa com a passagem do efluente industrial têxtil bruto por grades para a retirada de material sólido grosseiro como fiapos e trapos que podem causar obstruções e danos em equipamentos subsequentes (FEAM, 2014).

Ainda no tratamento preliminar, o efluente segue para a equalização onde ocorre a homogeneização da concentração e equalização da vazão do efluente (Bidu et al., 2021).

Após a padronização de suas características, o efluente está apto para o tratamento primário. Nesta etapa o efluente passa pelo processo de coagulação-floculação para a remoção de materiais suspensos que não se depositam naturalmente, ou seja, colóides que não são

afetados pela gravidade (Fortino, 2012). O coagulante é adicionado a um tanque de mistura para que ocorra sua dispersão no efluente e posterior aglomeração das partículas coaguladas, iniciando a formação de flocos (Nunes, 2001). Em seguida, o efluente é levado para o clarificador primário, no qual os flocos formados sedimentam no fundo do tanque, formando o lodo primário, que é removido para posterior tratamento.

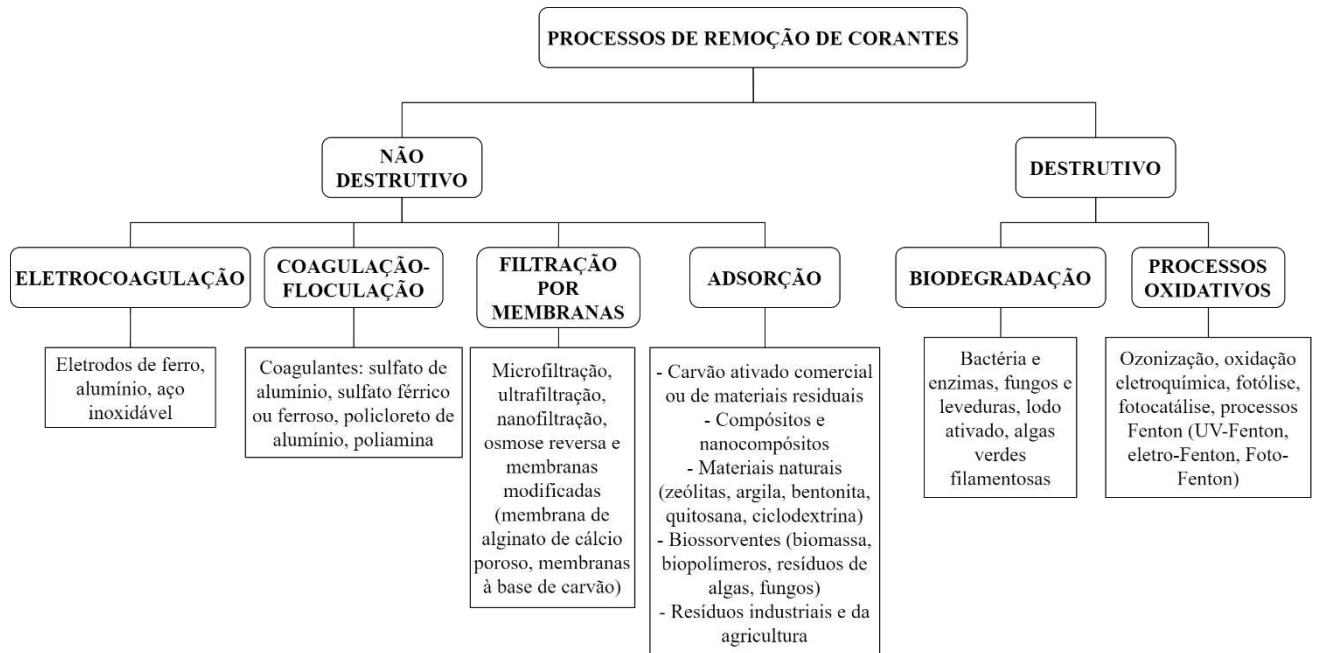
Concluída a etapa primária de tratamento, o efluente segue para o tratamento biológico em tanque aeróbio. Durante esse processo, uma massa ativa de microrganismos aeróbios (lodo ativado) fica em contato com a matéria orgânica do efluente em um tanque sob constante oxigenação que pode ser promovida por meio de aeração mecanizada ou por sistema de ar difuso (Beltrame, 2000). Os microrganismos presentes são mantidos no tanque por um período determinado, possibilitando que estabilizem a matéria orgânica e cresçam (Beltrame, 2000). Posteriormente, o efluente passa pelo clarificador secundário, onde o lodo biológico gerado sedimenta e é conduzido ao filtro prensa, enquanto o efluente tratado é armazenado temporariamente no tanque de armazenamento antes de seu descarte.

O lodo gerado nos clarificadores primário e secundário é encaminhado para o filtro prensa, onde a água é separada do lodo, resultando em um resíduo sólido colorido. Segundo Bidu et al. (2021), a principal desvantagem desse sistema é a formação de grande quantidade de lodo com alto teor de corantes, o que dificulta a possibilidade de reaproveitamento e ocasiona custos com a disposição.

Diante da dificuldade que a remoção de corantes do efluente têxtil apresenta, diversas pesquisas têm sido feitas com o intuito de encontrar processos alternativos que sejam economicamente e ecologicamente viáveis. Atualmente, há um interesse crescente em pesquisas focadas nos processos de adsorção, biodegradação, biossorção, coagulação, filtração por membrana e processos oxidativos (Piaskowski et al., 2018).

A Figura 10 resume os diferentes processos utilizados para remoção de corantes de efluentes têxteis.

Figura 10 - Fluxograma dos diversos processos utilizados para a remoção de corantes.



Fonte: Adaptado de Piaskowski et al., 2018 e Castillo-Suárez et al., 2023.

3.7 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA

Para que os efluentes industriais possam ser lançados em corpos d'água, é imprescindível que atendam aos padrões estabelecidos pela legislação. No Brasil, e mais especificamente no Rio de Janeiro, existem dois órgãos ambientais principais responsáveis pela regulação dos padrões dos efluentes a serem lançados: o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) e o INEA (Instituto Estadual do Ambiente), respectivamente.

O CONAMA é o órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA). Entre suas competências estão a definição de normas, critérios e padrões ambientais, a avaliação e aprovação de projetos de impacto ambiental, além do monitoramento, avaliação e garantia do cumprimento das normas ambientais (MMA, 2024).

A Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997, lista a indústria têxtil como um empreendimento que necessita de licenciamento ambiental devido ao seu significativo potencial de poluição e degradação ambiental (CONAMA, 1997). Desta forma, o efluente gerado por esta indústria deve estar em conformidade com as exigências impostas pela Resolução CONAMA nº 430, que é a legislação federal vigente. A Resolução nº 430, de 13 de

maio de 2011, determina as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos de água receptores, em que o lançamento direto destes efluentes só poderá ocorrer após o devido tratamento, e complementa a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 (CONAMA, 2011). As Tabelas 1 e 2 (Anexo A) dispõem algumas das condições e padrões impostos pela Resolução nº 430 ao lançamento de efluentes.

Embora a legislação brasileira não seja específica quanto aos limites máximos para o parâmetro de cor do efluente têxtil, a Resolução CONAMA nº 357 estabelece que, na ausência de padrões definidos, devem-se cumprir os padrões disponíveis para a classe em que os corpos d'água receptores se enquadram. Para corpos hídricos de água doce classes 2 e 3, o valor tolerável de cor é de até 75 mg Pt-Co/L e, em ambas as classificações, não é permitida a presença de corantes sintéticos que não sejam removíveis por processos de coagulação, sedimentação e filtração convencionais (CONAMA, 2005). Os corpos hídricos doces de classe 2 são aqueles destinados ao abastecimento humano após tratamento convencional, proteção de comunidades aquáticas, recreação de contato primário e irrigação de culturas variadas. Já os de classe 3 são destinados ao abastecimento humano após tratamento convencional ou avançado, irrigação de culturas arbóreas, pesca amadora, recreação de contato secundário e dessedentação de animais (CONAMA, 2005).

Em relação à toxicidade, a Resolução CONAMA nº 430 determina que o efluente não deverá causar ou ter potencial para causar efeitos tóxicos aos organismos aquáticos no corpo receptor, de acordo com os critérios de ecotoxicidade estabelecidos pelo órgão ambiental competente (CONAMA, 2011).

O INEA é o órgão responsável pela política ambiental no Estado do Rio de Janeiro, incluindo a regulamentação e o controle de efluentes industriais (ICMBio, 2024). Esse órgão estabelece a norma técnica NT-202, que dispõe os critérios e padrões para o lançamento de efluentes líquidos provenientes de atividades poluidoras (INEA, 1986), a diretriz DZ-205 que complementa a NT-202 ao fornecer exigências específicas para a carga orgânica em efluentes líquidos de origem industrial (INEA, 2007), e a norma operacional padrão NOP-08, que estabelece critérios e padrões de ecotoxicidade no lançamento de efluentes líquidos (INEA, 2018). Por se tratar de um órgão ambiental estadual, os padrões e diretrizes estabelecidos pelo INEA devem ser compatíveis ou mais rigorosos que os do CONAMA.

As Tabelas 1 e 2 (Anexo B) apresentam algumas das condições de remoção de carga orgânica biodegradável e não biodegradável estabelecidas pela DZ-205.

Diante disto, investir em tecnologias de tratamento de efluentes e aderir estritamente às regulamentações ambientais vigentes é essencial para garantir a sustentabilidade da indústria têxtil e a proteção dos recursos hídricos.

4 METODOLOGIA

Considerando os objetivos do trabalho que consistem em identificar e comparar os principais tratamentos para remoção do corante índigo, foi feita uma pesquisa bibliográfica em bases de dados científicas como *Scopus*, *ScienceDirect*, *SciElo* e *ResearchGate*, utilizando artigos científicos e de revisão referentes a este tema.

As palavras-chave utilizadas na busca incluíram, mas não se limitaram a: "*indigo wastewater treatment*"; "*indigo dye removal*"; "*indigo dye effluent treatment*"; "*textile wastewater treatment*"; *indigo dye* + nome do processo em inglês como em "*indigo dye coagulation*"; nome do processo em inglês + *cost* como em "*adsorption cost*".

Os dados foram extraídos dos estudos selecionados e organizados em uma tabela comparativa para resumir e facilitar a análise das informações encontradas. As informações coletadas incluíram as vantagens e desvantagens de cada processo, bem como a eficiência na remoção do corante índigo, custo do tratamento e capacidade de degradação do corante.

Uma breve descrição dos princípios de cada processo também foi realizada a partir de artigos científicos e livros-texto.

Os custos encontrados para cada processo de tratamento foram monetariamente corrigidos para o ano de 2024 por meio de calculadoras de inflação disponíveis *online*¹. Enquanto a conversão das moedas para o Real foi realizada por meio da ferramenta de conversão *online* oferecida pelo Banco Central do Brasil².

¹ US inflation calculator: find US dollar's value from 1913-2024. Disponível em: <https://www.usinflationcalculator.com/>. Acesso em: 24 jun. 2024.

Euro inflation calculator: EUR from 1997 to 2024. Disponível em: <https://www.in2013dollars.com/Euro-inflation>. Acesso em: 24 jun. 2024.

² BANCO CENTRAL DO BRASIL. Conversão de moedas. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/conversao>. Acesso em: 24 jun. 2024.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diversos estudos foram conduzidos para avaliar a eficácia de diferentes processos de tratamento para a remoção do corante índigo de efluentes têxteis. Castillo-Suárez et al. (2023) e Chowdhury et al. (2020) realizaram revisões abrangentes sobre os principais processos utilizados para essa finalidade. Segundo estes pesquisadores, os principais processos utilizados são os tratamentos biológicos que utilizam microrganismos (bactérias, fungos e algas) ou plantas para degradar corantes via metabolismo ou bioadsorção, o processo de adsorção, o processo de filtração por membranas, os processos de coagulação e eletrocoagulação e os processos oxidativos avançados.

Com base nestas informações, serão discutidos os diferentes tipos de tratamentos de forma a apresentar suas vantagens e desvantagens, eficácia, custo e capacidade de degradação do corante índigo, de modo a compreender quais processos são mais promissores.

5.1 Tratamentos biológicos

5.1.1 Bioadsorção

De acordo com Ribas e Silva (2022), a bioadsorção é um processo de remoção de poluentes orgânicos que consiste na adesão de poluentes na superfície de um material biológico (biossorbente), por meio de interações físicas e/ou reações químicas.

A bioadsorção oferece vantagens por ser um processo simples e rápido que não requer condições extremas de operação, possui baixo custo operacional quando biossorbentes de baixo custo são utilizados, e o biossorbente pode ser regenerado e reutilizado (Chojnacka, 2010). Porém, a vida útil dos biossorbentes é mais curta se comparada com adsorbentes convencionais e sua eficiência é fortemente influenciada pelo pH do meio (Chojnacka, 2010).

Rao et al. (2020) utilizaram folhas de *Grevillea robusta* como biossorbente para a remoção do corante índigo carmim de um efluente têxtil sintético. As folhas de *Grevillea robusta* foram coletadas, lavadas, secas ao sol e posteriormente em estufa a 100°C até a remoção completa da umidade. Em seguida, as folhas secas foram moídas e peneiradas para obter um pó fino, que foi acidificado com H₂SO₄ para aumentar a eficiência de remoção do corante. Os experimentos foram realizados sob agitação à temperatura ambiente. Após o tempo de contato, as soluções foram filtradas e a concentração residual do corante foi medida usando um espectrofotômetro. Condições ótimas de operação foram obtidas para um tempo de contato de 40 minutos, utilizando 8 g do biossorbente, com concentração inicial do corante de 20 mg/L,

pH 6 e temperatura de 313 K (~40 °C), resultando em uma remoção máxima de 98,61% do corante índigo.

5.1.2 Biodegradação

A biodegradação é o processo pelo qual microrganismos ou plantas convertem as moléculas químicas complexas de contaminantes em compostos mais simples, utilizando-as como fonte de carbono para obtenção da energia necessária ao seu crescimento e manutenção do metabolismo (Covi Júnior et al., 2019).

Wang et al. (2022) estudaram a capacidade dos esporos de *Bacillus safensis* HL3 para degradar e detoxificar um efluente sintético contendo 47 mg/L de corante índigo carmim. O experimento foi realizado utilizando os esporos da bactéria cultivados em um meio de cultura específico contendo Cu^{2+} para selecionar as cepas com atividade da enzima lacase. A suspensão de esporos, que apresentava atividade enzimática da lacase, foi preparada e incubada com o corante índigo carmim em um sistema de 3 mL a 40°C e 170 rpm por um determinado período, sendo monitorada a taxa de descoloração do corante. A descoloração foi testada na presença e na ausência do mediador acetosiringona. Os resultados mostraram que os esporos de *Bacillus safensis* HL3, com atividade da lacase, conseguiram descolorir 97% do índigo carmim em 2 horas na presença de acetosiringona, enquanto sem o mediador a descoloração foi de 32%. Os autores também concluíram que os produtos da biodegradação eram menos tóxicos do que o corante, o que torna o esporo de *Bacillus safensis* HL3 um candidato potencial para a biodegradação do corante índigo carmim em águas contaminadas.

Embora a biodegradação seja considerada uma técnica economicamente e ecologicamente vantajosa, o processo costuma ser lento, e alguns microrganismos necessitam que condições ótimas de processo sejam mantidas, assim como também podem requerer a adição de nutrientes ao efluente (Piaskowski, et al., 2018). Porém, é importante ressaltar que a biodegradação oferece a possibilidade de transformação dos poluentes em compostos menos tóxicos e de redução da quantidade total de contaminantes, ao invés de apenas transferi-los de um meio para outro, como ocorre na biossorção (Peralta, 2022).

5.2 Tratamentos físicos

5.2.1 Adsorção

A adsorção é um processo que envolve o contato de um fluido (líquido ou gasoso) com um sólido, denominado adsorvente, em que os componentes desse fluido ficam retidos na superfície do adsorvente (Wankat, 2012). Diversos materiais podem ser empregados como adsorventes, dos quais pode-se citar o carvão ativado, alumina ativada, argila bentonita e zeólitas (Castillo-Suárez et al., 2023).

Babu et al. (2019) investigaram a capacidade de adsorção da lama vermelha, um resíduo da indústria de alumínio, ativada com sulfato de hidrazina para a descoloração de um efluente sintético contendo 100 mg/L de corante índigo carmim. No experimento, a lama vermelha foi previamente lavada, seca, moída e tratada com sulfato de hidrazina para aumentar sua capacidade de adsorção. O processo de adsorção foi realizado em batelada com dosagem de adsorvente de 0,15 g/100 mL, ajuste do pH entre 2-12 e agitação a 300 rpm até atingir o equilíbrio, com posterior separação do adsorvente por filtração. O processo obteve a eficiência máxima de remoção de 94% em pH entre 3-4 após 80 min de agitação. Além disso, a lama vermelha mostrou-se reutilizável, mantendo mais de 80% de eficiência após cinco ciclos.

Este processo destaca-se pela alta eficiência na remoção de uma ampla gama de poluentes, é simples de operar sem necessidade de equipamentos complexos e possui uma grande variedade de materiais disponíveis que podem ser utilizados como adsorventes (Crini e Lichtfouse, 2019). No entanto, o processo não é seletivo e sua eficiência pode ser afetada pela presença de outras substâncias na água, que competem pelos mesmos sítios de adsorção. Além disso, alguns adsorventes, como o carvão ativado, são caros e sua regeneração também é custosa, ocorrendo perdas do material. Outro ponto a ser considerado é a necessidade de disposição final adequada dos adsorventes saturados (Crini e Lichtfouse, 2019).

5.2.2 Filtração por membranas

No processo de filtração por membrana, uma mistura composta por dois ou mais componentes é parcialmente separada por meio de uma barreira semipermeável (membrana), através da qual algumas substâncias se deslocam mais rapidamente do que outras (Seader et al., 2011). Dependendo do tamanho dos poros da membrana, esse processo pode ser dividido em microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração ou osmose inversa.

Segundo Crini e Lichtfouse (2019), o processo de filtração por membranas apresenta alta eficiência na remoção de contaminantes, sendo capaz de remover todos os tipos de corante. Além disso, é um processo simples que requer pouco espaço de instalação e não precisa da adição de agentes químicos. Porém, é importante considerar o alto investimento inicial e o custo

de manutenção devido ao acúmulo de materiais nos poros conforme o uso (Crini e Lichtfouse, 2019). Outras características desse processo são a operação sob alta pressão, que resulta em um elevado consumo de energia, e a geração de lodo concentrado (Piaskowski et al., 2018).

Buscio et al. (2015) utilizaram membranas de ultrafiltração em difluoreto de polivinilideno para tratar efluentes têxteis reais contendo corante índigo, visando a recuperação e reutilização do corante. Foram testadas quatro membranas de diferentes marcas e configurações (externa ou submersa) denotadas como U-1b, ZW-1, U-4 e FP-T. Três plantas piloto foram construídas: a planta piloto 1 foi equipada com a membrana U-1b e a planta piloto 2 foi equipada com a membrana ZW-1, ambas operaram com ciclos de 15 minutos de filtração e 30 segundos de retro lavagem, e trataram um efluente contendo 58 mg/L e 118 mg/L de corante índigo, respectivamente. Já a planta piloto 3 era um sistema semi-industrial que combinava as membranas U-4 e FP-T e tratava um efluente contendo 82 mg/L de corante índigo. A membrana U-4 operou em ciclos de 30 minutos de filtração e 30 segundos de retro lavagem, enquanto a membrana FP-T operou em ciclos de 15 minutos de filtração e 30 segundos de retro lavagem. A membrana U-1b alcançou 96% de remoção de corante e 40% de redução de DQO, concentrando o corante até 3 g/L. A ZW-1 obteve 99% de remoção de corante e 80% de redução de DQO, com concentração de 20 g/L do corante. O sistema semi-industrial combinou U-4 e FP-T, alcançando 98% de remoção de corante e 67% de redução de DQO, com concentração final de 20 g/L de corante. Por fim, o estudo concluiu que os tecidos tingidos com o corante recuperado apresentaram qualidade comparável ao tingimento com corante comercial, demonstrando a viabilidade do reúso do corante índigo recuperado.

5.3 Tratamentos físico-químicos

5.3.1 Coagulação

O processo de coagulação envolve a adição de um coagulante químico que desestabiliza as cargas negativas dos colóides presentes no efluente. Isso reduz o potencial repulsivo entre eles, permitindo que se aglutinem (Nunes, 2001). Os coagulantes mais comumente empregados na descoloração de águas residuárias são o sulfato de alumínio, cal, sulfato férrico ou ferroso e policloreto de alumínio (Piaskowski et al., 2018).

A coagulação é considerada uma metodologia simples e barata, apresenta boa eficiência na remoção de poluentes e possui uma ampla gama de coagulantes disponíveis. No entanto, esse processo requer o controle de parâmetros físico-químicos como o pH do efluente e também

está relacionado ao uso de coagulantes químicos não reutilizáveis, o que colabora para um aumento no volume da produção de lodo (Crini e Lichtfouse, 2019).

Mohammed Redha (2020) avaliou a eficácia do coagulante natural *Moringa oleifera* para remoção do corante índigo de um efluente têxtil real. O experimento foi conduzido em *jar test* ajustando-se os parâmetros de pH (2-4), dosagem do coagulante (4-8 mL) e tempo de sedimentação (10-30 min) para otimizar a remoção de turbidez e cor. As condições ótimas encontradas foram pH = 2, dosagem de coagulante = 4 mL e tempo de sedimentação = 21 min, as quais resultaram na redução de 81% de turbidez e de 77% de remoção de cor. Portanto, o pó das sementes de *Moringa oleifera* mostrou ser um coagulante eficaz e econômico, sendo uma alternativa viável e ecológica aos coagulantes químicos para tratamento de efluentes têxteis reais contendo o corante índigo.

5.3.2 Eletrocoagulação

A eletrocoagulação aplica uma corrente contínua entre eletrodos metálicos imersos no efluente, ocorrendo a dissolução gradual dos eletrodos, liberando íons metálicos. Em condições adequadas de pH, esses íons se combinam e formam diversas espécies coaguladas e hidróxidos metálicos que desestabilizam e agregam as partículas presentes no efluente ou que precipitam e adsorvem os contaminantes dissolvidos (Khandegar e Saroha, 2013). Ainda segundo os autores, os eletrodos mais utilizados são os de alumínio, ferro, aço inoxidável e grafite, pois são baratos, acessíveis, não tóxicos e muito eficazes.

Hendaoui et al. (2018) realizaram um estudo para otimizar o processo de eletrocoagulação contínua com eletrodos de ferro para o tratamento de efluente de tingimento com corante índigo proveniente de uma indústria. No estudo foram avaliados os efeitos do pH inicial, fluxo de entrada e voltagem aplicada. Ao final da pesquisa, a eficiência máxima foi obtida em pH 7,58, vazão de entrada de 1 L/min e voltagem de 101 V, possibilitando a remoção de 93,77% de cor e 92,07% de DQO, com custo de 1,013 US\$/m³ de efluente tratado. Ao considerar a remoção de condutividade e o custo, foram alcançadas remoções de 89,2% de cor, 76,1% de DQO e 29,76% de condutividade, em condições de pH 7,2, vazão de entrada de 1,1 L/min e voltagem de 66 V, com custo total de 0,527 US\$/m³ de efluente tratado.

A eletrocoagulação apresenta algumas vantagens em relação à coagulação convencional, como não requerer a adição de reagentes químicos, apresentar uma melhor capacidade de remoção de contaminantes e gerar menos lodo, o que reduz o custo de disposição final (Khandegar e Saroha, 2013). Porém esse processo necessita de um alto investimento

inicial de equipamento e custo de manutenção devido à troca periódica dos anodos de sacrifício. Além disso, pode ocorrer a passivação do anodo e a deposição de lodo nos eletrodos pode inibir o processo eletrolítico em operação contínua (Crini e Lichtfouse, 2019).

5.4 Tratamentos químicos: Processos oxidativos avançados

Os processos oxidativos avançados (POAs) se baseiam na geração de espécies reativas altamente oxidantes, em especial o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), que reagem com as moléculas orgânicas dos poluentes iniciando uma série de reações de degradação que podem resultar na formação de água e CO_2 (Fioreze et al., 2014).

No geral, o radical hidroxila é resultante de reações que envolvem a combinação de oxidantes, como o ozônio (O_3) e o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), com radiação ultravioleta (UV) ou visível, e catalisadores, como íons metálicos ou semicondutores (Fioreze et al., 2014).

Os POAs podem ser classificados em sistemas homogêneos e heterogêneos, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Sistemas homogêneos e heterogêneos de processos oxidativos avançados.

Processo	Homogêneo	Heterogêneo
Com irradiação	O_3/UV	Fotocatálise Heterogênea ($\text{TiO}_2/\text{O}_2/\text{UV}$)
	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$	
	$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$	
	Foto-Fenton	
Sem irradiação	$\text{O}_3/\text{HO}^\cdot$	$\text{O}_3/\text{catalisador}$
	$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$	
	Reativo de Fenton	

Fonte: Fioreze et al., 2014.

Gonçalves et al. (2020) utilizaram um compósito de magnetita/óxido de grafeno reduzido ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{OGR}$) para realizar a descoloração de um efluente sintético contendo 20 mg/L de corante índigo carmin pelo processo foto-Fenton. A fotocatalise foi realizada em um reator com lâmpada UV, onde 20 mg do compósito, em presença de H_2O_2 , descoloriram completamente o corante em 5 minutos de reação. O compósito também demonstrou fácil

recuperação por separação magnética e reutilização eficaz, mantendo a atividade catalítica no segundo ciclo de descoloração.

Os POAs destacam-se pela possibilidade de degradação completa dos poluentes, a eficiência em degradar substâncias recalcitrantes e tóxicas, e a maioria dos processos não geram lodo (Fioreze et al., 2014). Outra vantagem é que os processos operam em condições de temperatura e pressão ambiente (Araújo et al., 2016). Apesar disso, estes processos apresentam algumas limitações, como o fato de que nem todos os processos possuem viabilidade técnica e econômica dependendo da escala da operação; há formação de subprodutos de reação que podem ser mais tóxicos que a molécula original; apresentam restrições de aplicação quando a concentração de contaminantes é elevada (Fioreze et al., 2014). Outras limitações econômicas incluem o alto custo dos agentes oxidantes, o consumo de energia por alguns desses processos e o custo elevado da fonte de radiação UV (Araújo et al., 2016).

5.5 Análise comparativa dos processos de tratamento

Com o intuito de estimar uma faixa de eficiência para cada processo, levou-se em consideração os estudos comentados anteriormente em cada processo e os estudos apresentados nos artigos de revisão de Castillo-Suárez et al. (2023) e Chowdhury et al. (2020). Assim, foi elaborada a Tabela 7 com as eficiências encontradas por cada autor para cada um dos processos avaliados.

Tabela 7 - Eficiências dos processos de remoção do corante índigo segundo vários autores.

Biossorção				
Biossorvente	<i>Grevillea robusta</i> (planta)	<i>Terminalia catappa</i> (planta)		Chitosana e Chitosana/ β - Ciclodextrina (derivados da casca de crustáceos e do amido, respectivamente)
Eficiência de remoção do corante índigo	98,61%	64-73%	60,1%	98,7%
Tipo de efluente	Sintético	Sintético	Indústria têxtil	Sintético
Autores	Rao et al. (2020)	Hevira et al. (2020)		Kekes e Tzia (2020)

Continuação **Tabela 7 - Eficiências dos processos de remoção do corante índigo segundo vários autores.**

Biodegradação			
Microrganismo	Bactéria <i>Bacillus safensis</i> HL3 + mediador acetosiringona	<i>Diutina rugosa</i> (levedura)	<i>Aspergillus</i> H1T (fungo)
Eficiência de remoção do corante índigo	97%	99,9%	96%
Tipo de efluente	Sintético	Sintético	Sintético
Autores	Wang et al. (2022)	Bankole et al. (2017)	Valdez-Vazquez et al. (2020)
Adsorção			
Adsorvente	Lama vermelha residual da indústria de alumínio	Carvão ativado derivado de pecíolo de tamareira	Hidróxido de cálcio
Eficiência de remoção do corante índigo	94%	76,5%	97,3%
Tipo de efluente	Sintético	Sintético	Sintético
Autores	Babu et al. (2019)	Khadhri et al. (2019)	Ramesh et al. (2017)
Filtração por membranas			
Membrana	Membrana de difluoreto de polivinilideno (ultrafiltração)	Membrana de polietersulfona (nanofiltração)	Membrana de poli (ácido acrílico)/SiO ₂ (nanofiltração)
Eficiência de remoção do corante índigo	96%-99%	94,9%	98%
Tipo de efluente	Indústria têxtil	Sintético	Sintético
Autores	Buscio et al. (2015)	Thong et al. (2018)	Xu et al. (2012)

Continuação **Tabela 7 - Eficiências dos processos de remoção do corante índigo segundo vários autores.**

Coagulação			
Coagulante	<i>Moringa oleifera</i>	Mg ²⁺ presente na salmoura residual	
Eficiência de remoção do corante índigo	77%	80%	
Tipo de efluente	Indústria têxtil	Indústria têxtil	
Autores	Mohammed Redha (2020)	Albuquerque et al. (2013)	
Eletrocoagulação			
Eletrodos	Fe-Fe	Al-Fe	Fe-Aço inoxidável
Eficiência de remoção do corante índigo	89,2%-93,77%	90,3%-94,9%	97,8%
Tipo de efluente	Indústria têxtil	Indústria têxtil	Indústria têxtil
Autores	Hendaoui et al. (2018)	Bener et al. (2019)	Kahraman e Şimşek (2020)
Processos Oxidativos Avançados			
Processo	Foto-Fenton (Fe ₃ O ₄ /OGR)	Fotocatalítico (AgIO ₄ /ZnO nanopartículas)	Eletro-oxidação (TiO ₂ -Grafite)
Eficiência de remoção do corante índigo	100%	98%	92,9%
Tipo de efluente	Sintético	Sintético	Sintético
Autores	Gonçalves et al. (2020)	Abdel-Aziz et al. (2020)	Bakaraki Turan et al. (2021)

Para garantir que os custos analisados refletissem adequadamente as condições econômicas atuais e fossem comparáveis em uma mesma moeda, realizou-se a correção monetária dos custos de tratamentos encontrados em diferentes anos para o ano de 2024 e, posteriormente, fez-se a conversão das moedas para o Real. No caso dos processos oxidativos, foi necessário converter 1.000 galões para m^3 para que todas as unidades fossem equivalentes a nível de comparação. Desta forma, multiplicou-se os valores encontrados de US\$65/1.000 galões e US\$1.187,477/1.000 galões por $(1.000 \text{ galões}/3,78541 \text{ m}^3)$, já que 1.000 galões equivalem a $3,78541 \text{ m}^3$. A Tabela 8 resume os valores de cada tratamento obtidos pelos autores com as respectivas correções e conversões monetárias.

Tabela 8 - Custo para diferentes processos de tratamento.

Processo	Custo	Ano	Correção monetária para 2024	Conversão para o Real	Autores
Biossorção	0,13 US\$/ m^3	2023	0,13 US\$/ m^3	0,70 R\$/ m^3	Tabaraki et al. (2023)
Biodegradação	1,2 €/ m^3	2014	1,53 €/ m^3	8,86 R\$/ m^3	Rodrigues et al. (2014)
Adsorção	0,18–0,2 US\$/ m^3	2021	0,21-0,23 US\$/ m^3	1,13-1,24 R\$/ m^3	Elbastamy et al. (2021)
Filtração por membrana	1-6 US\$/ m^3	2014	1,33-7,96 US\$/ m^3	7,18-42,98 R\$/ m^3	Samhaber e Nguyen (2014)
Coagulação	0,17 €/ m^3	2024	-	0,98 R\$/ m^3	Arous et al. (2024)
Eletrocoagulação	0,527-1,013 US\$/ m^3	2018	0,66-1,01 US\$/ m^3	3,56-5,45 R\$/ m^3	Hendaoui et al. (2018)
Processos Oxidativos Avançados	17-313,7 US\$/ m^3	2010	25-452 US\$/ m^3	92-2.505 R\$/ m^3	Mahamuni e Adewuyi (2010)

A grande variação de custo para os processos oxidativos se deve a fatores como consumo de energia, custos de equipamentos e reagentes químicos e custos de manutenção e operação. Equipamentos como ultrassom, lâmpadas UV e gerador de ozônio possuem diferentes preços e consumo elétrico. Além disso, alguns processos requerem o uso de reagentes oxidantes como H_2O_2 ou catalisadores como o TiO_2 , que aumentam os custos operacionais. A manutenção dos equipamentos inclui o gasto com a troca de lâmpadas em sistemas UV, peças de geradores de ozônio para sistemas que utilizam ozônio, substituição do catalisador para sistemas catalíticos e substituição de componentes eletrônicos para sistemas de ultrassom.

Após o levantamento das características de cada processo estudado, é possível fazer uma análise comparativa dos resultados obtidos. A Tabela 9 resume os parâmetros que serão avaliados em cada processo.

Tabela 9 - Avaliação dos processos de remoção do corante índigo.

Tipo de tratamento	Processo	Eficiência de remoção do corante	Custo	Vantagens	Desvantagens	Degradação do corante
Biológico	Biossorção	60,1%-98,7%	0,70 R\$/m ³	Processo simples e rápido, biossorvente pode ser regenerado e reutilizado	Vida útil curta do biossorvente e eficiência depende do pH do meio	Não destrutivo
	Biodegradação	96%-99,9%	8,86 R\$/m ³	Processo ecologicamente positivo	Processo lento, requer manutenção das condições ótimas do meio e adição de nutrientes	Parcial ou completa
Físico	Adsorção	76,5%-97,3%	1,13-1,24 R\$/m ³	Processo simples e com ampla variedade de adsorventes disponíveis	Adsorvente não é seletivo e alguns podem ser custosos, a eficiência é afetada por outras substâncias presentes	Não destrutivo
	Filtração por membranas	94,9%-99%	7,18-42,98 R\$/m ³	Processo simples, sem adição de agentes químicos, remove todos os tipos de corantes e permite o reúso do corante	Elevado consumo de energia (opera em alta pressão) e requer manutenção devido ao entupimento dos poros	Não destrutivo

Continuação Tabela 9 - Avaliação dos processos de remoção do corante índigo.

Tipo de tratamento	Processo	Eficiência de remoção do corante	Custo	Vantagens	Desvantagens	Degradação do corante
Físico-químico	Coagulação	77%-80%	0,98 R\$/m ³	Processo simples e com ampla variedade de coagulantes disponíveis	Requer o controle de parâmetros físico-químicos do efluente e o uso de coagulantes químicos aumenta o volume de lodo gerado	Não destrutivo
	Eletrocoagulação	89,2%-97,8%	3,56-5,45 R\$/m ³	Sem adição de reagentes químicos e menor produção de lodo	Requer troca periódica dos anodos de sacrifício, a passivação do anodo e a deposição de lodo nos eletrodos interfere na eficiência	Não destrutivo
Químico	Processos oxidativos avançados	92,9%-100%	92-2.505 R\$/m ³	Alta capacidade de degradação de substâncias recalcitrantes e tóxicas, operam em condições ambientes de temperatura e pressão	Viabilidade técnica e econômica depende da escala de operação, formação de subprodutos de reação, agentes oxidantes custosos e consumo de energia por alguns processos	Completa

Com relação aos estudos analisados, os processos apresentaram boas eficiências de remoção do corante índigo. Processos como biodegradação, filtração por membranas e processos oxidativos obtiveram as melhores faixas de eficiência, sendo capazes de remover mais de 92% do corante. Enquanto a coagulação obteve a menor faixa de eficiência, atingindo no máximo 80% de descoloração do efluente.

Do ponto de vista econômico, os processos de biossorção, coagulação e adsorção se destacam pelo menor custo. Esses processos possuem operação relativamente simples e utilizam insumos mais baratos. No entanto, deve-se considerar que o uso de adsorventes comerciais, como o carvão ativado e o gasto com seu processo de regeneração, torna o processo de adsorção mais custoso.

Em contrapartida, os processos oxidativos e de filtração por membrana possuem custo elevado, que está associado à manutenção dos processos, ao consumo energético das operações e ao custo da própria membrana e, no caso dos processos oxidativos, dos agentes oxidantes. Apesar da eletrocoagulação também exigir manutenção pela necessidade de troca dos anodos, os eletrodos possuem valores mais acessíveis, o que colabora para que esta técnica apresente um menor custo relativo a estes tratamentos.

Os processos oxidativos e a biodegradação são processos que não apenas removem, mas também são capazes de degradar completamente o corante ou transformá-lo em substâncias menos tóxicas. Porém, processos não destrutivos como biossorção, adsorção, filtração por membranas, coagulação e eletrocoagulação, apenas removem o corante do efluente, gerando lodo que precisa ser tratado e disposto adequadamente para evitar contaminação ambiental, o que também gera custos adicionais. No entanto, deve-se salientar que a biodegradação parcial do corante gera uma biomassa contaminada que também necessita de tratamento para ser descartada, enquanto a filtração por membranas oferece a possibilidade de recuperação do corante para o reúso no processo de tingimento.

Os processos que se mostraram altamente eficientes, como os oxidativos e a filtração por membranas, são particularmente interessantes quando se deseja reutilizar a água do efluente no processo industrial. A biodegradação, embora também tenha apresentado alta eficiência nos estudos mencionados, depende significativamente das condições ideais do meio e as eficiências obtidas pelos autores se referem a experimentos com efluente sintético, ou seja, existe a possibilidade de que a presença de auxiliares químicos em efluentes reais possa comprometer a eficiência desse processo.

Se o objetivo for utilizar um tratamento complementar mais econômico para a descoloração do efluente, os processos de biossorção, coagulação e adsorção com uso de

adsorventes alternativos aos comerciais como zeólitas e argilas ou resíduos agrícolas e industriais, são os mais indicados.

Dada a possibilidade de reúso do corante no processo de tingimento, a filtração por membranas pode ser uma abordagem mais adequada do ponto de vista sustentável, principalmente se a geração de energia para seu funcionamento for por meio de fontes renováveis como energia solar ou eólica.

É necessário ressaltar que a grande variabilidade da composição do efluente têxtil e a complexa estrutura aromática e estabilidade do corante índigo dificultam o tratamento desse efluente por um único processo. Logo, a utilização de dois ou mais processos combinados permite o aproveitamento das vantagens individuais de cada processo e a mitigação de suas limitações, possibilitando a melhoria da eficiência geral do tratamento e a redução dos custos. A Tabela 10 apresenta alguns exemplos de combinação de processos sugeridos por diferentes autores.

Tabela 10 - Processos combinados.

Combinação de processos	Autores
Biodegradação + Nanofiltração	Rendón-Castrillón <i>et al.</i> (2023)
Eletrocoagulação + Eletro-oxidação	Asfaha <i>et al.</i> (2021)
Adsorção + Ultrafiltração	Mahzoura <i>et al.</i> (2019)

Apesar dos resultados apresentados, é importante reconhecer algumas limitações que podem impactar a interpretação e a aplicabilidade dos processos de tratamento. A variabilidade das condições experimentais nos estudos apresentados dificulta a comparação direta entre os processos, pois enquanto alguns estudos utilizaram efluentes industriais reais, outros sintetizaram o efluente em laboratório, logo a presença de outros compostos além do corante índigo podem interferir na eficácia dos processos. Além disso, os resultados são baseados em escala laboratorial, apresentando desafios na escalabilidade para operações industriais.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou diversos processos de tratamento para a remoção do corante índigo de efluentes industriais têxteis, considerando a eficiência, o custo e a capacidade de degradação do corante.

A análise comparativa dos resultados obtidos revela que, embora muitos processos apresentem alta eficiência na remoção do corante índigo, cada um possui vantagens e desvantagens que devem ser cuidadosamente ponderadas.

Dentre os processos avaliados, aqueles que se destacaram pela elevada eficiência foram os processos oxidativos avançados, a filtração por membranas e a biodegradação.

Os processos de tratamento com menor custo, como bioadsorção, coagulação e adsorção, são atrativos para indústrias que buscam soluções mais econômicas. No entanto, processos que se mostraram altamente eficientes, como os oxidativos e de filtração por membranas, embora mais onerosos, são indicados para casos em que a reutilização da água é necessária, oferecendo uma qualidade de tratamento superior.

Os processos oxidativos e a biodegradação são capazes de degradar completamente o corante ou transformá-lo em substâncias menos tóxicas, porém a biodegradação parcial do corante gera uma biomassa contaminada que precisa de tratamento. Os processos não destrutivos, como bioadsorção, adsorção, filtração por membranas, coagulação e eletrocoagulação, apenas removem o corante, gerando lodo que precisa ser tratado adequadamente. No entanto, a filtração por membranas oferece a vantagem de permitir a recuperação do corante para reúso e, se a energia utilizada no processo for proveniente de fontes renováveis, torna-se uma solução mais sustentável.

Dada a complexidade do tratamento de efluentes têxteis e a recalcitrância do corante índigo, diversos estudos apontam a combinação de processos de tratamento como uma solução promissora, proporcionando uma melhoria na eficiência geral do tratamento e redução de custos.

Estudos futuros poderiam focar na utilização de amostras de efluentes têxteis reais, ao invés de efluente sintético, para testar a viabilidade dos processos quando outras substâncias químicas além do corante índigo estão presentes no meio. Além disso, pesquisas sobre a escalabilidade dos processos em ambientes industriais reais também seriam necessárias para validar os resultados laboratoriais.

7 REFERÊNCIAS

- ABDEL-AZIZ, R.; AHMED, M. A.; ABDEL-MESSIH, M. F. A novel UV and visible light driven photocatalyst AgIO₄/ZnO nanoparticles with highly enhanced photocatalytic performance for removal of rhodamine B and indigo carmine dyes. **Journal of photochemistry and photobiology. A, Chemistry**, v. 389, n. 112245, p. 112245, 2020.
- ALBUQUERQUE, L. F. et al. Coagulation of indigo blue present in dyeing wastewater using a residual bittern. **Separation and purification technology**, v. 104, p. 246–249, 2013.
- ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. A química do processamento têxtil. **Química Nova**, v. 19, n. 3, p. 320–330, 1996.
- ALMEIDA, A. P. **Descoloração de corantes têxteis por *Phanerochaete chrysosporium* por sistema submerso**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.
- AL-TOHAMY, R. et al. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 231, n. 113160, p. 113160, 2022.
- ALVES, P. A. **Tratamento eletroquímico e eletroquímico foto-assistido na degradação de efluentes da indústria têxtil**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.
- ARAUJO, H. N.; ISQUIBOLA, G.; RODRIGUES, E. C. **Estudo da degradação do corante índigo blue por meio de diferentes processos oxidativos avançados**. Sinergia, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 133-136, 2020.
- ARAÚJO, K. S. et al. Advanced oxidation processes: a review regarding the fundamentals and applications in wastewater treatment and industrial wastewater. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, n. 2, p. 387, 15 abr. 2016.
- AROUS, F. et al. Performance and cost–benefit analyses of an integrated process for advanced treatment of highly saline textile wastewater at a semi-industrial scale. **Euro-Mediterranean journal for environmental integration**, v. 9, n. 2, p. 605–620, 2024.
- ASFAHA, Y. G.; TEKILE, A. K.; ZEWGE, F. Hybrid process of electrocoagulation and electrooxidation system for wastewater treatment: A review. **Cleaner engineering and technology**, v. 4, n. 100261, p. 100261, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÕES. **Perfil do Setor**. ABIT, 2023. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- BABU, A. N. et al. Removal of hazardous indigo carmine dye from wastewater using treated Red Mud. **Materials today: proceedings**, v. 17, p. 198–208, 2019.

BAKARAKI TURAN, N. et al. Highlighting the cathodic contribution of an electrooxidation post-treatment study on decolorization of textile wastewater effluent pre-treated with a lab-scale moving bed-membrane bioreactor. **Environmental science and pollution research international**, v. 28, n. 20, p. 25972–25983, 2021.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Conversão de moedas. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/conversao>>. Acesso em: 24 jun. 2024.

BANKOLE, P. O. et al. Degradation of indigo dye by a newly isolated yeast, *Diutina rugosa* from dye wastewater polluted soil. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 5, n. 5, p. 4639–4648, 2017.

BELTRAME, Leocádia Terezinha Cordeiro. **Sistemas microemulsionados aplicados à remoção da cor de efluente têxtil.** 2006. 216 f. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.

BENER, S. et al. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. **Process safety and environmental protection: transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B**, v. 129, p. 47–54, 2019.

BIDU, J. M. et al. Current status of textile wastewater management practices and effluent characteristics in Tanzania. **Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 83, n. 10, p. 2363–2376, 2021.

BUSCIO, V.; CRESPI, M.; GUTIÉRREZ-BOUZÁN, C. Sustainable dyeing of denim using indigo dye recovered with polyvinylidene difluoride ultrafiltration membranes. **Journal of cleaner production**, v. 91, p. 201–207, 2015.

CASTILLO-SUÁREZ, L. A. et al. A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes. **International journal of environmental science and technology: IJEST**, v. 20, n. 9, p. 10553–10590, 2023.

CERVANTES, T. N. M.; ZAIA, D. A. M.; SANTANA, H. DE. Estudo da fotocatalise heterogênea sobre Ti/TiO₂ na descoloração de corantes sintéticos. **Química Nova**, v. 32, n. 9, 2009.

CHOJNACKA, K. Biosorption and bioaccumulation – the prospects for practical applications. **Environment international**, v. 36, n. 3, p. 299–307, 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **O setor têxtil e de confecção e os desafios da sustentabilidade.** Confederação Nacional da Indústria, Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção – Brasília: CNI, 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997.** Dispõe sobre o licenciamento ambiental de atividades poluidoras ou potencialmente poluidoras. Brasília, DF, 19 dez. 1997.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (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. Brasília, DF, 17 mar. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, DF, 16 maio 2011.

COMETTI, J. L. S. et al. **Diagnóstico ambiental comparativo entre 2014 e 2015 das indústrias têxteis (lavanderia de jeans) do município de Toritama-PE**. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/II-024.pdf>>. Acesso em: 9 maio 2024.

CRINI, G.; LICHTFOUSE, E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. **Environmental chemistry letters**, v. 17, n. 1, p. 145–155, 2019.

DREW, D.; YEHOUME, G. The Apparel Industry's Environmental Impact in 6 Graphics. **World Resources Institute**, 2017. Disponível em: <<https://www.wri.org/insights/apparel-industrys-environmental-impact-6-graphics>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

ELBASTAMY, E. et al. Efficiency of natural clay mineral adsorbent filtration systems in wastewater treatment for potential irrigation purposes. **Sustainability**, v. 13, n. 10, p. 5738, 2021.

Euro inflation calculator: EUR from 1997 to 2024. Disponível em: <<https://www.in2013dollars.com/Euro-inflation>>. Acesso em: 24 jun. 2024.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE GOIÁS. **Dados Econômicos Indústria da Moda**. FIEG, 2020. Disponível em: <https://fieg.com.br/repositoriosites/repositorio/portalfieg/download/Pesquisas/Dados_economicos__Industria_da_Moda.pdf>. Acesso em: 6 dez. 2023.

FIGLIAREZZA, M.; SANTOS, E. P.; SCHMACHTENBERG, N. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, 2014.

FORTINO, P. **Pós-tratamento de efluente têxtil usando coagulação/floculação combinado com processos de separação por membranas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. Belo Horizonte: FEAM, 2014. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_textil.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2024.

GONÇALVES, A. H. A. et al. Synthesis of a magnetic Fe₃O₄/RGO composite for the rapid photo-Fenton discoloration of indigo carmine dye. **Topics in catalysis**, v. 63, n. 11–14, p. 1017–1029, 2020.

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

HENDAOU, K. et al. Real indigo dyeing effluent decontamination using continuous electrocoagulation cell: Study and optimization using Response Surface Methodology. **Process safety and environmental protection: transactions of the Institution of Chemical Engineers**, Part B, v. 116, p. 578–589, 2018.

HEVIRA, L. et al. Biosorption of indigo carmine from aqueous solution by Terminalia Catappa shell. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 8, n. 5, p. 104290, 2020.

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. D.; KHAN, M. M. R.; UDDIN, M. Z. Fastness properties and color analysis of natural indigo dye and compatibility study of different natural reducing agents. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 25, n. 4, p. 1219–1230, 2017.

HSU, Tammy M; WELNER, Ditte H; RUSS, Zachary N.; CERVANTES, Bernardo; PRATHURI, Ramya L.; ADAMS, Paul D.; DUEBER, John E. Employing a biochemical protecting group for a sustainable indigo dyeing strategy. **Nature Chemical Biology**, v. 14, n. 3, p. 256-261, 2018

HUNGER, K. **Industrial Dyes - Chemistry, Properties, Applications**. Weinheim: Wiley - VCH. 653, 2003.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Qual a diferença entre Ibama, ICMBio e Inea?** Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cairucu/quem-somos/perguntas-frequentes/com-phocagallery-imagerating/73-qual-a-diferenca-entre-ibama-e-icmbio.html>>. Acesso em: 7 jun. 2024.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Norma Operacional Padrão NOP-08**. Estabelece os critérios e padrões de ecotoxicidade no lançamento de efluentes líquidos. Rio de Janeiro, 2018.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Norma Técnica NT-202.R-10**. Estabelece os critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos. Rio de Janeiro, 1986.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Diretriz DZ-205.R-6**. Diretriz de controle de carga orgânica em efluentes líquidos de origem industrial. Rio de Janeiro, 2007.

JAVAID, R.; QAZI, U. Y. Catalytic oxidation process for the degradation of synthetic dyes: An overview. **International journal of environmental research and public health**, v. 16, n. 11, p. 2066, 2019.

JULIANO, L. N.; PACHECO, S. M. V. **Apostila de Estamparia e Beneficiamento Têxtil**. Araranguá: CEFET-SC, Unidade Araranguá, 2008. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/3/30/Apostila_Estamparia_edicao_1_revisada.pdf>. Acesso em: 2 maio 2024.

COVI JÚNIOR, M. A. et al. Advances in the treatment of textile effluents: A review. **OAlib**, v. 06, n. 07, p. 1–13, 2019.

KABIR, S. M. F. et al. Sustainability assessment of cotton-based textile wet processing. **Clean technologies**, v. 1, n. 1, p. 232–246, 2019.

KHANDEGAR, V.; SAROHA, A. K. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. **Journal of environmental management**, v. 128, p. 949–963, 2013.

KAHRAMAN, Ö.; ŞİMŞEK, İ. Color removal from denim production facility wastewater by electrochemical treatment process and optimization with regression method. **Journal of cleaner production**, v. 267, n. 122168, p. 122168, 2020.

KEKES, T.; TZIA, C. Adsorption of indigo carmine on functional chitosan and β -cyclodextrin/chitosan beads: Equilibrium, kinetics and mechanism studies. **Journal of environmental management**, v. 262, n. 110372, p. 110372, 2020.

KHADHRI, N. et al. Batch and continuous column adsorption of indigo carmine onto activated carbon derived from date palm petiole. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 7, n. 1, p. 102775, 2019.

KUNZ, A. et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química nova**, v. 25, n. 1, p. 78–82, 2002.

MAHAMUNI, N. N.; ADEWUYI, Y. G. Advanced oxidation processes (AOPs) involving ultrasound for wastewater treatment: A review with emphasis on cost estimation. **Ultrasonics sonochemistry**, v. 17, n. 6, p. 990–1003, 2010.

MAHZOURA, M. et al. Comparative investigation of indigo blue dye removal efficiency of activated carbon and natural clay in adsorption/ultrafiltration system. **Desalination and Water Treatment**, v. 164, p. 326–338, 2019.

MARYAN, A. S.; MONTAZER, M.; DAMERCHELY, R. Discoloration of denim garment with color free effluent using montmorillonite based nano clay and enzymes: nano bio-treatment on denim garment. **Journal of cleaner production**, v. 91, p. 208–215, 2015.

MENDES JÚNIOR, Biágio de Oliveira. **Setor têxtil**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 2, n.16, set. 2017. (Caderno Setorial Etene)

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **O que é o CONAMA?** Disponível em:< <http://conama.mma.gov.br/o-que-e-o-conama>>. Acesso em: 07 jun. 2024.

MOHAMMED REDHA, Z. Multi-response optimization of the coagulation process of real textile wastewater using a natural coagulant. **Arab journal of basic and applied sciences**, v. 27, n. 1, p. 406–422, 2020.

MÜNCHEN, S. et al. Jeans: a relação entre aspectos científicos, tecnológicos e sociais para o Ensino de Química. **Química Nova na Escola**, v. 37, n. 3, 2015.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 3. ed. Aracaju: Gráfica e Editora Triunfo Ltda, 2001.

OZTURK, E. et al. A chemical substitution study for a wet processing textile mill in Turkey. **Journal of cleaner production**, v. 17, n. 2, p. 239–247, 2009.

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, n. 5, p. 766–772, 2005.

PERALTA, R. M. **Biodegradação e biorremediação (ênfase em bactérias e fungos)**. Canoas: Mérida Publishers, 2022. 512 p.

PIASKOWSKI, K.; ŚWIDERSKA-DĄBROWSKA, R.; ZARZYCKI, P. K. Dye removal from water and wastewater using various physical, chemical, and biological processes. **Journal of AOAC International**, v. 101, n. 5, p. 1371–1384, 2018.

RAMESH, T. N. et al. Calcium hydroxide as low cost adsorbent for the effective removal of indigo carmine dye in water. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 21, n. 2, p. 165–171, 2017.

RAMOS, M. D. N. et al. Critical analysis of the characteristics of industrial effluents from the textile sector in Brazil. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 1001–1016, 2020.

RAO, P. V. et al. Removal of indigo carmine dye from aqueous solution by adsorption on biomass of *Grevillea Robusta* leaves. **Materials today: proceedings**, v. 26, p. 3020–3023, 2020.

RENDÓN-CASTRILLÓN, L. et al. Treatment of water from the textile industry contaminated with indigo dye: A hybrid approach combining bioremediation and nanofiltration for sustainable reuse. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 8, n. 100498, p. 100498, 2023.

RIBAS, F. B. T.; SILVA, W. L. DA. Biossorção: uma revisão sobre métodos alternativos promissores no tratamento de águas residuais. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 2, p. e13212, 2022.

RODRIGUES, C. S. D.; MADEIRA, L. M.; BOAVENTURA, R. A. R. Synthetic textile dyeing wastewater treatment by integration of advanced oxidation and biological processes – Performance analysis with costs reduction. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 2, n. 2, p. 1027–1039, 2014.

SAIKHAO, L. et al. Study of electrochemical properties of compared indigo for metal–semiconductor–metal diode. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 12, n. 22, p. 11507, 2022.

SAMHABER, W. M.; NGUYEN, M. T. Applicability and costs of nanofiltration in combination with photocatalysis for the treatment of dye house effluents. **Beilstein journal of nanotechnology**, v. 5, p. 476–484, 2014.

SANTOS, A. B.; CERVANTES, F. J.; VAN LIER, J. B. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. **Bioresource technology**, v. 98, n. 12, p. 2369–2385, 2007.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER D. K. **Separation process principles: chemical and biochemical operations**. 3 ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

SILVA, L. M. C. **Estudo do tingimento com corante índigo natural para aplicação têxtil: a transdisciplinaridade do design contribuindo para uma proposta de material ecológico para a indústria do vestuário**. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.

TABARAKI, R. et al. Performance and cost analysis of dye wastewater treatment by Fenton, electro-Fenton, and biosorption: Box-Behnken experimental design and response surface methodology. **Biomass conversion and biorefinery**, v. 13, n. 15, p. 13527–13537, 2023.

THONG, Z. et al. Fabrication of loose outer-selective nanofiltration (NF) polyethersulfone (PES) hollow fibers via single-step spinning process for dye removal. **Separation and purification technology**, v. 192, p. 483–490, 2018.

TKACZYK, A.; MITROWSKA, K.; POSYNIK, A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. **The Science of the total environment**, v. 717, n. 137222, p. 137222, 2020.

US inflation calculator: find US dollar's value from 1913-2024. Disponível em: <<https://www.usinflationcalculator.com/>>. Acesso em: 24 jun. 2024.

VALDEZ-VAZQUEZ, I. et al. Simultaneous hydrogen production and decolorization of denim textile wastewater: kinetics of decolorizing of indigo dye by bacterial and fungal strains. **Brazilian journal of microbiology**, v. 51, n. 2, p. 701–709, 2020.

VELOSO, Luana de Andrade. **Corantes e pigmentos**. Dossiê técnico, Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, Instituto de Tecnologia do Pará (TECPAR), 40 p, fev. 2012.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. London, England: IWA Publishing, 2005.

WANG, C. et al. The biodegradation of indigo carmine by *Bacillus safensis* HL3 spore and toxicity analysis of the degradation products. **Molecules (Basel, Switzerland)**, v. 27, n. 23, p. 8539, 2022.

WANKAT, Phillip C. **Separation process engineering: includes mass transfer analysis**. 3 ed. Estados Unidos da América: Prentice-Hall, 2012.

YASEEN, D. A.; SCHOLZ, M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. **International journal of environmental science and technology: IJEST**, v. 16, n. 2, p. 1193–1226, 2019.

XU, R. et al. Preparation of mesoporous poly (acrylic acid)/SiO₂ composite nanofiber membranes having adsorption capacity for indigo carmine dye. Applied physics. A, **Materials science & processing**, v. 106, n. 3, p. 747–755, 2012.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. **Corantes: caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento**. 1. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016.

ANEXO A – Condições e padrões de lançamento de efluentes.

Tabela A1 - Condições de lançamento de efluentes.

Parâmetros	Condições
pH	Entre 5 e 9
Temperatura	Inferior a 40°C
Materiais sedimentáveis	Até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone <i>Inmhoff</i>
Óleos e graxas	Óleos minerais até 20 mg/L Óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/L
DBO	Remoção mínima de 60%

Fonte: CONAMA, 2011.

Tabela A2 - Padrões de lançamento de efluentes.

Parâmetros	Valores máximos
Arsênio total	0,5 mg/L
Bário total	5,0 mg/L
Boro total	5,0 mg/L
Cádmio total	0,2 mg/L
Chumbo total	0,5 mg/L
Cianeto total	1,0 mg/L
Cianeto livre	0,2 mg/L
Cobre dissolvido	1,0 mg/L
Cromo hexavalente	0,1 mg/L
Cromo trivalente	1,0 mg/L
Estanho total	4,0 mg/L
Ferro dissolvido	15,0 mg/L
Fluoreto total	10,0 mg/L
Manganês dissolvido	1,0 mg/L
Mercúrio total	0,01 mg/L
Níquel total	2,0 mg/L
Nitrogênio amoniacal total	20,0 mg/L
Prata total	0,1 mg/L
Selênio total	0,30 mg/L

Continuação Tabela A2 – Padrões de lançamento de efluentes.

Parâmetros	Valores máximos
Sulfeto	1,0 mg/L
Zinco total	5,0 mg/L
Benzeno	1,2 mg/L
Clorofórmio	1,0 mg/L
Dicloroetano	1,0 mg/L
Estireno	0,07 mg/L
Etilbenzeno	0,84 mg/L
fenóis totais	0,5 mg/L
Tetracloroeto de carbono	1,0 mg/L
Tricloroetano	1,0 mg/L
Tolueno	1,2 mg/L
Xileno	1,6 mg/L

Fonte: CONAMA, 2011.

ANEXO B – Remoções mínimas para carga orgânica biodegradável e não biodegradável de efluentes industriais.

Tabela B1 - Remoções mínimas para carga orgânica biodegradável de efluentes industriais.

Vazão $\leq 3,5 \text{ m}^3/\text{dia}$	
Carga (kg DBO/dia)	Remoção
Carga $\leq 2,0$	Sólidos grosseiros, sedimentáveis e materiais flutuantes
Vazão $> 3,5 \text{ m}^3/\text{dia}$	
Carga (kg DBO/dia)	Remoção de DBO (%)
$2 < \text{carga} \leq 10$	40
$10 < \text{carga} \leq 100$	70
Carga > 100	90

Fonte: INEA, 2007.

Tabela B2 - Remoções mínimas para carga orgânica não biodegradável de efluentes industriais.

Vazão $\leq 3,5 \text{ m}^3/\text{dia}$	
Carga DQO	< 3,5 kg/dia
Vazão $> 3,5 \text{ m}^3/\text{dia}$	
Tipo de indústria	Carga DQO
Indústria Têxtil	< 200 mg/L ou 4,0 kg/dia
Indústrias químicas, petroquímicas e refinarias de petróleo	< 250 mg/L ou 5,0 kg/dia
Indústrias alimentícias	< 400 mg/L ou 8,0 kg/dia

Fonte: INEA, 2007.