



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS E TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

NÍVEA BEATRIZ DOS SANTOS ARAÚJO

**REAPROVEITAMENTO DE GARRAFAS PET PARA CONSTRUÇÃO DE
REATORES FOTOCATALÍTICOS NA REMOÇÃO E DEGRADAÇÃO DO
CORANTE TÊXTIL *RED DIRECT 83*: ESTUDO CINÉTICO, DE EQUILÍBRIO,
TERMODINÂMICO E REUSO**

Recife

2024

NÍVEA BEATRIZ DOS SANTOS ARAÚJO

**REAPROVEITAMENTO DE GARRAFAS PET PARA CONSTRUÇÃO DE
REATORES FOTOCATALÍTICOS NA REMOÇÃO E DEGRADAÇÃO DO
CORANTE TÊXTIL *RED DIRECT 83*: ESTUDO CINÉTICO, DE EQUILÍBRIO,
TERMODINÂMICO E REUSO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial à obtenção do grau
de Engenheira Química

Orientador: Prof. Dr. Luciano Costa
Almeida

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Araújo, Nívea Beatriz dos Santos.

Reaproveitamento de garrafas PET para construção de reatores fotocatalíticos na remoção e degradação do corante têxtil Red Direct 83: Estudo cinético, de equilíbrio, termodinâmico e reuso / Nívea Beatriz dos Santos Araújo. - Recife, 2024.

61 : il., tab.

Orientador(a): Luciano Costa Almeida

(Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, , 2024.

Inclui referências.

1. Adsorção. 2. Equilíbrio. 3. Red direct 83. 4. Termodinâmica. 5. TiO₂. I. Almeida, Luciano Costa. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

REAPROVEITAMENTO DE GARRAFAS PET PARA CONSTRUÇÃO DE REATORES FOTOCATALÍTICOS NA REMOÇÃO E DEGRADAÇÃO DO CORANTE TÊXTIL RED DIRECT 83: ESTUDO CINÉTICO, DE EQUILÍBRIO, TERMODINÂMICO E REUSO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Aprovado em: 08 de Outubro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LUCIANO COSTA ALMEIDA**
Data: 21/10/2024 16:21:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.Dr. Luciano Costa Almeida (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE PEDRO DA COSTA GOMES**
Data: 21/10/2024 16:16:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **ADILSON DE OLIVEIRA GONCALVES DO NASCIMI**
Data: 21/10/2024 20:12:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Adilson de Oliveira Gonçalves do Nascimento (Examinador Externo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e aos Orixás pela proteção, força e sabedoria a mim concedida ao longo do caminho.

À minha mãe Fernanda Regina, por todo sacrifício, amor, abnegação, e por todas as correções em minhas redações. Ao meu pai Alexandre Araújo, pelas conversas duras e necessárias, por me mostrar o que é a vida e, por sempre me incentivar, do seu jeito todo especial. Obrigado por serem minha base.

Às minhas avós Zilda Bernardino e Natércia Araújo, por terem me amado, cuidado e inspirado em todos os momentos difíceis e, me ensinarem o valor de uma verdadeira amizade.

Às minhas tias Flávia Regina e Adriana Araújo, por serem mulheres maravilhosas e tão amáveis que me mostraram que em vocês tenho suporte e carinho sempre.

Às minhas sobrinhas, Isabelly Sophia, Lara Beatriz e Sara Esther, por me lembrarem que eu sou o ancestral de quem está por vir, e por isso, eu vou.

Aos meus mais que amigos, Adilson de Oliveira e Jacqueline Lima, por fazerem parte de momentos tão marcantes na minha vida e me incentivarem em momentos que nem eu mesmo acreditei em mim.

Aos amigos que fiz pelo caminho, Evelle Duarte, Emerson Santos, Luara Ribeiro, Raiane dos Santos, Rafaela Mendes e tantos outros, que me ajudaram e me ensinaram que a vida é bem mais leve quando compartilhada. Obrigada pelas crises de riso, e os momentos do café.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luciano Costa, por toda dedicação, paciência, acolhimento e conhecimento transmitido ao longo dos anos.

Por último, mas não menos importante, agradecer a mim, por nunca ter desistido, pelas noites acordadas, e por fazer tudo aquilo que ninguém poderia fazer, se não eu. Obrigado.

RESUMO

Nos últimos anos, o aumento da poluição nos corpos hídricos, devido a despejos inadequados de efluentes industriais, e em especial do setor têxtil, aliado a mudança nos padrões de consumo da população, resultou em um aumento significativo no interesse por métodos ambientalmente amigáveis para a remoção de corantes, com o objetivo de permitir processos de tingimento têxtil mais sustentáveis. Neste estudo, placas de PET, recicladas de garrafas plásticas, foram recobertas com um filme de TiO_2 , adsorvente não tóxico de baixo custo e de alta eficiência, utilizando a técnica *washcoating* de recobrimentos sucessivos, e foram aplicadas na remoção do corante azo *Red Direct 83* por meio de um processo de adsorção. Os estudos de equilíbrio de adsorção em batelada foram acompanhados ao longo de 24 horas, nas temperaturas de 10°C, 20°C e 30°C, o estudo termodinâmico, avaliado na concentração de 25 mg. L⁻¹ e o estudo cinético foi realizado ao longo de 12 horas, na temperatura de 20°C e 25 mg. L⁻¹. O comportamento de adsorção do *Red Direct 83* foi adequadamente descrito pelo modelo de Freundlich. O processo de adsorção demonstrou ser espontâneo termodinamicamente a temperaturas próximas do ambiente, conforme indicado pelo valor negativo da mudança de energia livre de Gibbs (ΔG) de -1401,54 kJ/mol. Os estudos cinéticos mostraram que o modelo de Elovich se ajusta bem aos dados obtidos para a adsorção do *Red Direct 83*, com valores de R^2 superior a 0,98. A metodologia de regeneração/reuso empregando fotocatalise na placa de PET/ TiO_2 , adsorvido com o corante, foi realizada por 3 horas, sob influência de radiação UV solar e artificial. As placas regeneradas foram, então, utilizadas para adsorver o *Red Direct 83* cinco vezes, mantendo uma eficiência de remoção do estável e acima de 40%. e mantendo a capacidade máxima adsortiva estável. A eficiência de remoção sob radiação UV artificial e solar, também foi avaliada e, se mostrou satisfatória, e apontou para eficácia da metodologia proposta para remoção do corante em questão.

Palavras chaves: adsorção; equilíbrio; Red direct 83; termodinâmica; TiO_2 ;

ABSTRACT

In recent years, the increase in pollution in water bodies, due to improper discharges of industrial effluents, particularly from the textile sector, combined with changes in consumption patterns of the population has resulted in a significant rise in interest in environmentally friendly methods for dye removal, aiming to enable more sustainable textile dyeing processes. In this study, PET plates, recycled from plastic bottles, were coated with a TiO₂ film, a low-cost, non-toxic adsorbent with high efficiency, using the washcoating technique of successive coatings, and they were applied to the removal of the azo dye Direct Red 83 through an adsorption process. Batch adsorption equilibrium studies were monitored over 24 hours at temperatures of 10°C, 20°C, and 30°C; the thermodynamic study was assessed at a concentration of 25 mg L⁻¹, and the kinetic study was conducted over 12 hours at a temperature of 20°C and 25 mg L⁻¹. Adsorption behavior of Direct Red 83 was well described by the Freundlich model. Adsorption process proved to be thermodynamically spontaneous at ambient temperatures, as indicated by the negative value of the Gibbs free energy change (ΔG) of -1401.54 kJ/mol. Kinetic studies showed that the Elovich model fits well with the data obtained for the adsorption of Direct Red 83, with R² values above 0.98. Regeneration/reuse methodology employing photocatalysis on the PET/TiO₂ plates, adsorbed with the dye, was carried out for 3 hours under the influence of solar and artificial UV radiation. The regenerated plates were then used to adsorb Direct Red 83 five times, maintaining a stable removal efficiency above 40% and a stable maximum adsorption capacity. Removal efficiency under artificial and solar UV radiation was also evaluated and demonstrated to be satisfactory, indicating the effectiveness of the proposed methodology for the removal of the dye in question.

Keywords: Adsorption. Equilibrium. Direct Red 83. Thermodynamics. TiO₂.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 -** Ciclo da economia linear
- Figura 2 -** Ciclo da economia circular
- Figura 3 -** Cadeia agroindustrial têxtil
- Figura 4 -** Participação dos países na produção mundial de têxteis e vestuários
- Figura 5 -** Exportações de têxteis no Mundo - 2017 a 2020 (US\$ bilhões)
- Figura 6 -** Brasil e Estados - Valor bruto da produção industrial em 2018
- Figura 7 -** Classificação dos corantes têxteis de acordo com o método de aplicação na fibra
- Figura 8 -** Estrutura do *Red Direct 83*
- Figura 9 -** Progressão da produção de plásticos no mundo
- Figura 10-** Formas das isothermas de adsorção
- Figura 11 -** Sistema de fotodegradação
- Figura 12 -** Isothermas da adsorção de RD83 em TiO_2 em a) Langmuir b) Freundlich e c) Sips
- Figura 13 -** Gráfico de Van't Hoff
- Figura 14 -** Eficiência de remoção (%) do RD83 em TiO_2 .
- Figura 15 -** Ajuste de dados aos modelos cinéticos na adsorção de RD83 em TiO_2
- Figura 16 -** Ciclos de reuso vs a) eficiência de remoção b) capacidade de adsorção (q_e)
- Figura 17 -** Placas após a) adsorção b) regeneração UV artificial c) regeneração UV solar

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Fontes e média de produção anual (2020) dos resíduos de microplásticos mais comuns.
- Tabela 2** - Parâmetros do equilíbrio da adsorção de RD83 em TiO_2
- Tabela 3** - Parâmetros termodinâmicos da adsorção de RD83 em TiO_2 , para concentração de 25 mg.L^{-1}
- Tabela 4** - Parâmetros cinéticos da adsorção de RD83 em TiO_2

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de confecção
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CO ₂	Dióxido de Carbono
FDI	Fundo de Desenvolvimento Industrial
FNE	Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste
H ₂ O	Água
ONU	Organizações das Nações Unidas
pH	Potencial hidrogeniônico
POA	Processos Oxidativos Avançados
RD83	<i>Red Direct 83</i>
SSS	Sólidos Totais Sedimentáveis
TiO ₂	Dióxido de Titânio
UV	Ultravioleta
ZnO	Óxido de Zinco

LISTAS DE SÍMBOLOS

C	Constante relacionada com a resistência à difusão	mg.g^{-1}
C_0	Concentração inicial do adsorvato	mg.L^{-1}
C_e	Concentração do adsorvato no equilíbrio	mg.L^{-1}
k_1	Constante da taxa de adsorção de pseudo-primeira ordem	min^{-1}
k_2	Constante da taxa de adsorção de pseudo-segunda ordem	$\text{g.mg}^{-1} .\text{min}^{-1}$
k_D	Constante de equilíbrio	L.g^{-1}
h	Velocidade de adsorção inicial	$\text{mg g}^{-1}\text{min}^{-1}$
K_f	Constante de freundlich	$(\text{mg.g}^{-1})(\text{mg.g}^{-1})^{1/n}$
M_{ads}	Massa do adsorvente	g
q_e	Capacidade adsortiva no equilíbrio	mg.g^{-1}
q_{max}	Máxima capacidade de adsorção	mg.g^{-1}
q_t	Capacidade de adsorção no tempo t	mg.g^{-1}
r	Coeficiente de correlação	Adimensional
R	Constante universal dos gases	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
R^2	Coeficiente de determinação	Adimensional
t	Tempo de reação	min
t_0	Tempo inicial	min
T	Temperatura	K
V	Volume da solução de corante	L
ΔG	Variação de energia Livre de Gibbs	kJ.mol^{-1}
ΔH	Variação de entalpia	kJ.mol^{-1}
ΔS	Variação de entropia	$\text{J.K}^{-1} .\text{mol}^{-1}$
1/n	Fator de heterogeneidade	Adimensional
k_L	Constante de Langmuir	L.mg^{-1}
α	Taxa de adsorção inicial	$\text{mg.g}^{-1} \text{min}^{-1}$
β	Constante de dessorção	gmg^{-1}

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1. ÁGUA: CONSUMO, PROBLEMÁTICA E NOVOS CENÁRIOS	11
2.2. INDÚSTRIA TÊXTIL	13
2.2.1 A cadeia produtiva	13
2.2.2 Indústria Têxtil no Brasil	14
2.2.3 A indústria Têxtil no Nordeste	16
2.3 CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE	17
2.4 OS CORANTES TÊXTEIS E O RED DIRECT 83	18
2.5 O PASSIVO AMBIENTAL: PET	21
2.6 TRATAMENTOS CONVENCIONAIS E OPORTUNIDADES	23
2.6.1 Tratamento biológico	24
2.6.2 Tratamento químico	24
2.6.3 Tratamento físico	24
2.6.4 Tratamentos alternativos	24
2.7 O DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO ₂)	25
2.8 ADSORÇÃO	26
2.8.1 Equilíbrio de Adsorção	27
2.8.1.1 Isoterma de Langmuir	28
2.8.1.2 Isoterma de Freundlich	29
2.8.1.3 Isoterma de Langmuir- Freundlich (Sips)	29
2.8.2 Cinética de Adsorção	30
2.8.2.1 Modelo de pseudo-primeira ordem	30
2.8.2.2 Modelo de pseudo-segunda ordem	31
2.8.2.3 Modelo de Elovich	31
2.8.2.4 Modelo de Difusão Intraparticular	31
2.8.3 Termodinâmica da Adsorção	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 PREPARAÇÃO DO FILME DE TiO ₂	34
3.2 PREPARAÇÃO DAS PLACAS DE PET E RECOBRIMENTO COM SUSPENSÃO DE TiO ₂	34
3.3 EQUILÍBRIO DA ADSORÇÃO	35
3.4 CINÉTICA DA ADSORÇÃO	36
3.5 REUTILIZAÇÃO DA PLACA COM ADSORVENTE	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1 EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO	38
4.2 TERMODINÂMICA DE ADSORÇÃO	40
4.3 CINÉTICA DE ADSORÇÃO	43
4.4 REUSO DO FOTOCATALIZADOR	45
5. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	9

1. INTRODUÇÃO

O descarte de águas residuais industriais tem sido amplamente estudado pela comunidade científica, pois representa um grande risco para os ambientes aquático, atmosférico e do solo, afetando a saúde de seres humanos e animais. Essas águas podem conter metais pesados, emulsões de óleo, e compostos orgânicos e inorgânicos que são difíceis de remover por causa de sua solubilidade em água ou pela presença de substâncias persistentes e recalcitrantes. (BOCZKAJ; FERNANDES, 2017; JAAFARZADEH et al. 2018).

Em especial, o setor têxtil tem atraído olhares de toda comunidade acadêmica, alguns sendo alguns fatores destacados para essa realidade: a expressiva quantidade de empresas de pequeno porte que compõem o setor; e por isso, utilizam tecnologias desatualizadas para o tratamento de seus efluentes; aliado ao fato de comumente estão localizadas em países em desenvolvimento e em regiões cujos regulamentos e legislações são menos rigorosos e facilmente contornáveis, e por isso os efluentes desse setor são despejados de formas inadequadas (RAJ; SINGH; BHATTACHARYA, 2023).

Em todo o mundo, a descoloração e a degradação dos efluentes têxteis são etapas obrigatórias antes da disposição final. Foi demonstrado que os processos físico-químicos (como coagulação/floculação, precipitação, troca iônica, separação por membranas e oxidação) resultam em uma mineralização incompleta dos poluentes (Zhou et al., 2024). Por outro lado, em muitos casos, devido à toxicidade dos efluentes têxteis, os métodos biológicos se mostram ineficazes, especialmente quando os poluentes estão presentes em concentrações elevadas (LOUHICHI; GAIED; MANSOURI; JEDAY, 2022)

Em especial, a adsorção, apesar de eficiente, apenas transfere contaminantes para o adsorvente, sem removê-los completamente. Portanto, é necessário regenerar os adsorventes utilizando estratégias que envolvem lavagem, extração com solvente e calcinação; resultando na geração de contaminantes secundários, caso contrário, sua eficiência de remoção seria reduzida drasticamente (HE et al, 2023). Portanto, um dos principais objetivos do século XXI é desenvolver tecnologias de tratamento de águas residuais que sejam simples, seguras, econômicas, eficientes e, acima de tudo, reduzindo a geração de resíduos secundários. (BOCZKAJ; FERNANDES, 2017).

A fotocatalise é uma técnica, da classe dos POAs (Processos Oxidativos Avançados), cujo objetivo é mineralizar compostos orgânicos, de forma eficiente para degradar contaminante e, vem sendo aplicada com sucesso para regenerar adsorventes, devido ao seu baixo custo, facilidade de operação e características ecologicamente adequadas. O dióxido de titânio (TiO_2) tem se tornado uma opção cada vez mais popular na área de fotodegradação, graças à sua forte atividade sob luz UV, baixo custo, estabilidade química e não toxicidade (HE et al, 2020).

Outra vantagem do TiO_2 é que este também pode ser imobilizado sobre diversos substratos, como por exemplo, material cerâmico triturado, latão, esferas de alginato, matriz polimérica de quitosana, polietileno tereftalato (PET), eliminando a necessidade de recuperar esse material por meio de outros tratamentos posteriores (DALPONTE et al., 2016; BORGES, 2015).

Wang *et al.* (2024), Ali, *et al.* (2024) e Eltaweil, *et al.* (2024) investigaram a aplicação de TiO_2 como adsorvente e fotocatalisadores, assim como sua regeneração, para fins de remoção e degradação de corantes têxteis, hormônios e medicamentos, obtendo excelentes resultados.

Diante do cenário exposto acima, o objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade e eficiência de reatores fotocatalíticos de PET/ TiO_2 para a degradação do corante têxtil Red Direct 83. Tendo como objetivos específicos:

- Preparar placas de PET recobertas com TiO_2 ;
- Realizar o estudo do equilíbrio, cinético e termodinâmico de adsorção;
- Avaliar o reuso do adsorvente;
- Avaliar a metodologia de reuso sob influência de radiação UV solar.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo descreve fundamentação teórica dos tópicos mais relevantes para a construção do presente trabalho. Está dividido nas seguintes macros etapas: apresentação da problemática principal acerca da poluição dos recursos hídricos e escassez de água. Seguido da relevância e que o setor industrial têxtil e os principais passivos ambientais abordados, o PET e os corantes, possuem sobre o tema. Em seguida uma elucidação sobre os métodos de tratamento e novas alternativas.

2.1. ÁGUA: CONSUMO, PROBLEMÁTICA E NOVOS CENÁRIOS

Mesmo tratando-se de um recurso abundante no planeta, ocupando aproximadamente 70% de sua superfície e dito como renovável, o consumo da água vem preocupando a comunidade científica ao redor do mundo. Considerando que 97% correspondem à água salgada e 3% à água doce, e destes, apenas 0,3% encontra-se disponível em mananciais superficiais (AUGUSTO et al. 2021).

Cao e Ying (2024) são categóricos ao afirmar que a demanda mundial de água aumentou substancialmente nas últimas décadas, como resultado do aumento da população, da expansão das áreas de irrigação e do desenvolvimento econômico, resultando na escassez de tal recurso em muitas partes do mundo. Em concordância com o autor, o Relatório Mundial da ONU sobre “Desenvolvimento dos Recursos Hídricos” do ano de 2024, aponta para a contribuição expressiva do setor agrícola e industrial no consumo desse recurso, chegando a 95% em países em desenvolvimento (ONU,2024).

Tratando-se de poluição aquática, Ameta (2018), descreve-a como a menor alteração das propriedades biológicas, físicas ou químicas. Especialmente no que se refere a poluição do ambiente aquático, uma vez que a água, para o autor, representa a própria essência da vida. Países da África, América Latina e Ásia já vivenciam uma realidade em que seus principais rios e aquíferos estão poluídos devido à alta carga de patógenos e nutrientes lançados sem qualquer tratamento prévio (ONU, 2024).

Davies e Simonovic (2018), fazem apontamentos acerca do aumento na demanda do consumo de água doce, todavia, concluem que uma variedade de fatores, incluindo o crescimento da população, a poluição da água, o progresso econômico, a mudança na utilização dos solos e as alterações climáticas, fazem com que a incerteza de sua

disponibilidade no futuro, favoreçam o crescente interesse em formas alternativas de tratamento água disponível.

De acordo com Suárez-Eiroa (2019) é nesse cenário que conceitos como economia circular, tratamentos alternativos de efluentes, vem ganhando cada vez mais visibilidade na comunidade acadêmica. Em especial, o conceito de economia circular que emergiu a partir de conceitos estabelecidos na década de 70, partindo da ideia de reintegração dos resíduos na cadeia de produção industrial e, provou-se ser aplicável a diversos recursos.

Enquanto o modelo de consumo linear, representada na Figura 1 abaixo, sustenta o modo de produção regido por “extração – produção - descarte”, o conceito de economia circular (Figura 2), surge para quebrar esse paradigma e apresentar uma nova possibilidade de modelo industrial que mimetiza o ciclo de vida natural (JOHNSON; BUREK; BYERS; FALCHETTA; FLÖRKE; FUJIMORI; HAVLIK; HEJAZI; HUNT; KREY, 2019). Este, recebeu grande aceitação por abordar temas como sustentabilidade e cada vez mais vem conquistando lugar de destaque nas políticas públicas em governos como o da União Europeia e foi implementado como estratégia de desenvolvimento nacional na China (INDRIAWATI; GRAVITIANI; SAMARA, 2024).

Figura 1: Ciclo da economia linear



Fonte: Raizen (2024)

Figura 2: Ciclo da economia circular



Fonte: Raizen (2024)

2.2.INDÚSTRIA TÊXTIL

Para atender a grande demanda do mercado, a indústria têxtil desenvolveu grandes polos industriais (FUJITA; JORENTE, 2015), e segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) (2019), existem 27,5 mil empresas formais desse setor em todo país. O maior número dessas empresas está localizado na região sudeste (São Paulo e Minas Gerais), seguido do Nordeste, que concentra o 2º polo têxtil do país, com destaque para a cidade de Toritama que produz cerca de 16% dos jeans do país (SOUSA; SOUZA; NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2023)

2.2.1 A cadeia produtiva

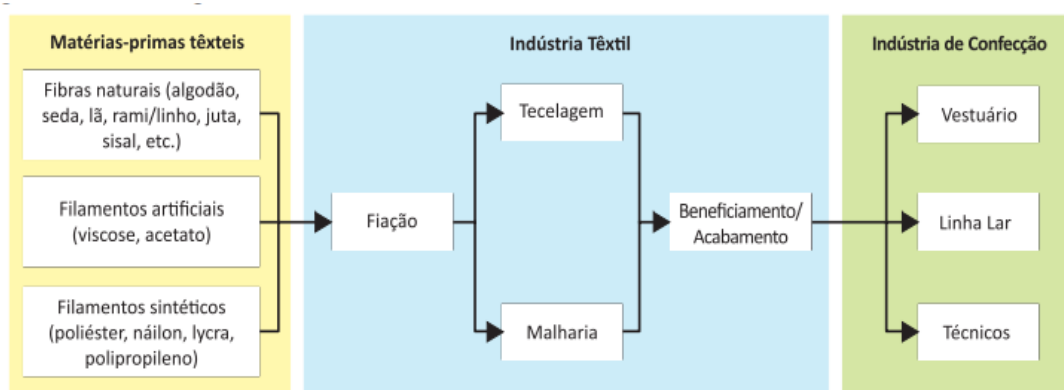
A estrutura da cadeia produtiva, de confecção e distribuição engloba desde a produção das fibras têxteis até o produto acabado e confeccionado, incluindo a distribuição e a comercialização. A indústria têxtil propriamente dita constitui uma etapa dessa cadeia, compreendendo a fiação (fios), a tecelagem e malharia (tecidos) e o beneficiamento (tinturaria, estamparia, lavanderia etc.) (NEGRETE; NEGRETE; LÓPEZ, 2020).

A indústria têxtil é suprida pelas matérias-primas, compostas de fibras naturais, onde se sobressaem o algodão e o linho, e de filamentos sintéticos e artificiais. Uma etapa

mais à frente constitui as atividades da indústria de confecção de artigos de vestuário e acessórios (NEGRETE; NEGRETE; LÓPEZ, 2020).

O processo produtivo da cadeia têxtil se inicia com a matéria-prima, transformada em fios nas fábricas de fiação, seguindo para a tecelagem plana ou para a malharia e, finalmente, para o acabamento. Vale salientar que cada etapa possui descontinuidade entre elas e podendo ou não, o resultado de uma ser o insumo da seguinte. A independência das fases principais e das etapas inerentes a cada uma delas decorre do fato de que cada etapa elabora um produto intermediário, embora em condições pré-determinadas pelo sistema de produção. A Figura 3 apresenta a configuração do fluxo produtivo da cadeia agroindustrial têxtil (MENDES JUNIOR, 2021).

Figura 3 - Cadeia industrial têxtil



Fonte: Mendes Júnior (2021)

2.2.2 Indústria Têxtil no Brasil

A indústria têxtil brasileira representa um dos setores mais relevantes da economia nacional, entretanto, seu consumo de água é alarmantemente elevado. Estima-se que a produção de 1 kg de tecido consome cerca de 7.000 litros de água, o que faz do têxtil um dos maiores consumidores desse recurso entre as indústrias, se comparado a setores como o de alimentos e bebidas (3.000 litros por kg de produto) e a indústria metalúrgica (1.500 litros por kg) (CETESB, 2021).

A indústria têxtil é um setor com intenso uso de água e, a nível mundial, encontra-se entre os dez maiores consumidores de água. (WIJAYAPALA; SAMARAWICKRAMA, 2024) e, de acordo com HOLE (2020), é o segundo maior contribuinte para a poluição de corpos hídricos. O consumo de água pode variar, a depender do tipo de tecido produzido, equipamento de processamento, nos corantes

utilizados e as práticas de gestão (KUMAR; PAVITHRA, 2019). A água é consumida em várias fases do processamento têxtil, desde a preparação do tecido, até as etapas finais de tinturaria, estamparia e outros acabamentos estéticos e eficientes (WIJAYAPALA; SAMARAWICKRAMA, 2024). Estudos anteriores apontam que para tingir 28 milhões de toneladas, produzidas anualmente, gastam-se cerca de 5 bilhões de m³ de água (HOSSAIN, 2020)

Em 2018, a produção de manufaturas têxteis brasileiras alcançou 2 milhões de toneladas, o que representa um faturamento da ordem de US\$ 50,3 bilhões (Prado, 2018). Muito embora, a maior parte dos consumidores do têxtil brasileiro seja o mercado interno, os dados da Figura 4 abaixo, apontam para a expressiva participação do Brasil no mercado da exportação, tanto para a indústria têxtil, como a de vestuário. Essas, respectivamente, no ano de 2018 alcançaram uma participação de 2,8 % e 2,4% da produção mundial (FIEG, 2018).

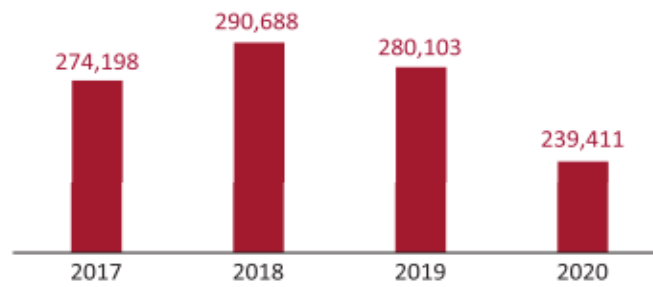
Figura 4 - Participação dos países na produção mundial de têxteis e vestuários

PRODUÇÃO DE TÊXTEIS		PRODUÇÃO DE VESTUÁRIO	
PAÍS	%	PAÍS	%
China	50.20	China	47.2
Índia	6.90	Índia	7.1
Estados Unidos	5.30	Paquistão	3.1
Paquistão	3.60	Brasil	2.6
Brasil	2.4	Turquia	2.5
Indonésia	2.4	Coreia do Sul	2.1
Taiwan	2.3	México	2.1
Turquia	1.9	Itália	1.9
Coreia do Sul	1.8	Malásia	1.4
Tailândia	1.1	Taiwan	1.4
México	0.9	Polônia	1.4
Bangladesh	0.8	Romênia	1.2
Itália	0.8	Indonésia	1.1
Rússia	0.7	Bangladesh	1
Alemanha	0.5	Tailândia	1
Outros	18,4	Outros	22.7

Fonte: Adaptado de FIEG (2018)

Em contrapartida, dados do Caderno Setorial ETENE de 2020, no cenário mundial, as exportações de têxteis decresceram em 12,7% entre 2017 e 2020, já com influência do impacto de saúde e econômico da pandemia da Covid-19, passando de US\$ 274 bilhões para US\$ 239 bilhões (MENDES JUNIOR, 2021), como aponta o Figura 5, abaixo.

Figura 5 - Exportações de têxteis no Mundo - 2017 a 2020 (US\$ bilhões)



Fonte: Mendes Júnior (2021)

2.2.3 A indústria Têxtil no Nordeste

Durante o século XVIII, a implantação da cultura do algodão em solo nordestino, viabilizou o início das atividades voltadas para extração dessa fibra. De acordo com Diniz e Basques (2003), a produção era voltada basicamente para exportação, atingindo picos de comercialização durante o período da guerra civil americana (VIANNA, 2005).

Vianna (2005) ainda afirma que, inicialmente, a indústria têxtil nordestina era tipicamente artesanal, e que a partir da metade do século XIX, adquiriu caráter industrial tornando a região uma grande produtora nacional. A partir de 1930, com o intenso desenvolvimento da indústria no Estado de São Paulo, a indústria têxtil paulista tomou o lugar da indústria nordestina, crescendo cerca de 34% entre 1907 e 1939.

Segundo Guimarães Neto (1989) apud Diniz e Basques (2003), seguiu-se uma forte crise na indústria têxtil nordestina, e após 1950, entrou em vigor um projeto para soerguimento do setor, fazendo parte das ações da Sudene, naquele momento em que havia sido criada, trazendo um certo grau de modernização, diversificação e aumento da produtividade, proporcionando à indústria têxtil nordestina um desempenho satisfatório nas décadas de 60 e 70 do século passado.

Conforme dados de 2018, o Ceará foi o maior produtor de têxteis da Região, neste período (Figura 6). Isto se deve ao seu passado como forte produtor de algodão, ao moderno parque industrial, mão de obra abundante e incentivos como o Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE) e do Fundo de Desenvolvimento Industrial (FDI). Na atualidade, a região Nordeste, em 2020, especificamente o Estado da Bahia foi o maior exportador, com vendas ao exterior em mais de US\$ 646 milhões, equivalente a quase 17% das exportações do Brasil (MENDES JUNIOR, 2021).

Figura 6 - Brasil e Estados - Valor bruto da produção industrial em 2018

Estados	Valor bruto da produção industrial	% do total
São Paulo	17.363.143	36,71
Santa Catarina	12.244.295	25,89
Minas Gerais	3.590.473	7,59
Paraná	2.293.567	4,85
Ceará	2.063.981	4,36
Bahia	2.029.286	4,29
Rio Grande do Sul	1.867.009	3,95
Paraíba	1.417.425	3,00
Pernambuco	1.002.595	2,12
Sergipe	762.847	1,61
Rio Grande do Norte	712.622	1,51
Rio de Janeiro	678.433	1,43
Outros	1.273.603	2,69
Brasil	47.299.279	100,00

Fonte: Adaptada de IBGE (2018)

Em Pernambuco, a indústria têxtil está presente em 35 municípios, concentrando-se principalmente na capital, Recife, e no polo do agreste, com destaque para três cidades: Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe. Juntos os quatro municípios concentram 65,8% de todos os estabelecimentos formais das indústrias têxteis e de confecção do estado (ANDRADE, ROCHA, MOURA, 2016). Dentre as principais indústrias do segmento têxtil presente no estado estão as de branqueamento, tingimento e torção em fios, tecidos, artefatos têxteis e peças de vestuário, que também são conhecidos como lavanderias de jeans (SEFAZ, 2015).

2.3 CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE

As características dos efluentes industriais podem variar a depender de fatores como: porte da indústria, materiais produzidos, insumos utilizados na cadeia produtiva entre outros. Porém de maneira geral, pode-se segmentá-los em sólidos sedimentáveis (SS), metais pesados, compostos orgânicos halogenados, hidrocarbonetos, detergentes e agentes tensoativos, cor, temperatura e pH.

A legislação brasileira, através do CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, estabelece diretrizes para o lançamento de efluentes em águas doces, permitindo que estados e municípios implementem suas próprias normas, enquanto segue

padrões nacionais conforme a Resolução nº 430/2011. Os artigos 14, 15 e 16 definem especificamente as condições de qualidade para as águas classificadas em diferentes categorias (I, II e III). Para a classe 1, as águas devem praticamente abster-se de substâncias tóxicas e contaminantes, apresenta limites rigorosos para resíduos sólidos, coliformes termotolerantes e parâmetros de oxigênio dissolvido, entre outros. Para a classe 2, os requisitos são semelhantes, mas com limites um pouco mais flexíveis e a presença de certos poluentes, como corantes, deve ser controlada (CONAMA, 2011).

As águas da classe 3 têm padrões menos restritos, ainda assim, é exigido que não ocorra efeito tóxico agudo e que muitos dos poluentes permaneçam em níveis mínimos, como coliformes e turbidez. Os limites variam conforme o uso proposto da água, sendo adaptados para recreação, dessedentação e outros, garantindo a proteção dos recursos hídricos e da saúde pública. O controle rigoroso dos efluentes lançados, que abrange testes ecotoxicológicos e uma série de parâmetros físico-químicos, reflete a preocupação com a manutenção da qualidade das águas e a preservação ambiental (BRASIL, 2011).

Em específico, o corante têxtil RD83, é motivo de preocupações ambientais significativas, especialmente no que diz respeito ao seu potencial para poluir recursos hídricos. Estudos demonstram que o descarte inadequado de resíduos têxteis, incluindo corantes como o RD83, pode resultar na contaminação de rios e lagos, comprometendo a biota aquática e a saúde humana (Duarte et al., 2020). Segundo a resolução acima é imprescindível que a indústria têxtil adote práticas de descarte responsável e tratamento de efluentes, minimizando assim os impactos negativos causados por substâncias químicas como o RD83 (BRASIL, 2011).

Assim, a conformidade com as legislações do CONAMA não apenas promove a sustentabilidade ambiental, mas também assegura a saúde pública em face dos riscos associados à contaminação hídrica por corantes industriais.

2.4 OS CORANTES TÊXTEIS E O RED DIRECT 83

De acordo com Raj, Singh e Bhattacharya (2023), o principal contaminante responsável pela poluição dos corpos hídricos provenientes da indústria têxtil é a utilização de corantes. Estima-se que mais de 1 milhão de tipos de corantes são comercializados com uma produção anual de mais de 7 milhões de toneladas de corantes

a nível global. Uma porção considerável do setor, sofre com a ineficiência e desorganização devido ao pequeno porte das empresas que nele atuam, esse cenário implica em aproximadamente 2 milhões toneladas de corantes sintéticos descarregados no ambiente, anualmente (AL MAMUN *et al.*, 2019).

Os corantes, principalmente na forma de compostos aromáticos e heterocíclicos utilizados nessas indústrias para atender aos requisitos de cor, são altamente tóxicos para o meio ambiente é, mutagênicos por natureza (GILPAVAS; DOBROSZ-GÓMEZ; GÓMEZ-GARCÍA, 2019). Azanaw *et al.* (2022), apontam para o impacto da liberação destes corantes nas em corpos hídricos que resultam em desafios significativos para os ecossistemas aquáticos e terrestres, tais como a interferência nos processos fotossintéticos das plantas aquáticas, diminuição dos níveis de oxigênio na água e, em situações extremas, asfixia da fauna e flora aquáticas. Para além deste efeito, a maioria dos corantes são tóxicos, carcinogênicos, mutagênicos ou teratogênicos para várias espécies microbiológicas e de peixes (SUKMANA *et al.* 2023; (RIZZI; *et al.* 2014).

Estas substâncias também são caracterizadas pelo grande número de carbonos presente em sua estrutura, com presença de anéis aromáticos, podendo conter também alguns heteroátomos, como enxofre, cloro ou nitrogênio. Este último é característico do grupo dos azo corantes, que possuem em sua estrutura um ou mais grupos azo (C-N=N-C), sendo o grupo cromóforo mais utilizado nas indústrias têxteis (COTILLAS *et al.* 2018).

Essa classe de corantes representa mais de 60% do total utilizado no mundo e apresentam grande diversidade estrutural. A fim de melhorar a estabilidade química, biológica e fotocatalítica, a resistência à exposição à luz, microrganismos, água e sabão, as suas propriedades são aprimoradas. Com isso, tornam-se resistentes à degradação por métodos convencionais, sendo necessário o desenvolvimento de metodologias eficientes na remoção destes compostos do efluente antes de seu despejo nos corpos receptores (BOCZKAJ; FERNANDES, 2017; JAAFARZADEH *et al.* 2018). Os efeitos nocivos dos corantes azo nos seres humanos e na vida aquática suscitaram apelos urgentes para o tratamento dos efluentes que contêm corantes azoicos, a fim de os eliminar ou de os converter em produtos úteis e seguros (BENKHAYA; MRABET; HARFI, 2020).

Na Figura 7 são apresentados os principais aspectos destas classes de corante, assim como a relação entre o substrato e o modo de aplicação para cada uma delas.

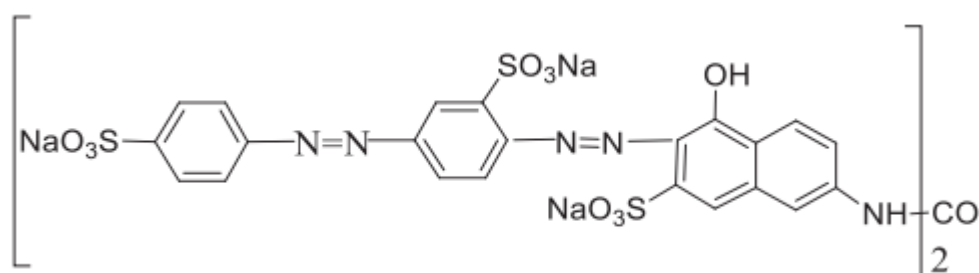
Figura 7 - Classificação dos corantes têxteis de acordo com o método de aplicação na fibra

Classe	Principais substratos	Métodos de aplicação
Reativos	Algodão, lã, seda e poliamida	Sítios reativos do corante reagem com os grupos funcionais da fibra através de ligações covalentes sob influência do calor e pH
Diretos	Algodão, viscose, seda e poliamida	Tingimento por adsorção via interações e Van der Waals em banhos neutros ou ligeiramente alcalinos contendo eletrólitos adicionais ou mordentes
Azoicos	Algodão, viscose, acetato de celulose e poliéster	Corantes insolúveis em água formados sobre os poros da fibra entre um agente de acoplamento solúvel com afinidade pela fibra e um sal de diazônio também solúvel
À tina	Algodão, viscose e lã	Insolúveis em água são reduzidos à forma leuco solúvel com ditionito de sódio em meio alcalino. Após interação com fibra são oxidados a forma insolúvel quando em contato com ar fixando-se à fibra
Ácidos ou aniônicos	Poliamida, lã, seda, couro e acrílico modificado	A fixação do corante à fibra acontece em meio neutro ou ácido através dos sítios aniônicos do corante com os sítios catiônicos da fibra via interação iônica, interação de Van der Waals ou pontes de hidrogênio.
Catiônicos	Lã, seda algodão, couro e fibras acrílicas. Pouca afinidade com fibras celulósicas	A fixação do corante à fibra acontece através dos sítios catiônicos (positivos) do corante com os sítios aniônicos (negativos) da fibra via interação iônica, interação de Van der Waals ou pontes de hidrogênio. O tingimento ocorre empregando usualmente ácido acético que colabora para fixação do corante à fibra e solubilidade em água.
Pré-metalizados	Lã e couro	Possui pouca ou nenhuma afinidade com fibra, porém se fixa a ela com adição de um mordente, produto químico que se combina com o corante e a fibra. Os principais mordentes são derivados de cromo, como o dicromato.
Dispersos	Poliéster, acetato de celulose, acrílico e poliamida	Tingimento sob a forma de fina dispersão aquosa, muitas vezes aplicadas com alta temperatura/pressão usualmente com auxílio de agentes dispersantes ou por processo de termofixação.
À cuba	Algodão e viscose	Devido à falta de solubilidade são reduzidos a forma leuco (solúvel) com ditionito de sódio em banho alcalino com outros agentes (eletrólitos e sulfeto de hidrogênio ou de sódio). Após interação com fibra são oxidados a forma insolúvel quando em contato com ar fixando-se à mesma.

Fonte: Adaptado de Zanoni e Yamanaka (2016)

Abaixo, na Figura 8 encontra-se a estrutura do *Red Direct 83*, um azo corante classificado como direto, que é o objeto deste estudo.

Figura 8: Estrutura do Red Direct 83



Fonte: RIZZI (2014)

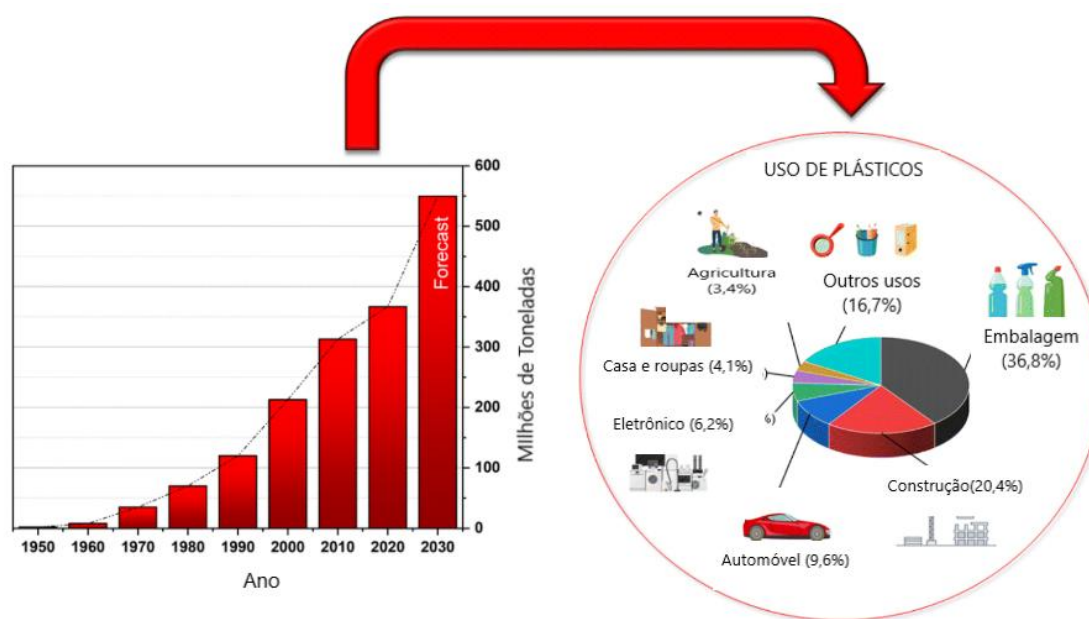
2.5 O PASSIVO AMBIENTAL: PET

Outra fonte relevante de poluição dos corpos hídricos são materiais plásticos, em especial garrafas de PET. Pandey (2023), afirmar categoricamente que as garrafas de água de plástico tornaram-se parte integrante do nosso estilo de vida moderno. A sua conveniência, acessibilidade e disponibilidade tornaram-nas uma escolha popular para aceder à água potável segura. Por serem leves, duradouras e facilmente transportáveis, torna-as convenientes em vários locais. No entanto, aponta também que a utilização generalizada e excessiva de garrafas de água de plástico suscitou preocupações significativas quanto ao seu impacto ambiental.

“As garrafas de água de plástico contribuem significativamente para a poluição e a produção de resíduos. Práticas de eliminação incorretas, levam à acumulação no ambiente. Estas podem demorar centenas de anos a decompor-se, resultando numa poluição persistente”, afirma Pandey (2023).

Mais de metade dos plásticos transformam-se em resíduos em menos de um ano após a sua produção e a maior parte não é reciclada ou reutilizada (TURSI *et al.* 2022) Desde a terceira revolução industrial, em 1950, foram produzidas mais de 10 bilhões de toneladas de plástico, tendo a taxa de produção anual aumentado exponencialmente. Além disso, estima-se que a produção aumente ainda mais para cerca de 600 milhões de toneladas em 2025 (Figura 9) (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Figura 9 - Progressão da produção de plásticos no mundo



Fonte: Adaptado de Geyer et al (2017)

Estudos recentes fornecem algumas evidências verdadeiramente dramáticas: 5,25 trilhões de peças de plástico, macro e micro, flutuam em nossos oceanos, com 46.000 peças em cada milha quadrada, pesando até 269.000 toneladas (TURSI *et al.* 2022). Os macros plásticos (diâmetro ≥ 5 mm) são um problema que afeta o ambiente marinho. Abaixo, segue a Tabela 1 acerca das fontes e média de produção anual de resíduos de microplástico.

Tabela 1 - Fontes e média de produção anual (2020) dos resíduos de microplásticos mais comuns.

Classe do plástico		% de produção	Produtos e origem típica
Polipropileno	PP	19.7	Embalagem alimentícia, tampas, envoltórios, partes automotivas, etc.
Polietileno de baixa densidade	PE-LD	17.4	Sacolas retornáveis, filmes plástico e filme plástico alimentício, etc.
Polietileno de alta densidade	PE-HD	12.9	Garrafas de leite, brinquedos, utensílios domésticos, etc.
Poli(vinil clorídico)	PVC	9.6	Insulfilme, mangueiras de jardinagem, canos, cabos ara isolamento, etc.
Polietileno	PET	8.4	Garrafas de água, sucos, produtos de limpeza
Poliuretano	PUR	7.8	Isolamento térmico predial, travesseiros, colchões, etc.
Poliestireno	PS	6.1	Equipamentos elétrico e eletrônicos, moldura de óculos, embalagem para alimentos, etc.

Fonte: Adaptado de Geyer et al (2017)

De acordo com Tursi (2022), os plásticos representam um enorme problema devido à sua toxicidade e persistência no ambiente. Sua toxicidade é atribuída principalmente à presença de aditivos químicos perigosos durante a fabricação e ao fato de que, devido à sua considerável área de superfície e caráter hidrofóbico, conseguem absorver e concentrar muitos contaminantes químicos orgânicos e inorgânicos. Portanto, para mitigar os efeitos desses passivos ambientais em corpos hídricos é de suma importância a aplicação de tratamentos eficientes dos efluentes.

2.6 TRATAMENTOS CONVENCIONAIS E OPORTUNIDADES

Sendo uma indústria convencional reconhecida e uma das partes interessadas na economia global, a indústria têxtil enfrenta sérios desafios ambientais. O rápido aumento das águas residuais geradas continua a ser um grave problema representando um desafio significativo para os atuais sistemas convencionais de tratamento (AZANAW; BIRLIE; TESHOME; JEMBERIE, 2022).

Na prática, uma combinação de diferentes métodos é geralmente utilizada para alcançar a qualidade desejada da água de uma maneira mais econômica e efluente tratado cumprir os parâmetros ambientais para lançamento (CRINI, 2005).

2.6.1. Tratamento biológico

O tratamento biológico pode ser classificado como aeróbio, anaeróbio. O tratamento mais prevalente para as águas residuais têxteis é o tratamento biológico (KARYPIDIS; AIKATERINIPAPADAKI; STALIKA, 2023). O tratamento das águas residuais têxteis tem-se baseado frequentemente em métodos anaeróbios, incluindo consórcios de microrganismos (lamas anaeróbicas ou biofilme) como agentes ativos. Estes métodos têm vantagens em relação aos processos aeróbios, na medida em que podem suportar cargas orgânicas mais elevadas, não necessitam de arejamento e produzem menos lodo (NEGASH; TIBEBE; MULUGETA; KASSA, 2023).

2.6.2 Tratamento químico

De acordo com Qasen (2021), os métodos químicos empregados para a eliminação de metais pesados em águas residuais são bem estabelecidos e têm sido utilizados há bastante tempo. Nesta seção, abordaremos técnicas baseadas em produtos químicos, como precipitação, coagulação-floculação e flotação.

A precipitação química, frequentemente chamada de precipitação por coagulação, é uma abordagem amplamente adotada nas indústrias, sendo considerada uma das mais eficientes e consolidadas. Esse método transforma íons metálicos dissolvidos em partículas sólidas, o que facilita sua sedimentação. O coagulante utilizado provoca a precipitação dos íons metálicos ao modificar o pH, o potencial de oxidação eletroquímica ou através de co-precipitação. Após essa etapa, normalmente, a remoção dos sedimentos é realizada. (NEGASH; TIBEBE; MULUGETA; KASSA, 2023).

2.6.3 Tratamento físico

Pellicer (2022), indica que não somente os métodos físicos também compõem a gama de tratamentos usados para a remoção de cor, processos mais complexos, tais como processos de filtração com membrana (nanofiltração, osmose reversa, eletrodialise), troca iônica e técnicas de adsorção, também são aplicados, porém o custo de instalação e manutenção da membrana, se torna a principal desvantagem desses métodos, inviabilizando-os economicamente.

2.6.4 Tratamentos alternativos

Embora os métodos físico e químico pareçam ser eficazes na descoloração de corantes azo (DENG; BRILLAS, 2023), atualmente, a sua eficácia na desintoxicação é questionável, sendo uma prioridade global o desenvolvimento de métodos alternativos ecológicos e económicos. Diversos tipos de tratamentos alternativos para remoção, existem e são bastante utilizados, sobretudo a separação por membranas (CAO; ZHU, 2022), a adsorção (NEMR; SHOAIB; SIKAILY; MOHAMED; HASSAN, 2021), tecnologias eletroquímicas (CAI *et al.* 2024), os processos de oxidação avançados (POA) (MARTÍNEZ-LÓPEZ *et al.* 2019) e a biodegradação (RATHOUR; JAIN; MADAMWAR; DESAI, 2021),

Atualmente, a utilização de materiais adsorventes tem sido considerada um dos melhores tratamentos, devido ao seu bom desempenho, como a elevada eficiência sem poluição secundária, a facilidade de manuseamento e os baixos custos de funcionamento (TU *et al.*, 2020), sendo comumente classificada como sorção química e física.

De acordo com Guz, Tiburtius e Pessoa (2023) os Processos Oxidativos Avançados (POAs) englobam uma série de tecnologias promissoras voltadas para a degradação e mineralização de compostos orgânicos. A fotocatalise heterogênea é uma

dessas abordagens, na qual um semicondutor é ativado por uma fonte de energia, como a luz, dando início a reações redox que produzem espécies oxidantes, especialmente o radical hidroxila.

Este radical possui a capacidade de oxidar diversos compostos orgânicos resistentes, resultando, na maioria dos casos, na mineralização desses compostos em dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e outras substâncias não tóxicas. Os semicondutores mais utilizados e estudados nesse contexto incluem TiO_2 e ZnO , devido à sua estabilidade química, térmica e mecânica, além de serem não tóxicos e de baixo custo (Hassan *et al.*, 2024).

2.7 O DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO_2)

O dióxido de titânio (TiO_2) é um material sólido que se apresenta, principalmente, em três formas cristalinas distintas: anatase, rutilo e brookita. Segundo Sales (2010), a forma anatase, devido a seu elevado potencial fotocatalítico e baixo custo é a mais aplicada para esse fim. Além disso, o TiO_2 possui características vantajosas, como ser atóxico, de fácil obtenção, resistente a fotocorrosão, alta foto sensibilidade, ser insolúvel em água e ter boa estabilidade em uma faixa de pH específica, o que o torna um excelente catalisador (SALES, 2010; DALPONTE *et al.*, 2016).

Sua aplicação em fotocatalise pode ser classificada em três categorias: em suspensão, fixado nas paredes ou imobilizado em diferentes matrizes. A maior parte das pesquisas concentra-se na forma em suspensão, devido à maior área superficial disponível, desse método que influencia positivamente a eficiência do processo, graças a redução da transferência de massa entre radicais hidroxila e os compostos orgânicos. (Crepaldi, 2022). Essa abordagem apresenta desvantagens, como a perda contínua do catalisador e a necessidade de recuperação, que pode aumentar os custos do tratamento. Uma alternativa para mitigar esses problemas é o uso de fotocatalisadores imobilizados em matrizes (DALPONTE *et al.*, 2016; BORGES *et al.*, 2016; SALES, 2010).

Várias matrizes têm sido investigadas para a imobilização de fotocatalisadores, incluindo vidro, quartzo, zeólitas, carvão ativado granular, aço inoxidável, metais, cerâmicas porosas e polímeros como PET, entre outros (CARVALHO, 2008; BORGES *et al.*, 2016). Em particular, os polímeros, como poliéster (PE), acetato de celulose e PET,

se destacam por serem de baixo custo, fáceis de recobrir com o fotocatalisadores (CÁMARA et al., 2016; YANG et al., 2010; MIRANDA et al., 2015).

Diferentes técnicas estão sendo utilizadas para a imobilização de catalisadores, tais como o método sol-gel, deposição química de vapor, aspersão térmica por plasma, *spin-coating*, *spray-drying* e *washcoating* (BORGES et al., 2016; GOMES, 2017; NASSAR; CIUFFI, 2003). Entre essas, a *washcoating*, é uma das mais frequentes para a produção de filmes finos, oferecendo vantagens como simplicidade no processo, baixos custos e a possibilidade de escalonamento (SENTANIN, 2012).

Esse processo envolve sucessivas camadas de revestimento, por meio da imersão e emersão da matriz em uma suspensão com o catalisador. O substrato deve ser submerso por um breve intervalo, com a imersão e emersão ocorrendo de maneira lenta e velocidade e temperatura constantes (ALMEIDA et al., 2010; SHAN; GHAZI; RASHID, 2010; NASSAR; CIUFFI, 2003). Este procedimento compõe-se de cinco etapas: imersão, retirada (*start-up*), deposição, drenagem e evaporação (CARVALHO; VARELA, 1999; SENTANIN, 2012).

As propriedades dos filmes produzidos são influenciadas por diversos fatores, incluindo o método utilizado, as velocidades de imersão e emersão do substrato na suspensão, a secagem do filme, bem como características da matriz, como porosidade e molhabilidade do líquido. Além disso, as propriedades da suspensão que contém o catalisador, como estabilidade, concentração e tamanho das partículas sólidas, pH, potencial zeta e viscosidade, também afetam as características finais do filme (ALMEIDA et al., 2010; SHAN; GHAZI; RASHID, 2010).

2.8 ADSORÇÃO

A adsorção é uma operação de transferência de massa, a qual estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos. Uma vez que os componentes adsorvidos, concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, tanto mais favorável será a adsorção. Por isso, geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas (RUTHVEN, 1984). A espécie que se acumula na interface do material é normalmente

denominada de adsorvato ou adsorbato; e a superfície sólida na qual o adsorvato se acumula, de adsorvente ou adsorvente (RUTHVEN, 1984).

Os processos de separação por adsorção estão baseados em três mecanismos distintos: o mecanismo estérico, os mecanismos de equilíbrio e os mecanismos cinéticos. Para o mecanismo estérico, os poros do material adsorvente possuem dimensões características, as quais permitem que determinadas moléculas possam entrar, excluindo as demais. Para os mecanismos de equilíbrio, têm-se as habilidades dos diferentes sólidos para acomodar diferentes espécies de adsorvatos, que são adsorvidos, preferencialmente, a outros compostos. O mecanismo cinético está baseado nas diferentes difusividades das diversas espécies nos poros adsorventes (DO, 1998).

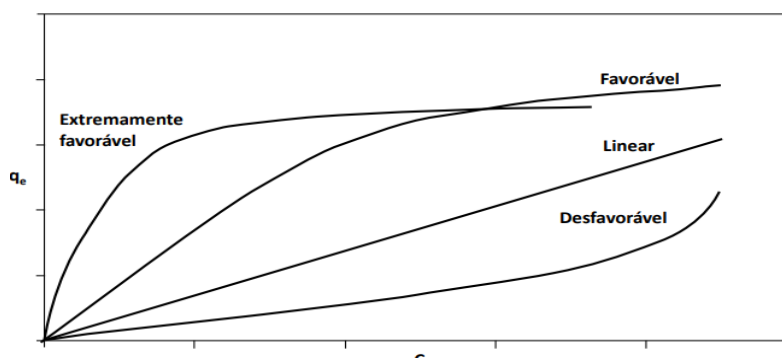
É um processo que depende de diversos fatores, como: as características do adsorvente incluindo, área superficial, tamanho do poro, densidade, grupos funcionais presentes na superfície e hidrofobicidade do material. A natureza do adsorvato depende da polaridade, do tamanho da molécula, da solubilidade e da acidez ou basicidade. As condições operacionais incluem, principalmente, temperatura, pH e natureza do solvente (COONEY, 1999).

2.8.1 Equilíbrio de Adsorção

De acordo com Nascimento *et al.* (2020), quando uma quantidade específica de um sólido, denominado adsorvente, é colocada em contato com um volume de um líquido que contém um soluto passível de adsorção, referido como adsorvato, o processo de adsorção se desenvolve até que um estado de equilíbrio seja atingido. O gráfico que representa a concentração do soluto na superfície do adsorvente em relação à sua concentração de equilíbrio na fase líquida, em uma temperatura específica, é conhecido como isoterma de adsorção.

Os gráficos assim obtidos podem apresentar-se de várias formas, fornecendo informações importantes sobre o mecanismo de adsorção como demonstrado abaixo na Figura 10:

Figura 10: Formas das isotermas de adsorção



Fonte: Nascimento (2020)

Equações teóricas ou semi-empíricas foram elaboradas para a interpretação dessas isotermas, com destaque para as equações de Langmuir e Freundlich, que são amplamente utilizadas na adsorção de soluções. Essas isotermas são, portanto, aplicadas em processos de tratamento de água e efluentes (NASCIMENTO *et al.*, 2020; MAGDALENA, 2010; KARAOĞLU *et al.*, 2010).

Muitas equações de isotermas foram propostas com dois ou mais parâmetros para ajustar os dados experimentais sobre os valores de capacidade adsorptiva (q) *versus* concentração da espécie no equilíbrio (C_e). Dentre essas, podemos citar as equações de Langmuir e Freundlich (ALI; HULYA, 2010; MCKAY, 1996).

2.8.1.1 Isoterma de Langmuir

A equação modelo de Langmuir (Equação 1) é uma das equações mais utilizadas para representação de processos de adsorção. E parte dos os seguintes pressupostos:

- Existe um número definido de sítios.
- Os sítios têm energia equivalente e as moléculas adsorvidas não interagem umas com as outras.
- A adsorção ocorre em uma monocamada.
- Cada sítio pode comportar apenas uma molécula adsorvida.

$$q_e = \frac{q_{\max} k_L C_e}{1 + (k_L C_e)} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: q_e é quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg g⁻¹); $q_{\max}$: capacidade máxima de adsorção (mg.g⁻¹); K_L , constante de interação adsorvato/adsorvente (L mg⁻¹); C_e : concentração do adsorvato no equilíbrio (mg.L⁻¹).

2.8.1.2 Isoterma de Freundlich

O modelo proposto por Freundlich (Equação 2) foi um dos primeiros a equacionar a relação entre a quantidade de material adsorvido e a concentração do material na solução em um modelo com características empíricas. O modelo pode ser aplicado a sistemas não ideais, em superfícies heterogêneas e adsorção em multicamada (CIOLA, 1981; MCKAY, 1996).

O modelo considera o sólido heterogêneo, ao passo que aplica uma distribuição exponencial para caracterizar os vários tipos de sítios de adsorção, que possuem diferentes energias adsorptivas (FREUNDLICH, 1906 apud FEBRIANTO, 2009).

$$q_e = k_F C_e^{1/n} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: q_e : quantidade de soluto adsorvido (mg.g^{-1}); C_e : concentração de equilíbrio em solução (mg L^{-1}); $1/n$: constante relacionada à heterogeneidade da superfície; k_F : constante de capacidade de adsorção de Freundlich ($\text{mg}^{1-(1/n)} (\text{g}^{-1} \text{L}^{1/n})$).

2.8.1.3 Isoterma de Langmuir- Freundlich (Sips)

A isoterma de adsorção proposta por Sips foi identificada como um caso de adsorção de gás em sólidos heterogêneos, sendo governada pela isoterma de Langmuir e uma distribuição específica de energia. A equação de Sips, em condições de baixa pressão, se reduz à equação de Freundlich e, assim como a equação de Langmuir, apresenta um limite de saturação finito quando a pressão é suficientemente elevada. Por essa razão, ela é frequentemente chamada de isoterma Langmuir–Freundlich na literatura sobre adsorção (BRIÃO; HASHIM; CHU, 2023).

A equação de Sips (Equação 3) tem se mostrado eficaz na modelagem de dados de adsorção na fase líquida, onde o termo de pressão do gás é substituído pela concentração do soluto adsorvível na fase líquida. Este modelo é amplamente utilizado no campo da adsorção de contaminantes em água, apresentando três parâmetros de ajuste, o que a torna bastante eficiente para a correlação de dados, abrangendo uma ampla faixa de concentrações (KINNIBURGH, 1986). Na adsorção de contaminantes da água, a equação de Sips é largamente utilizada como uma expressão empírica para correlacionar isotermas hiperbólicas, tipo I.

$$q_e = \frac{q_{\text{máx}} k_s C_e}{(1 + (k_s C_e^n))} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: $q_{\max}$ (mg.g^{-1}) é a quantidade máxima do corante adsorvido por unidade de massa adsorvente, onde K_s é a constante de adsorção característica do modelo, relacionada com a capacidade adsortiva, e n a intensidade de adsorção.

2.8.2 Cinética de Adsorção

A cinética de adsorção refere-se à redução da concentração de um soluto na fase líquida ao longo do tempo, resultante da transferência de massa para uma fase sólida (NASCIMENTO et al., 2020). A concentração do soluto na solução diminui à medida que o material adsorvente absorve o soluto até que se alcance o equilíbrio entre a quantidade de soluto adsorvido no sólido e a que retorna à fase líquida (MAGDALENA, 2010).

Experimentos cinéticos são fundamentais para prever a velocidade de remoção de compostos em estações de tratamento, facilitando a escolha do adsorvente mais adequado em processos de separação. Esses experimentos também contribuem para a compreensão do tempo necessário para atingir o equilíbrio e das variáveis que influenciam o processo de adsorção (MAGDALENA, 2010; CARVALHO, 2010).

A cinética de adsorção envolve três processos principais: transferência de massa externa, difusão no interior dos poros e difusão na superfície. Esses processos podem ser influenciados por diversas condições, como a concentração inicial do soluto, pH, tamanho das partículas, taxa de agitação, força iônica, distribuição dos poros e temperatura (NASCIMENTO et al., 2020). Para avaliar o comportamento da adsorção ao longo do tempo, são utilizados diferentes modelos cinéticos, sendo os mais comuns os de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem (MORAIS, 2007).

2.8.2.1 Modelo de pseudo-primeira ordem

Uma análise simples da cinética de adsorção, realizada pela equação de Lagergren (LAGERGREN, 1898), de pseudo primeira ordem. Baseia-se na capacidade adsortiva do adsorvente e foi desenvolvida para estudar a taxa e o mecanismo de controle do processo de adsorção (HO, 2004), apresentada na Equação 4.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_l(q_e - q_t) \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: k_l é constante da taxa de adsorção de pseudo primeira ordem (min^{-1}); q_e e q_t são as quantidades adsorvidas por grama de adsorvente no equilíbrio e no tempo t , respectivamente (mg g^{-1}).

2.8.2.2 Modelo de pseudo-segunda ordem

Para a cinética de pseudo-segunda ordem, a taxa de adsorção depende da quantidade da espécie química adsorvida na superfície do adsorvente e a quantidade adsorvida no estado de equilíbrio (SILVA, *et al.*, 2018). Pode ser representado pela Equação 5.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde, k_2 é a constante da taxa de adsorção de pseudo-segunda ordem ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), q_e é a capacidade de adsorção no equilíbrio ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) e q_t é a capacidade de adsorção no tempo t ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

A constante de velocidade é fundamental no cálculo da velocidade de adsorção inicial h ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), para t_0 , a Equação 5 se transforma na Equação 6 abaixo

$$h = k_2(q_e)^2 \quad (\text{Equação 6})$$

2.8.2.3 Modelo de Elovich

De acordo com Bonetto (2016) o modelo de Elovich, é bastante apropriado para processos de adsorção gás-sólido, e é caracterizado pelo decréscimo da velocidade com o tempo. Todavia, resultados (GILPAVAS, *et al.* 2019) indicam um bom ajuste no tratamento de corantes em solução. A Equação 7, abaixo o descreve. Onde α é taxa de adsorção inicial ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) e β (gmg^{-1}) é constante de dessorção.

$$qt = \frac{1}{\beta E} \ln(1 + \beta \alpha t) \quad (\text{Equação 7})$$

2.8.2.4 Modelo de Difusão Intraparticular

O modelo de Difusão intraparticular também foi avaliado, neste a o mecanismo de adsorção é considerado em três etapas: (i) transferência de massa através do filme da camada limite extrema que envolve a partícula; (ii) adsorção na superfície, cuja energia dependerá do processo de ligação (químico ou físico); (iii) difusão das moléculas do adsorvato para um sítio de adsorção pelo processo de difusão de poros. (CHEUNG, 2007).

A Equação 8 descreve o modelo, onde, C (mg.g^{-1}) é uma constante relacionada à resistência à difusão. O valor de k_d ($\text{mg.g}^{-1} \text{ min}^{-0,5}$) é a constante de velocidade da difusão intraparticular.

$$qt = k_d t^{0,5} + C \quad (\text{Equação 8})$$

2.8.3 Termodinâmica da Adsorção

A estimativa dos valores para os parâmetros termodinâmicos da adsorção é de grande utilidade e importância. Dentre outros pontos, permite:

- Determinar se o processo é espontâneo;
- Se é regido por contribuição entálpica ou entrópica;
- Estimar a capacidade de adsorção máxima;
- Fornece informações relativas à heterogeneidade da superfície do adsorvente;
- Indicar a natureza do processo (fisissorção ou quimissorção) e favorecer o estudo do mecanismo.

Características, essas que são definidas a partir da determinação dos parâmetros termodinâmicos, energia livre de Gibbs (ΔG), entalpia (ΔH) e entropia (ΔS) (MAGDALENA, 2010).

Valores de ΔG inferiores a 0 indicam que o processo é espontâneo. Em relação a ΔH , valores na faixa de $|40|$ a $|800| \text{ kJ.mol}^{-1}$ são característicos de processos de quimissorção. Por sua vez, valores negativos para ΔS indicam uma redução da "desordem" no sistema (DOTTO et al., 2011). A energia livre de Gibbs representa a relação entre as variações de entalpia e entropia do processo de adsorção a uma temperatura específica, conforme demonstrado na Equação 9 (DOTTO et al., 2011; CARDOSO et al., 2011).

$$\Delta G_{ads} = \Delta H_{ads} - T\Delta S_{ads} \quad (\text{Equação 9})$$

Em situações do mundo real, onde um sistema apresenta variações de temperatura e concentrações, a energia de Gibbs pode ser calculada para determinar os parâmetros e as condições do processo de adsorção, por meio da Equação 10 (CARDOSO et al., 2011).

$$\Delta G = -R \times T \times \ln k_d \quad (\text{Equação 10})$$

Com as Equações 8 e 9, descritas acima, chega-se à Equação 11, Equação de Van't Hoff, que será utilizada para determinação dos parâmetros termodinâmicos ΔH° e ΔS° (CARDOSO *et al.*, 2011).

$$\ln K_D = -\frac{\Delta H}{R} \times \frac{1}{T} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde, K_D é a constante de equilíbrio ou constante de distribuição (L.g^{-1}), ΔH° é a entalpia do processo (kJ.mol^{-1}), ΔS° é a entropia do processo ($\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$), T é a temperatura (K) e R é a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

O valor da constante de equilíbrio termodinâmico (K_D) pode ser estimado utilizando os dados de equilíbrio para as respectivas temperaturas, como demonstrado na Equação 12 (SHAN *et al.*, 2010).

$$K_D = \frac{q_e}{C_e} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde, K_D é a constante de distribuição (L.g^{-1}), q_e é a capacidade de adsorção (mg.g^{-1}) no equilíbrio e C_e é a concentração de equilíbrio (mg.L^{-1}).

Plotando-se o gráfico $\ln K_D$ em função de $1/T$, o mesmo deverá apresentar uma característica linear com inclinação da reta igual a $-\Delta H^\circ / R$ e interceptar o eixo y em $\Delta S^\circ / R$ (ARAÚJO *et al.*, 2009).

3.MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os métodos empregados, bem como os materiais, equipamentos e reagentes utilizados durante os experimentos. A metodologia deste estudo está dividida nas seguintes etapas: Preparação do filme de adsorvente, preparação e recobrimento das placas do substrato de PET, equilíbrio, cinética e reutilização do adsorvente.

3.1 PREPARAÇÃO DO FILME DE TiO_2

Para preparo de 100 g de suspensão de TiO_2 10%, foram pesados 90 g de água destilada e 10 g de TiO_2 -G5. Após a pesagem, ajustou-se o pH da água a 4, com ácido nítrico diluído, para conferir estabilidade à suspensão. Em seguida, foi adicionado o TiO_2 pausadamente no meio previamente acidificado, sob constante agitação, com auxílio de um agitador magnético. Em seguida, a suspensão foi submetida a banho ultrassônico por 15 minutos. Seguidos de 24 horas de vigorosa agitação, ao fim desse período, foi realizado correção do pH a 6.

3.2 PREPARAÇÃO DAS PLACAS DE PET E RECOBRIMENTO COM SUSPENSÃO DE TiO_2

Garrafas PET transparentes foram coletadas e cortadas em formato de placas retangulares nas dimensões de 4x1 cm. Primeiramente, lavou-se as placas com solução de detergente a 10%, esponja e limpas com água destilada. Por fim, as placas foram submetidas a banho de ultrassônico por 15 minutos, utilizando a mesma solução de detergente neutro e enxaguadas com água destilada. Novamente, foi submetida a banho de ultrassom por 15 minutos, com solução etanoica a 10%. Por último, foram lavadas com água destilada e expostas para secar a temperatura ambiente ($27 \pm 2^\circ\text{C}$).

Para a etapa de recobrimento das placas, estas foram submetidas a técnica de *washcoating* de recobrimentos sucessivos. Para isto, foi utilizada a máquina de *washcoating*, de fabricação própria do laboratório μRAIQ . Posteriormente as placas foram imersas na suspensão de TiO_2 , a velocidade constante de $5\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Em seguida, foram colocadas para a secagem em estufa (marca Biopar, modelo S36SD) por 15 minutos a uma temperatura de 50°C . Posteriormente, pesadas e submetidas novamente

ao processo até que a massa desejada de 4 mg fora alcançada. A fim de eliminar os resquícios de água, após a massa desejada ter sido alcançada, as placas foram submetidas a secagem final durante 30 minutos, também em estufa.

3.3 EQUILÍBRIO DA ADSORÇÃO

Os parâmetros estudados foram: concentração do corante 1 ,2 ,3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 mg. L-1, pH 4 e massa do adsorvente 4 mg. O teste de equilíbrio da adsorção foi realizado para as temperaturas 10, 20 e 30 °C, em ambiente refrigerado, e estufa. Inicialmente fez-se o ajuste do pH a 4 e retirou-se uma alíquota para a determinação da concentração inicial. Em seguida, 10 ml do corante foram colocados em contato com a placa recoberta de TiO₂. A adsorção ocorreu durante 24 h na ausência de luz, para todas as concentrações citadas acima, após esse período, as amostras foram retiradas e analisadas em espectrofotômetro UV-Vis (Spectroquant® Prove 300).

O rendimento da adsorção (%) foi calculado através da relação da concentração adsorvida pela inicial, como descrito na Equação 12 (SALES, 2010):

$$\% = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (\text{Equação 12})$$

A capacidade adsorptiva no equilíbrio (q_e), pode ser calculada pela Equação 13 (CRUZ et al., 2016; SALES, 2010).

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{M_{ads}} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde, C_0 a concentração inicial(mg/L), C_e a concentração no equilíbrio (mg/L), V o volume de solução (L) e M_{ads} é a massa de adsorvente sob a placa (g).

A condição de equilíbrio é de suma importância para determinar experimentalmente a capacidade de adsorção máxima ($q_{m\acute{a}x}$). Da Silva (2018), define este parâmetro como a relação entre a quantidade que é adsorvida de uma determinada espécie química, por unidade de massa do adsorvente.

3.4 CINÉTICA DA ADSORÇÃO

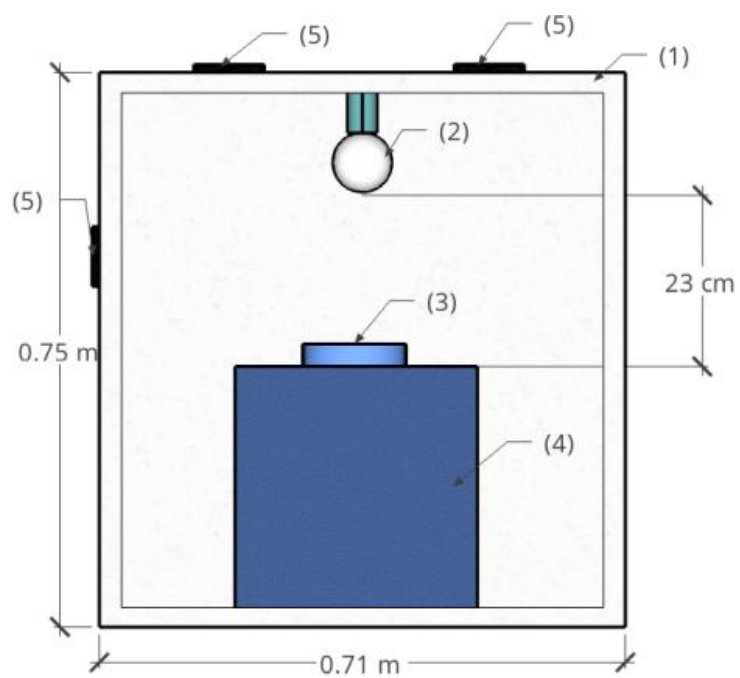
Com base nos melhores resultados da avaliação do equilíbrio adsorptivo, para temperatura e concentração de corante, realizou-se o estudo cinético. Ajustou-se o pH a 4 utilizando ácido nítrico diluído. Retirou-se uma alíquota para a leitura da concentração inicial. Em seguida, 10 ml da solução na concentração de 25 mg/L foram são colocadas no banho finito em contato com a placa de TiO₂, a 20°C. Amostras foram coletadas em tempos pré-determinados e levadas para leitura em espectrofotômetro de UV/Vis.

3.5 REUTILIZAÇÃO DA PLACA COM ADSORVENTE

A placa de TiO₂/ PET foi saturada com a solução do corante, nas condições determinadas pelo estudo de equilíbrio. Ao final do tempo de adsorção, as placas foram expostas a uma lâmpada *sunlight* marca Osram® com 300W de potência por 180 minutos, e na metade do tempo invertendo a face exposta à luz. Por fim, a placa foi imersa em água a pH 10 por 15 minutos e por mais 15 minutos em água destilada e seca em estufa a 50°C por 90 minutos. Esse procedimento foi realizado cinco vezes, a fim de avaliar a eficiência do método. O estudo foi feito em triplicata.

O sistema de fotodegradação (Figura 8) está constituído por uma cabine de madeira (1), uma lâmpada de luz UV (2) e fotorreator sob placa de petri (3). Além disso, a cabine de madeira possui um pedestal (4) e 3 coolers, nas dimensões, 8 x 9,5 cm (5) para realizar troca térmica e não sobreaquecer o sistema reacional. Para fins comparativos, um estudo foi conduzido similarmente sob ação da luz solar.

Figura 11 - Sistema de fotodegradação



Fonte: A autora (2024)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve e apresenta as discussões dos resultados obtidos acerca do presente trabalho.

4.1 EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO

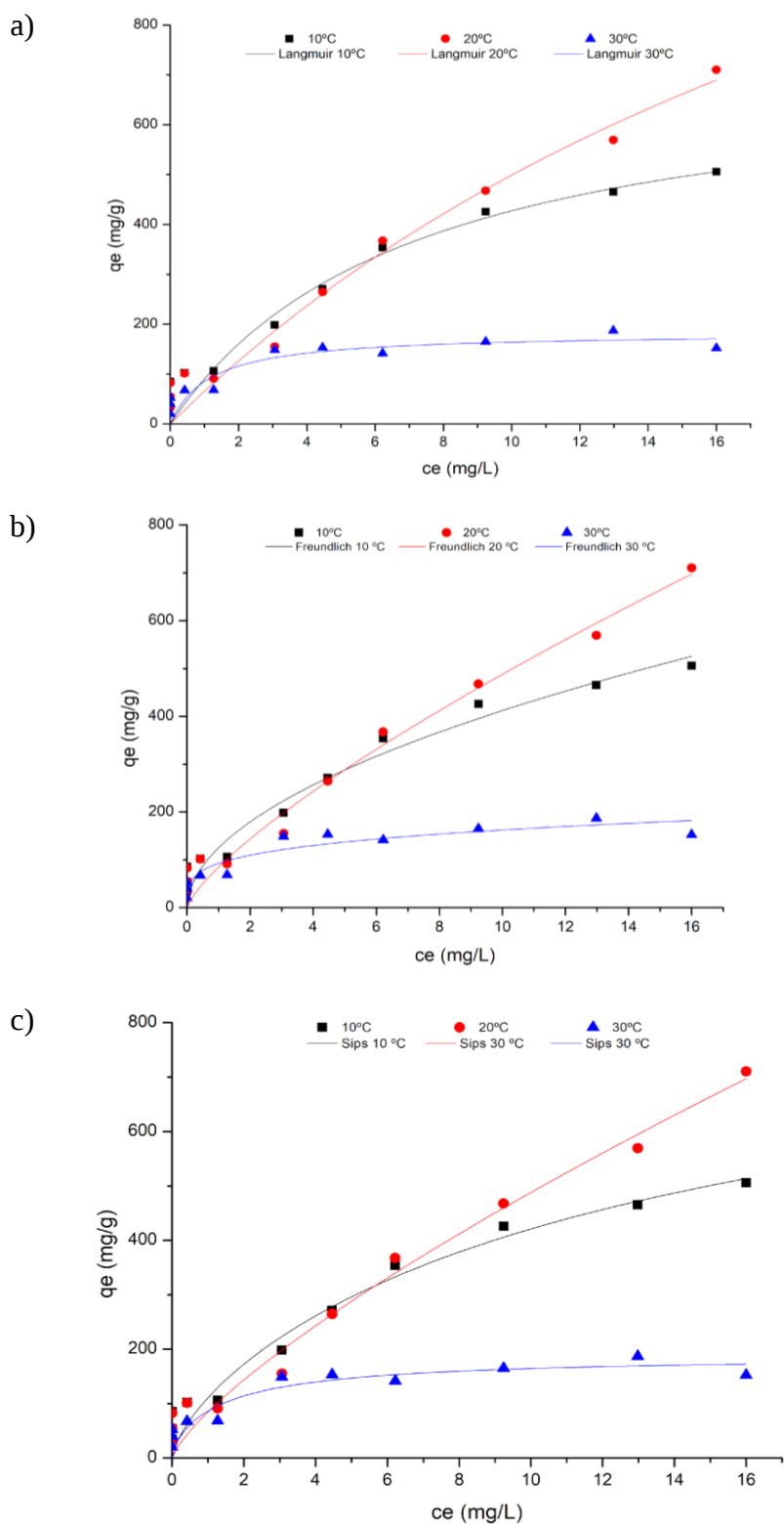
A partir dos dados experimentais adquiridos, construiu-se um gráfico relacionando a quantidade de corante adsorvido e a concentração da fase líquida, ambos no equilíbrio. Esses dados foram ajustados em diversos modelos de isoterma de adsorção explicitados na Tabela 2. A Figura 12 explicita o gráfico construído, e os parâmetros estimados com o auxílio do software OriginPro 8™.

Tabela 2 - Parâmetros do equilíbrio da adsorção de RD83 em TiO₂

Isoterma	Parâmetros		
	10°C	20°C	30°C
Langmuir	$q_{\text{máx}} = 731,54 \text{ mg. g}^{-1}$	$q_{\text{máx}} = 1895,55 \text{ mg. g}^{-1}$	$q_{\text{máx}} = 182,97 \text{ mg. g}^{-1}$
	$K_L = 0,0482 \text{ L.g}^{-1}$	$K_L = 0,0185 \text{ L.g}^{-1}$	$K_L = 0,4922 \text{ L.g}^{-1}$
	$R^2 = 0,9422$	$R^2 = 0,9604$	$R^2 = 0,7751$
Freundlich	$n = 1,9337$	$n = 1,3162$	$n = 4,1034$
	$K_F = 125,2630 \text{ L.g}^{-1}$	$K_F = 84,8466 \text{ L.g}^{-1}$	$K_F = 92,6416 \text{ L.g}^{-1}$
	$R^2 = 0,9425$	$R^2 = 0,9634$	$R^2 = 0,7458$
Langmuir – Freundlich (Sips)	$q_{\text{máx}} = 904,24 \text{ mg. g}^{-1}$	$q_{\text{máx}} = 55799 \text{ mg. g}^{-1}$	$q_{\text{máx}} = 188,78 \text{ mg. g}^{-1}$
	$R^2 = 0,9392$	$R^2 = 0,9588$	$R^2 = 0,7505$
	$n_s = 0,683$	$n_s = 0,76112$	$n_s = 0,63836$
	$K_s = 0,0484 \text{ L.g}^{-1}$	$K_s = 0,0002 \text{ L.g}^{-1}$	$K_s = 0,415 \text{ L.g}^{-1}$

Fonte: A autora (2024)

Figura 12 - Isotermas da adsorção de RD83 em TiO₂ para a) Langmuir b) Freundlich e c) Sips



Fonte: A autora (2024)

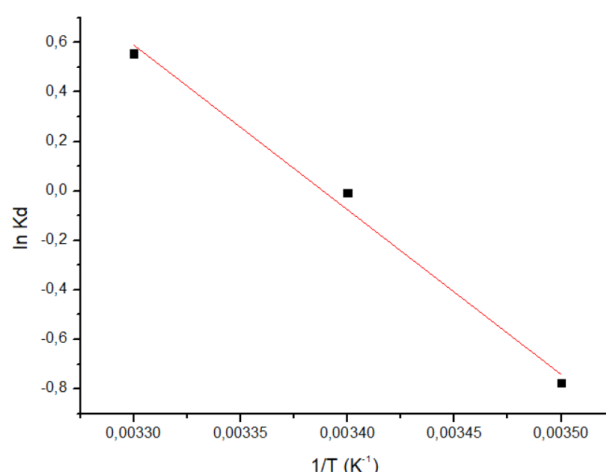
Em relação a natureza da adsorção, os gráficos acima, permitem concluir que, nas condições avaliadas o processo é favorável. Todavia, para além é necessário avaliar os valores das constantes de correlação K_L , para o modelo de Langmuir e K_S para Langmuir - Freundlich. Estes, em conjunto com o valor bastante baixo do R^2 , indicam que o ajuste dos dados experimentais com os modelos supracitados foi insatisfatório e permitem inferir que o mecanismo de adsorção proposto por tais modelos não é adequado para descrever o fenômeno observado.

Quando comparados com a constante de correlação do modelo de Freundlich (K_F), cuja extensão da adsorção, para as temperaturas avaliadas, chegou a ser mil vezes maior, ficou explícito que este é o modelo que melhor explica o fenômeno da adsorção de RD83 em TiO_2 . O modelo sugere que a adsorção ocorre com formação de multicamadas (energias de adsorção diferentes) com interação entre moléculas adsorvidas (SILVA *et al.* 2018). De acordo com a Ho (2004), em média, a adsorção favorável tende a ter o valor de n entre 1 e 10. O valor encontrado para n sugere que há afinidade entre as moléculas do corante pela superfície do adsorvente (LANGMUIR, 1918).

4.2 TERMODINÂMICA DE ADSORÇÃO

Para avaliar a termodinâmica do processo de adsorção do corante RD83 em TiO_2 suportado em placas de PET, utilizou-se os dados do equilíbrio nas 3 temperaturas (10, 20 e 30 °C). Os valores da constante de equilíbrio termodinâmico (K_D), que serão utilizados nos cálculos dos parâmetros termodinâmicos, foram calculados utilizando as concentrações de equilíbrio da fase sólida (q_e) e aquosa (C_e) nas diferentes temperaturas. Após determinação das constantes de equilíbrio, plotou-se o gráfico de Van't Hoff, que demonstrou uma boa correlação linear apresentando um valor de R^2 igual a **0,995** (Figura 13).

Figura 13 - Gráfico de Van't Hoff



Fonte: A autora (2024)

Os valores de ΔH° e ΔS° obtidos a partir do gráfico de Van't Hoff (Figura 13) e o ΔG determinado através da Equação 10, estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros termodinâmicos da adsorção de RD83 em TiO_2 , para concentração de 25 mg. L^{-1}

Temperatura (K)	K_D ($L.g^{-1}$)	ΔG ($kJ.mol^{-1}$)	ΔH ($kJ.mol^{-1}$)	ΔS ($J.K^{-1}.mol^{-1}$)
283,15	0,4607	1953,59		
293,15	0,9918	20,81	55,33	170,85
303,15	1,7438	-1401,54		

Fonte: A autora (2024)

O valor da entalpia (ΔH) positivo, indica um processo de adsorção endotérmico. Isso pode ser atribuído à maior penetração de corantes dentro dos microporos em temperaturas mais altas ou à criação de novos sites ativos. (ALDEGS; ELBARGHOUTH; A ELSHEIKH; WALKER, 2008)

A depender da magnitude da entalpia, é aceito que as ligações com valores inferiores a 84 kJ/mol são, em geral, características do processo de adsorção física, e as intensidades das ligações de quimissorção podem variar de 84 a 420 kJ/mol (FAUST 1981). No entanto, os intervalos de entalpia citados, foram obtidos a partir de estudos de

adsorção gasosa e podendo ou não, se aplicar a soluções aquosas. Alguns pesquisadores sugeriram que a adsorção de soluções aquosas ocorre por um mecanismo de adsorção diferente, que pode não ser classificado nem como adsorção física nem como quimissorção, podendo haver competição de ambos os fenômenos (FAUST, 1981).

Além disso, esperava-se que os processos de adsorção (fase gasosa ou líquida) fossem exotérmicos devido ao calor liberado após a formação de ligações entre o soluto e o adsorvente (MATTSON, 1971; FOUST, 1981; NEWCOMBE, 1997). Todavia, o comportamento observado, é sustentado pelas evidências na literatura (NAMASIVAYAM *et al.*, 2002; ALBERGHINA *et al.* 2000; MOREIRA *et al.* 1998), que descrevem resultados semelhantes de adsorção endotérmica para corantes diretos.

Como esperado, o valor da espontaneidade da reação é influenciado pela temperatura do meio. Para o fenômeno investigado, a espontaneidade, descritos pelos valores de ΔG , foi positivamente influenciada com o aumento da temperatura. Comportamento este, que era esperado devido a característica endotérmica do sistema (QASEM; MOHAMMED; LAWAL, 2021), já estabelecida na análise da entalpia.

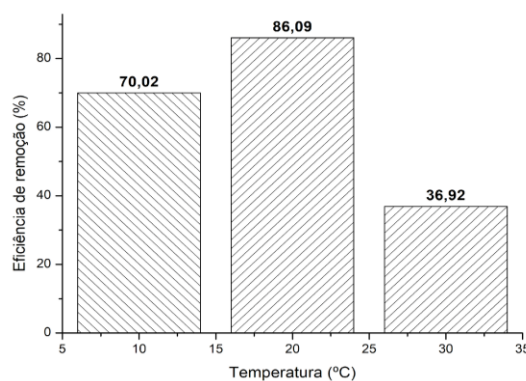
O resultado também pode ser discutido com viés matemático, usando a equação 9, anteriormente apresentada. Para valores de ΔH e ΔS positivos, como os observados experimentalmente, a parcela $T\Delta S$, depende diretamente da temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura mais próximo de um número negativo, será o ΔG .

Vale salientar ainda que, embora a espontaneidade tenha sido favorecida com o aumento da temperatura, a capacidade adsorptiva, como apontado nos resultados das isotermas, decaiu vertiginosamente. De acordo com Al-Ghouti e Al-Absi (2020) isso pode estar ligado a fatores que afetam a superfície do TiO_2 . Os autores sugerem que o aumento da temperatura reduz o processo de adsorção física, pois, ao passo que aumenta a energia cinética das moléculas, facilita também o processo de dessorção, fazendo com que o corante se desloque do poro antes de ser completamente adsorvido.

Em relação à entropia, representada pelos valores de ΔS° , o valor positivo sugere aumento da desordem sólido/líquido durante a adsorção. Isso pode ser atribuído ao aumento da difusão de corantes diretos nos poros da superfície do adsorvente e à criação de novos locais de ligação em temperaturas mais elevadas (ALDEGS, 2007)

O fator decisivo para a escolha das condições operacionais a serem utilizadas no estudo cinético deu-se de acordo com a eficiência média de remoção (%), calculada de acordo com a Equação 1. Os dados obtidos, estão abaixo na Figura 14, apontaram que a 20 °C, a eficiência de remoção foi indiscutivelmente maior, portanto, adequado para a otimização do estudo cinético.

Figura 14: Eficiência de remoção (%) do RD83 em TiO₂.

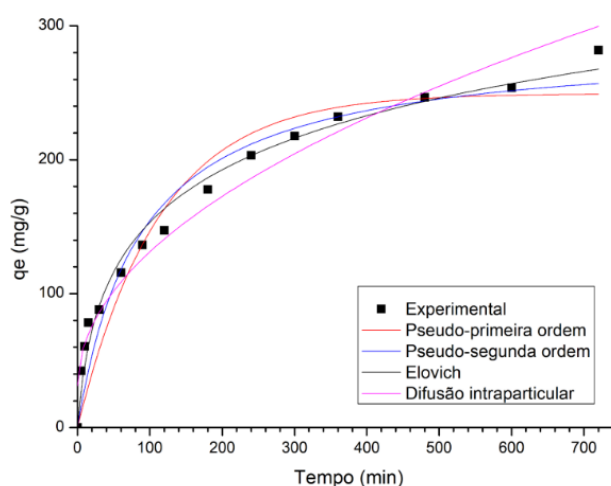


Fonte: A autora (2024)

4.3 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Os dados experimentalmente, para os parâmetros dos modelos avaliados, estão na Tabela 4 e o ajuste pode ser verificado na Figura 15, também abaixo.

Figura 15: Ajuste de dados aos modelos cinéticos na adsorção de RD83 em TiO₂



Fonte: A autora (2024)

Tabela 4 - Parâmetros cinéticos da adsorção de RD83 em TiO₂

Pseudo-primeira ordem				
q_{exp} (mg. g⁻¹) 273,39	q_{e calc} (mg. g⁻¹) 249,39	k₁(min⁻¹) 0,0088	R² 0,91569	-
Pseudo-segunda ordem				
q_{exp} (mg. g⁻¹) 273,39	q_{e calc} (mg. g⁻¹) 287,72	k₂(g.mg. g⁻¹min⁻¹) 4,029x10 ⁻⁵	R² 0,95194	h (mg. g⁻¹ min⁻¹) 3,3353
Elovich				
β (g.min⁻¹) 0,0166	α(mg. g⁻¹min⁻¹) 7,1140	R² 0,98442	-	-
Difusão Intraparticular				
C (mg. g⁻¹) 10,0059	K_d (mg. g⁻¹ min^{-0,5}) 31,1395	R² 0,9696	-	-

Fonte: A autora (2024)

Os parâmetros calculados e o ajuste de R² explicitados, permitem inferir que o modelo que melhor descreve o fenômeno estudado, é o modelo de Elovich. Para este, os parâmetros de α e β, indicam respectivamente sobre a adsorção e dessorção no poro do adsorvente.

É importante ressaltar que, os resultados aqui observados estão em concordância com os dados do estudo termodinâmico. Quando comparado com a constante de adsorção (α), o valor da constante de dessorção (β), é expressivamente maior. (SILVA et al., 2018). afirma valores altos de β e α baixos sugerem que o processo envolve etapas de adsorção física. Vale salientar, ainda que o modelo de Elovich não preveja um mecanismo definitivo, é útil em descrever processos de adsorção em superfícies heterogêneos (DENG et al., 2023).

Para os outros modelos avaliados, ainda que os de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, tenham apresentado pouca divergência entre a capacidade máxima de adsorção calculada *versus* experimental, os valores de R² apontam para o ajuste insatisfatório dos dados experimentais e o proposto por tais modelos, fazendo com

que estes não sejam suficientes para elucidar sobre a adsorção de RD83 nas condições estudadas.

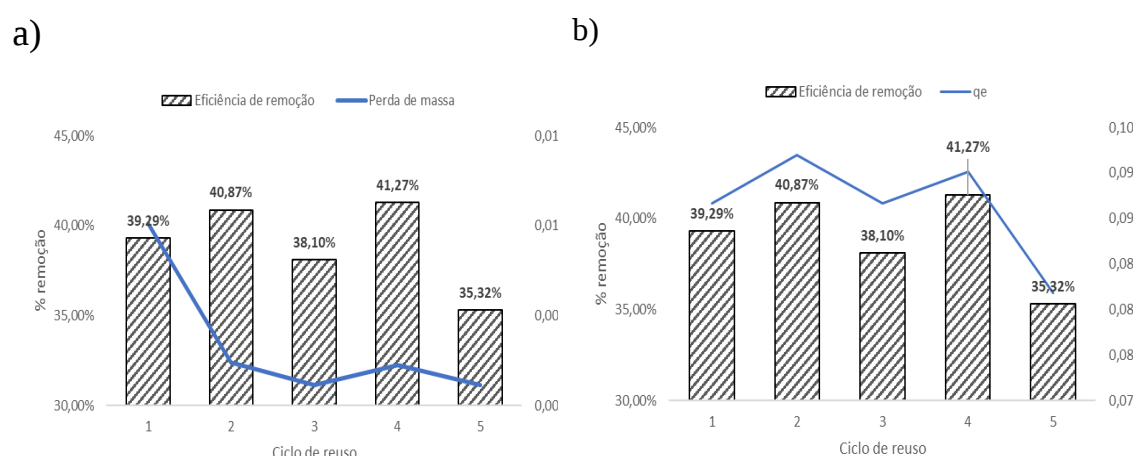
Diferentes etapas estão envolvidas na movimentação do adsorvato em solução para a superfície do adsorvente. O mecanismo pode ser regido por uma única etapa ou uma combinação de variados processos, sendo assim, num experimento em batelada, que envolve agitação, difusão no filme, e difusão intraparticular, uma mistura destes pode ser a etapa determinante da velocidade da reação (ALDEGS, 2007).

Em especial a análise do modelo de Difusão-Intraparticular, apontou para uma baixa correlação de R^2 e valores dos coeficientes também foram baixos. Permitindo inferir que o processo de adsorção do RD83 em TiO_2 não depende apenas da difusão intraparticular, mas outros mecanismos podem estar envolvidos.

4.4 REUSO DO FOTOCATALIZADOR

Por fim, a possibilidade de reuso do fotocatalisadores também foi acompanhada, na Figura 16, pode-se verificar a eficácia da metodologia de reuso empregada, através da eficiência de remoção, capacidade adsortiva (q_e) e, perda de massa do adsorvente, acompanhadas.

Figura 16: Ciclos de reuso vs a) eficiência de remoção b) capacidade de adsorção (q_e)



Fonte: A autora (2024)

Os resultados obtidos do reuso, indicam que a perda de massa foi menor que 0,01% entre ciclos apontando para a estabilidade do fotocatalisadores no substrato e ótima

aderência do filme de TiO_2 . A baixa perda de massa entre ciclos de reuso, implica também para uma boa impregnação do filme de TiO_2 na superfície do substrato de PET. Característica de suma importância em um método de reuso de catalisadores imobilizados.

Ainda que seja notável a uma pequena diminuição da eficiência de remoção, a capacidade adsorptiva do adsorvente manteve-se relativamente estável até o último ciclo de reuso, indicando novamente para a eficiência do TiO_2 como adsorvente. A redução da capacidade adsorptiva baixa degradação do corante na superfície, devido a insuficiência na exposição à radiação UV.

As diferenças quanto a eficiência entre placas, pode ser atribuída à variabilidade da incidência de raios UV sob as placas, quando comparado a eficiência do primeiro reuso com o último, 38% e 35,52% respectivamente, verifica-se uma diminuição de ordem bastante pequena, cerca de 3%, mais uma vez apontando para a estabilidade do método de reuso.

Com relação à degradação sob luz solar, a Figura 17, mostra um comparativo entre as placas após o primeiro ciclo. Nota-se que a placa que foi exposta a luz solar ainda apresenta pontos de alta cobertura do corante, enquanto que esse comportamento não foi observado na placa que esteve sob luz artificial, indicando a degradação parcial do corante. A isso, atribui-se às condições climáticas no dia do experimento, o céu coberto por nuvens e a instabilidade do tempo, foram interferências no resultado do estudo.

Figura 17 - Placas após a) adsorção b) regeneração UV artificial c) regeneração UV solar



Fonte: A autora (2024)

5. CONCLUSÃO

O estudo do equilíbrio de adsorção mostrou que o modelo de Freundlich se ajustou muito bem aos dados experimentais, apresentando valores de R^2 superiores a 0,96 na temperatura de 20°C e em comparação com os outros modelos obteve a maior constante de correlação (K_F), superando em mil vezes as constantes observadas nos outros modelos avaliados.

A cinética se ajustou melhor ao modelo cinético de Elovich, com ajuste R^2 com valores superiores a 0,98 e valores de das constantes de adsorção e dessorção indicando apontando para a possibilidade de etapas de adsorção física.

O estudo termodinâmico da adsorção do RD83 em TiO_2 permitiu inferir que o processo é de natureza endotérmica, espontâneo apenas para a temperatura de 30 °C e o valor positivo da entropia (ΔS), aponta para o aumento da desordem do sistema com o aumento da temperatura. Apontamentos estes que, de forma geral, são incomuns aos corantes. Todavia, para os corantes diretos, estudos recentes sobre o tema suportam os dados obtidos e o comportamento observado.

A diminuição da capacidade adsorptiva, em conjunto com o comportamento endotérmico, aumento da espontaneidade e desordem do sistema, se mostrou um desafio no estudo do fenômeno da adsorção do RD83. O comportamento contraditório observado é mais um indicativo da complexidade do fenômeno da adsorção.

. Os ensaios de reuso indicaram a manutenção da eficiência média de remoção em 38,86%, com pouca perda de massa, cerca de 3,23%. Tais resultados apontam que, a aplicação de fotocatalise para recuperação e a reutilização do adsorvente TiO_2 imobilizado em placa de PET, é uma metodologia viável, estável, para as condições estudadas e, eficaz para os desafios que o tratamento de efluentes desse setor, apresenta, uma vez que ao aplicá-la, reduz-se a quantidade de resíduo final e o custo global do processo.

REFERÊNCIAS

- A., Carmalin Sophia; LIMA, Eder C. Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, [S.L.], v. 150, p. 1-17, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.026>.
- ALBERGHINA, Gaetano; BIANCHINI, Roberto; FICHERA, Maria; FISICHELLA, Salvatore. Dimerization of Cibacron Blue F3GA and other dyes: influence of salts and temperature. *Dyes and Pigments*, [S.L.], v. 46, n. 3, p. 129-137, set. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0143-7208\(00\)00045-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0143-7208(00)00045-0).
- ALDEGS, Y.; ELBARGHOUTH, M.; A. ELSHEIKH; WALKER, G. Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. *Dyes and Pigments*, [S.L.], v. 77, n. 1, p. 16-23, 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dyepig.2007.03.001>.
- AL-GHOUTI, Mohammad A.; AL-ABSI, Rana S. Mechanistic understanding of the adsorption and thermodynamic aspects of cationic methylene blue dye onto cellulosic olive stones biomass from wastewater. *Scientific Reports*, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 1-18, 28 set. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-72996-3>.
- ALI, Hassan; YASIR, Muhammad; MASAR, Milan; SULY, Pavol; SOPIK, Tomas; ZUBAIR, Mukarram; MONTEIRO, Olinda C.; MACHOVSKY, Michal; SEDLARIK, Vladimir; KURITKA, Ivo. Titanium dioxide and halloysite loaded polylactic acid-based membrane continuous flow photoreactor for 17 α -ethinylestradiol (EE2) hormone degradation: optimization, kinetics, mechanism, and reusability study. *Catalysis Today*, [S.L.], v. 432, p. 114602, abr. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114602>.
- ALI, Hazrat. Biodegradation of Synthetic Dyes—A Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, [S.L.], v. 213, n. 1-4, p. 251-273, 30 mar. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-010-0382-4>.
- ALI, R. K.; HULYA, K. Adsorption of Pb(II) ions from aqueous solution by native and activated bentonite: Kinetic, equilibrium and thermodynamic study. *Journal of Hazardous Materials*, v. 179, p. 332-339, 15 jul. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410003158>.
- ALLEN, S.; KOUMANOVA, B. Decolourization of water/wastewater using adsorption. *Journal of Universal Chemical Technology and Metallurgy*, 2005, v. 40, p. 175–192.
- AL-MAMUN, M.R.; KADER, S.; ISLAM, M.s.; KHAN, M.Z.H. Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: a review. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, [S.L.], v. 7, n. 5, p. 103248, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2019.103248>.

ALMEIDA, L. C.; ECHAVE, F. J.; SANZ, O.; CENTENO, M. A.; ODRIOZOLA, J. A.; MONTES, M. Washcoating of metallic monoliths and microchannel reactors. *Studies in Surface Science and Catalysis*, v. 175, p. 25-33, 2010.

AMETA, Suresh C. Introduction. *Advanced Oxidation Processes For Waste Water Treatment*, [S.L.], p. 1-12, 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-810499-6.00001-2>.

ANDRADE, Bruno Alves de; ROCHA, Roberta de Moraes; MOURA, Klebson Humberto de Lucena. Distribuição espacial da indústria têxtil e de confecção em Pernambuco: qual a influência dos fatores locais? *Revista Economia e Desenvolvimento*, Recife, v. 15, n. 1, p. 93-112, jan. 2016.

ARAUJO, A. L. P.; SILVA, M. C. C.; GIMENES, M. L.; BARROS, M. A. S. D. Estudo Termodinâmico da Adsorção de Zinco em Argila Bentonita Bofe Calcinada. *Scientia Plena*, v. 5, n. 12, p. 1-6, 2009.

AZANAW, Aklilu; BIRLIE, Bantamlak; TESHOME, Bayu; JEMBERIE, Muluken. Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies In Chemical And Environmental Engineering*, [S.L.], v. 6, p. 100230, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csee.2022.100230>.

AZIZIAN, Saeid. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *Journal Of Colloid And Interface Science*, [S.L.], v. 276, n. 1, p. 47-52, ago. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2004.03.048>.

BENKHAYA, Said; M'RABET, Souad; HARFI, Ahmed El. Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. *Heliyon*, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 03271, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03271>.

BONETTO, Luis Rafael. Estudo da adsorção do corante azul de metileno por um resíduo sólido da indústria do suco de maçã. 2016. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

BORGES, S. S.; XAVIER, L. P. S.; SILVA, A. C.; AQUINO, S. F. Imobilização de dióxido de titânio em diferentes materiais suporte para o emprego em fotocatalise heterogênea. *Quimica Nova*, v. 39, n. 7, p. 836-844, 2016.

BORGES, S. S.; XAVIER, L. P. S.; SILVA, A. C.; AQUINO, S. F. Imobilização de dióxido de titânio em diferentes materiais suporte para o emprego em fotocatalise heterogênea. *Quimica Nova*, v. 39, n. 7, p. 836-844, 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 mai. 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/portas/portal/sistemas/conama/resolucoes/2011/430.pdf>. Acesso em: 20 NOV. 2024.

BRIÃO, Giani de Vargas; HASHIM, Mohd Ali; CHU, Khim Hoong. The Sips isotherm equation: often used and sometimes misused. *Separation Science And Technology*, [S.L.],

v. 58, n. 5, p. 884-892, 31 jan. 2023. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01496395.2023.2167662>.

CAI, Chun; ZHANG, Hui; ZHONG, Xin; HOU, Liwei. Electrochemical enhanced heterogeneous activation of peroxydisulfate by Fe–Co/SBA-15 catalyst for the degradation of Orange II in water. *Water Research*, [S.L.], v. 66, p. 473-485, dez. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.039>.

CÁMARA, R.M.; PORTELA, R.; GUTIÉRREZ-MARTÍN, F.; SÁNCHEZ, B. Photocatalytic activity of TiO₂ films prepared by surfactant-mediated sol–gel methods over commercial polymer substrates. *Chemical Engineering Journal*, v. 283, p. 535-543, 2016.

CAO, Zaizhi; ZHU, Tengyi. The applications of porous FO membranes and polyelectrolyte draw solution in the high-salinity organic wastewater treatment with a hybrid forward osmosis-membrane distillation system. *Journal Of Applied Polymer Science*, [S.L.], v. 140, n. 1, p. 26-35, 25 out. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/app.53266>.

CARDOSO, N. F.; PINTO, R. B.; LIMA, E. C.; CALVETE, T.; AMAVISCA, C. V.; ROYER, B.; CUNHA, M. L.; FERNANDES, T. H. M.; PINTO, I. S. Removal of remazol black B textile dye from aqueous solution by adsorption. *Desalination*, n. 269, p. 92–103, 2011.

CARVALHO, C. L.; VARELA, J. A. Construção e caracterização de um equipamento para deposição de Filmes pela Técnica de “Dip Coating”. *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, v. 14, n. 4, p. 115-119, 1999.

CARVALHO, J. A. Fotodegradação catalítica de dimetil sulfeto em fase gasosa usando plástico e vidro como suporte para o TiO₂. *Dissertação de Mestrado*. Campo dos Goytacazes, RJ: UENF, 2008.

CARVALHO, T. E. M. Adsorção de corantes aniônicos de solução aquosa em cinza leve de carvão e zeólita de cinza leve de carvão. *Dissertação de Mestrado*. São Paulo, SP: UNIFESP, 2010.

Cavalcanti, A.M.; Santos, G.F. A indústria têxtil no Brasil: uma análise da importância da competitividade frente ao contexto mundial. *Exacta*, v. 20, n. 3, p. 706-726, jul./set. 2022. <https://doi.org/10.5585/exactaep.2021.17784>. Acesso em: 13 de agosto de 2024.

CETESB. (2021). Relatório de Sustentabilidade 2021. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://www.cetesb.gov.br/sustentabilidade>.

CHEUNG, W.H.; SZETO, Y.S.; MCKAY, G. Intraparticle diffusion processes during acid dye adsorption onto chitosan. *Bioresource Technology*, [S.L.], v. 98, n. 15, p. 2897-2904, nov. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.045>.

CIOLA, R. Fundamentos da catálise. São Paulo: Moderna, 1981.

CLARKE, E. A.; ANLIKER, R. Organic dyes and pigments. In: The Handbook of Environmental Chemistry. 1980; v. 3, p. 181-215.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 2005. Resolução no 357, de 17 de março de 2005. 053. ed. Distrito Federal, 18 mar. 2005. Seção 2, p. 58-63.

COSTA, A. C. R.; ROCHA, E. R. P. Panorama da cadeia produtiva têxtil e de confecções e a questão da inovação. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 161, mar. 2009. Disponível em: . Acesso em: 25 ago. 2021.

COTILLAS, S.; CLEMATIS, D.; CAÑIZARES, P.; CARPANSE, M. P.; RODRIGO, M. A.; PANIZZA, M. Degradation of dye Procion Red MX-5B by electrolytic and electroirradiated technologies using Diamond electrodes. Chemosphere. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.001>.

Crepaldi, Ricardo. (2022). QAI, COV, Poluição e Nano TiO₂: estudo de fotodegradação de benzeno por nano TiO₂ em revestimento cerâmico comercial e assistida por radiação ultravioleta. 10.48021/978-65-252-4648-2.

DALPONTE, I.; MATHIAS, A. L.; JORGE, R. M. M.; WEINSCHUTZ, R. Degradação fotocatalítica de tartrazina com TiO₂ imobilizado em esferas de alginato. *Química Nova*, v. 39, n. 10, p. 1165-1169, 2016.

DAVIES, Evan G.R.; SIMONOVIC, Slobodan P. Global water resources modeling with an integrated model of the social–economic–environmental system. *Advances In Water Resources*, [S.L.], v. 34, n. 6, p. 684-700, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.02.010>.

DENG, Fengxia; BRILLAS, Enric. Advances in the decontamination of wastewaters with synthetic organic dyes by electrochemical Fenton-based processes. *Separation And Purification Technology*, [S.L.], v. 316, p. 123764, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123764>.

DINIZ, C. C.; BASQUES, M. F. D. A industrialização nordestina recente e suas perspectivas. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2003.

DOTTO, G. L.; VIEIRA, M. L. G.; GONÇALVES, J. O.; PINTO, L. A. A. Remoção dos corantes azul brilhante, amarelo crepúsculo e amarelo tartrazina de soluções aquosas utilizando carvão ativado, terra ativada, terra diatomácea, quitina e quitosana: estudos de equilíbrio e termodinâmica. *Química Nova*, v. 34, n. 7, p. 1193-1199, 2011.

ELTAWEIL, Abdelazeem S.; HARBY, Nouf Al; OSMAN, Ahmed I.; ALRASHEEDI, Muneera; SU, Yiming; EL-MONAEM, Eman M. Abd. Engineering of a wafer-shaped titanium-based catalyst of TiO₂/MIL-125(Ti)@Ti₃C₂ for enhanced Fenton-like degradation of Congo red: optimization, mechanistic study, and reusability. *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry*, [S.L.], p. 327-345, set. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2024.09.017>.

Engin Koncagül (ed.). Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2024: o valor da água; fatos e dados. na: Unesco World Water Assessment Programme, 2021. 11 p. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por. Acesso em: 01 ago. 2024.

Faust, S.; Aly, O. Adsorption processes for water treatment. Butterworth Publishers, 1987.

FEBRIANTO, Jonathan; KOSASIH, Aline Natasia; SUNARSO, Jaka; JU, Yi-Hsu; INDRASWATI, Nani; ISMADJI, Suryadi. Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: a summary of recent studies. *Journal Of Hazardous Materials*, [S.L.], v. 162, n. 2-3, p. 616-645, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.042>.

FEBRIANTO, Jonathan; KOSASIH, Aline Natasia; SUNARSO, Jaka; JU, Yi-Hsu; INDRASWATI, Nani; ISMADJI, Suryadi. Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: a summary of recent studies. *Journal of Hazardous Materials*, [S.L.], v. 162, n. 2-3, p. 616-645, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.042>.

FERNÁNDEZ, Emilio; MÉNDEZ-MARTÍNEZ, Gonzalo; SOTO-OÑATE, David; SUÁREZ-EIROA, Brais. Operational principles of circular economy for sustainable development: linking theory and practice. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 214, p. 952-961, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.271>.

FIEG. Relatório sobre o posicionamento da Indústria Brasileira 2018. Goiânia.

FREUNDLICH, H. 1909. The theory of adsorption. *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide*, vol. 3, p. 212-220.

FREUNDLICH, H. 1909. The theory of adsorption. *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide*, vol. 3, p. 212-220.

FU, Y.; VIRARAGHAVAN, T. Fungal decolorization of dye wastewaters: a review. *Bioresource Technology*, 2001; v. 79, p. 251-62.

G. Hole; A.S. Hole. Improving recycling of textiles based on lessons from policies for other recyclable materials: a minireview. *Sustainable Production and Consumption*, v. 23, p. 42–51, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.04.005>.

GENG, Yong; FU, Jia; SARKIS, Joseph; XUE, Bing. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 216-224, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>.

GILES, C. H.; MACEWANS, T. H; NAKHWA, N.; SMITH, D. Studies in adsorptions. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific areas of solids. *Journal of the Chemical Society*, p. 3973-3993, 1960.

GILPAVAS, Edison; DOBROSZ-GÓMEZ, Izabela; GÓMEZ-GARCÍA, Miguel-Ángel. Optimization and toxicity assessment of a combined electrocoagulation, H₂O₂/Fe²⁺/UV and activated carbon adsorption for textile wastewater treatment. *Science Of The Total Environment*, [S.L.], v. 651, p. 551-560, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.125>.

GOMES, G. H. M. Preparação e caracterização de filmes finos de TiO₂ dopados com nióbio pelo método sol-gel. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2017.

GUIMARÃES NETO, L. Introdução à formação econômica do Nordeste. Recife: Massangana, 1989.

GUZ, Ricardo; TIBURTIUS, Elaine Regina Lopes; PESSÔA, Christiana Andrade. Association of adsorption and heterogeneous photocatalysis in the degradation of Tartrazine yellow dye with CuNb₂O₆ synthesized and immobilized on chitosan membranes. *Inorganic Chemistry Communications*, [S.L.], v. 152, p. 110645, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110645>.

HE, Jie; CHEN, Juanrong; LIU, Shunan; LIN, Liyuan; ZHANG, Ying; XIAO, Sisi; CAO, Shunsheng. Activated carbon modified titanium dioxide/bismuth trioxide adsorbent: one-pot synthesis, high removal efficiency of organic pollutants, and good recyclability. *Journal Of Colloid And Interface Science*, [S.L.], v. 648, p. 1034-1043, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2023.05.206>.

HO, Y. Isotherms for the sorption of lead onto peat: comparison of linear and non-linear methods. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 15, n. 1, p. 81-86, 2006. Disponível em: [link].

HO, Y. S. Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. *Scientometrics*, v. 59, n. 1, p. 171-177, 2004.

HOSSAIN, Laila. Water Footprint Assessment of RMG Sector of Bangladesh. 2017. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Chemical Engineering, Bangladesh University Of Engineering & Technology, Bangladesh, 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Industrial Anual (PIA): Valor bruto da produção industrial (mil reais), Fabricação de produtos têxteis, 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1849>. Acesso em: 08 de agosto de 2024.

KANG, Abbass Jafari; BROWN, Alistair K.; WONG, Charles S.; YUAN, Qiuyan. Removal of antibiotic sulfamethoxazole by anoxic/anaerobic/oxic granular and suspended activated sludge processes. *Bioresource Technology*, [S.L.], v. 251, p. 151-157, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.021>.

KARAOĞLU, M. H.; DOĞAN, M.; ALKAN, M. Removal of Reactive Blue 221 by Kaolinite from Aqueous Solutions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 49, n. 4, p. 1534–1540, 2010.

KARAOĞLU, M. H.; DOĞAN, M.; ALKAN, M. Removal of Reactive Blue 221 by Kaolinite from Aqueous Solutions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 49, n. 4, p. 1534–1540, 2010.

KARYPIDIS, Michail; AIKATERINI PAPADAKI; STALIKA, Amalia. An overview of the available water textile effluent treatments. Unpublished, [S.L.], p. 327-345, ago. 2023. Unpublished. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27779.48165>.

KINNIBURGH, David G. General purpose adsorption isotherms. *Environmental Science & Technology*, [S.L.], v. 20, n. 9, p. 895-904, set. 1986. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es00151a008>.

Kumar, P.; Pavithra, K.G. Water and textiles. In: MUTHU, S. (Ed.), *Water in Textiles and Apparel: Consumption, Footprint, and Life Cycle Assessment*, Woodhead Publishing Ltd., 2019, pp. 21–40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102633-5.00002-6>.

LAGERGREN, S. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. Handlingar*, v. 24, p. 1-39, 1898.

LANGMUIR, I. 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, v. 40, p. 1361-1402.

LANGMUIR, I. 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, v. 40, p. 1361-1402.

HKORIĆ, Marija Lučić; TERZIĆ, Ivan; MILOSAVLJEVIĆ, Nedeljko; RADETIĆ, Maja; LAPONJIĆ, Zoran; RADOIČIĆ, Marija; KRULIĆ, Melina Kalagasidis. Chitosan-based microparticles for immobilization of TiO₂ nanoparticles and their application for photodegradation of textile dyes. *European Polymer Journal*, [S.L.], v. 82, p. 57-70, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.06.026>.

LOUHICHI, Boulbaba; GAIED, Faïçal; MANSOURI, Khaled; JEDAY, Mohamed Razak. Treatment of textile industry effluents by Electro-Coagulation and Electro-Fenton processes using solar energy: a comparative study. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 427, p. 131735, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2021.131735>.

MAGDALENA, C. P. Adsorção de corante reativo remazol vermelho RB de solução aquosa usando zeólita de cinzas de carvão e avaliação da toxicidade aguda com *Daphnia Similis*. Dissertação de Mestrado. São Paulo, SP: UNIFESP, 2010.

MAGDALENA, C. P. Adsorção de corante reativo remazol vermelho RB de solução aquosa usando zeólita de cinzas de carvão e avaliação da toxicidade aguda com *Daphnia Similis*. Dissertação de Mestrado. São Paulo, SP: UNIFESP, 2010.

MARTÍNEZ-LÓPEZ, Sofía; LUCAS-ABELLÁN, Carmen; SERRANO-MARTÍNEZ, Ana; MERCADER-ROS, María Teresa; CUARTERO, Nerea; NAVARRO, Patricia; PÉREZ, Sandra; GABALDÓN, José Antonio; GÓMEZ-LÓPEZ, Vicente M. Pulsed light for a cleaner dyeing industry: azo dye degradation by an advanced oxidation process driven by pulsed light. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 217, p. 757-766, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.230>.

Mattson, J.; Mark, H. *Activated carbon: surface chemistry and adsorption from solution*. New York: Marcel Dekker, Inc.; 1971.

MCKAY, G. Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewaters. Boca Raton: CRC Press, 1996.

MCKAY, G. Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewaters. Boca Raton: CRC Press, 1996.

MENDES JUNIOR, Biagio de Oliveira. Setor têxtil – produção, comércio internacional e perspectivas para Brasil, Nordeste, Ceará e Pernambuco em 2021. 185. ed. Fortaleza: Banco do Nordeste Brasil, 2021.

MIRANDA, S. M.; LOPES, F. V. S.; SILVA, C. R.; MARTINS, S. D. S.; SILVA, A. M. T.; FARIA, J. L.; BOAVENTURA, R. A. R.; VILAR, V. J. P. Solar photocatalytic gas-phase degradation of n-decane—a comparative study using cellulose acetate monoliths coated with P25 or sol-gel TiO₂ films. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 22, p. 820–832, 2015.

MORAIS, W. A. Estudo de sorção de um corante aniônico modelo em partículas de quitosana reticulada. Dissertação de Mestrado. Natal, RN: UFRN, 2007.

MORAIS, W. A. Estudo de sorção de um corante aniônico modelo em partículas de quitosana reticulada. Dissertação de Mestrado. Natal, RN: UFRN, 2007.

NAMASIVAYAM, C.; KAVITHA, D. Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste. *Dyes and Pigments*, [S.L.], v. 54, n. 1, p. 47-58, jul. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0143-7208\(02\)00025-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0143-7208(02)00025-6).

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do. ADSORÇÃO: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2020. 309 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Carla-Vidal-7/publication/343583922_Adsorcao_Aspectos_Teoricos_e_Aplicacoes_Ambientais_2ed/links/5f32a8fda6fdcccc43c03d65/Adsorcao-Aspectos-Teoricos-e-Aplicacoes-Ambientais-2ed.pdf.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do. Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2020. 309 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Carla-Vidal-7/publication/343583922_Adsorcao_Aspectos_Teoricos_e_Aplicacoes_Ambientais_2ed/links/5f32a8fda6fdcccc43c03d65/Adsorcao-Aspectos-Teoricos-e-Aplicacoes-Ambientais-2ed.pdf.

NASSAR, E. J.; CIUFFI, K. J. Filmes de titânio-silício preparados por “spin” e “dip-coating”. *Química Nova*, v. 26, n. 5, p. 674-677, 2003.

NEGASH, Almaz; TIBEBE, Dessie; MULUGETA, Marye; KASSA, Yezbie. A study of basic and reactive dyes removal from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation process. *South African Journal Of Chemical Engineering*, [S.L.], v. 46, p. 122-131, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajce.2023.07.015>.

NEGRETE, Juan David Cruz; NEGRETE, Juan David Cruz; LÓPEZ, Valentina Navarro. A Sustainability Overview of the Supply Chain Management in Textile Industry. *International Journal Of Trade, Economics And Finance*, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 92-97, out. 2020. EJournal Publishing. <http://dx.doi.org/10.18178/ijtef.2020.11.5.673>.

NEMR, Ahmed El; SHOAIB, Amany G. M.; SIKAILY, Amany El; MOHAMED, Alaa El-Deen A.; HASSAN, Asaad F. Evaluation of Cationic Methylene Blue Dye Removal by High Surface Area Mesoporous Activated Carbon Derived from *Ulva lactuca*. *Environmental Processes*, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 311-332, 13 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40710-020-00487-8>.

NEWCOMBE, G.; DRIKAS, M. Adsorption of NOM onto activated carbon: electrostatic and non-electrostatic effects. *Carbon*, [S.L.], v. 35, n. 9, p. 1239-1250, 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-6223\(97\)00078-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-6223(97)00078-x).

OMAR, Mohammad H.H.; ELFARASH, Ameer Effat M.; EL-AREF, Hamdy Mohamed; AL-HAKKANI, Mostafa F. Role of biosynthesized titanium dioxide nanoparticles in antibacterial activity and cefoperazone removal from pharmaceutical wastewater. *Process Biochemistry*, [S.L.], v. 142, p. 162-174, jul. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2024.04.011>.

OMAR, Mohammad H.H.; ELFARASH, Ameer Effat M.; EL-AREF, Hamdy Mohamed; AL-HAKKANI, Mostafa F. Role of biosynthesized titanium dioxide nanoparticles in antibacterial activity and cefoperazone removal from pharmaceutical wastewater. *Process Biochemistry*, [S.L.], v. 142, p. 162-174, jul. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2024.04.011>.

PAREDES, L.; FERNANDEZ-FONTAINA, E.; LEMA, J.M.; OMIL, F.; CARBALLA, M. Understanding the fate of organic micropollutants in sand and granular activated carbon biofiltration systems. *Science Of The Total Environment*, [S.L.], v. 551-552, p. 640-648, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.008>.

PAREDES, L.; FERNANDEZ-FONTAINA, E.; LEMA, J.M.; OMIL, F.; CARBALLA, M. Understanding the fate of organic micropollutants in sand and granular activated carbon biofiltration systems. *Science of the Total Environment*, [S.L.], v. 551-552, p. 640-648, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.008>.

PELLICER, José A.; RODRÍGUEZ-LÓPEZ, María I.; FORTEA, María I.; LUCAS-ABELLÁN, Carmen; MERCADER-ROS, María T.; LÓPEZ-MIRANDA, Santiago; GÓMEZ-LÓPEZ, Vicente M.; SEMERARO, Paola; COSMA, Pinalysa; FINI, Paola. Adsorption Properties of β - and Hydroxypropyl- β -Cyclodextrins Cross-Linked with Epichlorohydrin in Aqueous Solution. A Sustainable Recycling Strategy in Textile Dyeing Process. *Polymers*, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 252, 2 fev. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym11020252>.

Qasem, N. A. A.; Mohammed, R. H.; Lawal, D. U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *npj Clean Water*, v. 4, p. 36, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>.

QI, Chengdu; LIU, Xitao; LIN, Chunye; ZHANG, Xiaohui; MA, Jun; TAN, Haobo; YE, Wan. Degradation of sulfamethoxazole by microwave-activated persulfate: kinetics, mechanism and acute toxicity. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 249, p. 6-14, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.086>.

RAJ, Sankalp; SINGH, Hemant; BHATTACHARYA, Jayanta. Treatment of textile industry wastewater based on coagulation-flocculation aided sedimentation followed by adsorption: process studies in an industrial ecology concept. *Science Of The Total Environment*, [S.L.], v. 857, p. 159464, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159464>.

RATHOUR, Rohit; JAIN, Kunal; MADAMWAR, Datta; DESAI, Chirayu. Performance and biofilm-associated bacterial community dynamics of an upflow fixed-film microaerophilic-aerobic bioreactor system treating raw textile effluent. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 295, p. 126380, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126380>.

RAWAT, Deepak; MISHRA, Vandana; SHARMA, Radhey Shyam. Detoxification of azo dyes in the context of environmental processes. *Chemosphere*, [S.L.], v. 155, p. 591-605, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.068>.

RIZZI, Vito; LONGO, Alessandra; FINI, Paola; SEMERARO, Paola; COSMA, Pinalysa; FRANCO, Esther; GARCÍA, Rocío; FERRÁNDIZ, Marcela; NÚÑEZ, Estrella; GABALDÓN, José Antonio. Applicative Study (Part I): the excellent conditions to remove in batch direct textile dyes (direct red, direct blue and direct yellow) from aqueous solutions by adsorption processes on low-cost chitosan films under different conditions. *Advances In Chemical Engineering And Science*, [S.L.], v. 04, n. 04, p. 454-469, 2014. Scientific Research Publishing, Inc. <http://dx.doi.org/10.4236/aces.2014.44048>.

ROLAND GEYER et al. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 2017, 3, e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.

SALES, P. B. P. Desenvolvimento de fotocatalisadores à base de TiO₂ em microfotorreator tubular irradiado através de uma face. Dissertação de Mestrado. Recife, PE: UFPE, 2010.

SILVA, J. R. et al. Avaliação da toxicidade de corantes têxteis em águas residuais: um estudo de caso. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 8, n. 2, p. 123-130, 2020. DOI: 10.1590/1982-21702020v8n2a1.

SILVA, José E. da; RODRIGUES, Francisco I. L.; PACÍFICO, Sara N.; SANTIAGO, Leonardo F.; MUNIZ, Celio R.; SARAIVA, Gilberto D.; NASCIMENTO, Ronaldo F. do; SOUSA NETO, Vicente de O.. Study of Kinetics and Adsorption Equilibrium Employing Chemically Modified Coconut Shell for the Removal of Pb(II) from Synthetic Bath. *Revista Virtual de Química*, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 1248-1262, 2018. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180086>.

SOUSA, Mayra Paula de Souza e; SOUZA, Cristiane Daliassi Ramos de; NASCIMENTO, Lucas Orleam Nunes do; OLIVEIRA, Mikelle Silva de. Adsorção do corante alaranjado de metila em carvão ativado obtido da casca do cupuaçu. *Research, Society And Development*, [S.L.], v. 12, n. 14, p. 317-345, 17 dez. 2023. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i14.44394>.

SUKMANA, Hadid; BALLAI, Gergő; GYULAVÁRI, Tamás; ILLÉS, Erzsébet; KOZMA, Gábor; KÓNYA, Zoltán; HODR, Cecilia. Hungarian and Indonesian rice husk as bioadsorbents for binary biosorption of cationic dyes from aqueous solutions: a factorial design analysis. *Heliyon*, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 17154, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17154>.

SUKMANA, Hadid; BALLAI, Gergő; GYULAVÁRI, Tamás; ILLÉS, Erzsébet; KOZMA, Gábor; KÓNYA, Zoltán; HODR, Cecilia. Hungarian and Indonesian rice husk as bioadsorbents for binary biosorption of cationic dyes from aqueous solutions: a factorial design analysis. *Heliyon*, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 17154, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17154>.

TU, Yizhou; XU, Guizhou; JIANG, Lu; HU, Xuejiao; XU, Jun; XIE, Xianchuan; LI, Aimin. Amphiphilic hyper-crosslinked porous cyclodextrin polymer with high specific surface area for rapid removal of organic micropollutants. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 382, p. 123015, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2019.123015>.

TURSI, Antonio; BARATTA, Mariafrancesca; EASTON, Thomas; CHATZISYMEON, Efthalia; CHIDICHIMO, Francesco; BIASE, Michele de; FILPO, Giovanni de. Microplastics in aquatic systems, a comprehensive review: origination, accumulation, impact, and removal technologies. *RSC Advances*, [S.L.], v. 12, n. 44, p. 28318-28340, 2022. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d2ra04713f>.

VIANA, Fernando Luiz Emerenciano. A indústria têxtil e de confecções no nordeste: características, desafios e oportunidades. Fortaleza: BNB, 2005. (Série Documentos do ETENE, n.6).

VIANA, Fernando Luiz Emerenciano. A indústria têxtil e de confecções no nordeste: características, desafios e oportunidades. Fortaleza: BNB, 2005. (Série Documentos do ETENE, n.6).

VÖRÖSMARTY, Charles J.; GREEN, Pamela; SALISBURY, Joseph; LAMMERS, Richard B. Global Water Resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, [S.L.], v. 289, n. 5477, p. 284-288, 14 jul. 2000. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5477.284>.

VÖRÖSMARTY, Charles J.; GREEN, Pamela; SALISBURY, Joseph; LAMMERS, Richard B. Global Water Resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, [S.L.], v. 289, n. 5477, p. 284-288, 14 jul. 2000. American Association

for the Advancement of Science (AAAS).
<http://dx.doi.org/10.1126/science.289.5477.284>.

WANG, F.; SHIH, K. M.; LI, X. Y. *Chemosphere*, 2015, 119, 841–847.

WANG, Jianlong; WANG, Shizong. Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from wastewater: a review. *Journal Of Environmental Management*, [S.L.], v. 182, p. 620-640, nov. 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.049>.

WANG, Jiao; PI, Hemu; ZHAO, Panchao; ZHOU, Na. Efficient removal of methyl orange and ciprofloxacin by reusable Eu–TiO₂/PVDF membranes with adsorption and photocatalysis methods. *Rsc Advances*, [S.L.], v. 14, n. 26, p. 18432-18443, 2024. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d4ra02962c>.

WARDROP, P.; SHIMETA, J.; NUGEGODA, D. N.; MORRISON, P. D.; MIRANDA, A.; TANG, M.; CLARKE, B. O. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50, 4037–4044.

WIJAYAPALA, U. G. Samudrika; SAMARAWICKRAMA, K. G. R. Sustainable Development Approaches for Sri Lankan Textile and Apparel Industry. *Sdgs And Textiles*, [S.L.], p. 1-21, 2024. Springer Nature Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-97-0569-6_1.

WIJAYAPALA, U. G. Samudrika; SAMARAWICKRAMA, K. G. R. Sustainable Development Approaches for Sri Lankan Textile and Apparel Industry. *Sdgs And Textiles*, [S.L.], p. 1-21, 2024. Springer Nature Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-97-0569-6_1.

WU, C.; ZHANG, K.; HUANG, X.; LIU, J. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23, 8819–8826.

YANG, R.; CHRISTENSEN, P. A.; EGERTON, T. A.; WHITE, J. R.; MALTBY, A. Spectroscopic studies of photodegradation of polyethylene films containing TiO₂ nanoparticles. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 119, 2010.

YANG, Yi; OK, Yong Sik; KIM, Ki-Hyun; KWON, Eilhann E.; TSANG, Yiu Fai. Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: a review. *Science Of The Total Environment*, [S.L.], v. 596-597, p 303-320, out. 2017. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.102>.