

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

GABRIELA RODRIGUES DE VASCONCELOS

**UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL (*Agave sisalana*) COMO BIOADSORVENTE  
DO CORANTE TÊXTIL VIOLETA CRISTAL**

JOÃO PESSOA

2020

GABRIELA RODRIGUES DE VASCONCELOS

**UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL (*Agave sisalana*) COMO BIOADSORVENTE  
DO CORANTE TÊXTIL VIOLETA CRISTAL**

Trabalho Final de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Karla Silvana Menezes Gadelha de Sousa

JOÃO PESSOA

2020

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

V331u Vasconcelos, Gabriela Rodrigues de.

Utilização da fibra de sisal (Agave sisalana) como bioadsorvente do corante têxtil Violeta Cristal / Gabriela Rodrigues de Vasconcelos. - João Pessoa, 2020. 70 f.

Orientação: Karla Silvana Gadelha Menezes de Souza. Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Adsorção. 2. Corantes têxteis. 3. Violeta Cristal. 4. Fibra de sisal. I. Souza, Karla Silvana Gadelha Menezes de. II. Título.

UFPB/BC

GABRIELA RODRIGUES DE VASCONCELOS

**UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL (*Agave sisalana*) COMO BIOADSORVENTE  
DO CORANTE TÊXTIL VIOLETA CRISTAL**

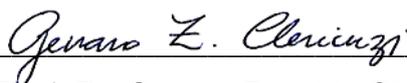
Trabalho Final de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal da Paraíba  
como requisito parcial para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho aprovado em: 26 de junho de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Prof(a). Dr(a). Karla Silvana Menezes Gadelha de Sousa



Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi



Eng. Química Maria Eduarda Araújo Pessoa

## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora, professora Karla, por aceitar conduzir o trabalho, pelo suporte, pelas correções pertinentes e por não desistir de mim.

Ao professor Genaro e à Maria Eduarda, pela disponibilidade de participar da minha banca examinadora e pelas contribuições acerca do trabalho.

A Alexsandro, pela companhia e por toda a ajuda no laboratório.

A todos os membros da família e amigos que me incentivaram durante a elaboração do trabalho, com destaque especial a Nadja e Lucas.

Aos meus companheiros de curso, Gabriella, Marcelo, Renan e Rodrigo, por tudo o que vivemos juntos nos últimos cinco anos.

A todos os que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O setor têxtil é fundamental para as economias brasileira e mundial, gerando empregos e renda para milhões de pessoas. A cadeia produtiva da indústria têxtil envolve diversas etapas de processamento de fibras e tecidos. As etapas de tingimento geram efluentes líquidos contaminados, principalmente com corantes não-fixados, que causam impactos nos corpos d'água, caso sejam descartados sem um tratamento prévio. Por isso, existe a necessidade de desenvolvimento de métodos de remoção desses corantes para que o descarte dos efluentes seja feito de acordo com a legislação ambiental. A adsorção é um método que utiliza sólidos para atrair componentes específicos de um fluido, apresentando baixo custo e facilidade de aplicação, sendo, assim, adequados para realizar esse tipo de tratamento. Neste trabalho, foi estudada a adsorção do corante Violeta Cristal (VC) utilizando a fibra de sisal como bioadsorvente. O VC é aplicado a diversas áreas, do tingimento de tecidos até a medicina, e o sisal apresenta enorme importância econômica no Nordeste, garantindo a sobrevivência de muitas famílias. A fibra de sisal foi utilizada em pedaços entre 0,5 e 1 cm, cortados com uma tesoura e sem nenhum pré-tratamento. Uma curva de calibração foi construída para o corante VC, relacionando a concentração de 10 soluções com a absorbância medida em um espectrofotômetro UV/Vis, sendo obtido um  $R^2$  de 0,9915. A análise do ponto de carga zero do material foi realizada e o valor encontrado foi de 6,40. Um planejamento fatorial  $2^2 + 3$  pontos centrais foi aplicado em triplicata para promover uma otimização das condições do processo, utilizando como parâmetros o pH (7,5, 8,5 e 9,5) e a concentração inicial de corante (20, 50 e 80 mg/L). Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C), sob agitação de 200 rpm, por 5 horas. A análise estatística dos resultados indicou que a concentração é o único parâmetro estatisticamente significativo e a melhor condição foi encontrada nos níveis superiores, com pH de 9,5 e concentração de 80 mg/L com percentual médio de remoção 88%. A resposta da adsorção foi analisada através da obtenção das isotermas de adsorção que possibilitou o percentual de remoção de 86% e a capacidade máxima de adsorção de 3,4580 mg/g. Os valores obtidos foram aplicados a diversos modelos encontrados na literatura através de regressão linear e não linear para efeito comparativo. Dentre eles, foi obtido melhor ajuste ao modelo de Freundlich. Parâmetros que correlacionam a heterogeneidade do processo foram confirmados e a interação entre adsorvente e solvente. Portanto a possibilidade de interferência por efeito de matriz foi indicada neste estudo, porém, não foi possível confirmá-la devido à pandemia de Covid-19.

Palavras-chave: Adsorção. Corantes têxteis. Violeta Cristal. Fibra de sisal.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	–	ESTRUTURA DA CADEIRA PRODUTIVA E DE DISTRIBUIÇÃO TÊXTIL.....	18
FIGURA 2	–	TECIDOS COLORIDOS .....	18
FIGURA 3	–	ESTRUTURA QUÍMICA DO CORANTE VIOLETA CRISTAL.....	22
FIGURA 4	–	CORPO D'ÁGUA CONTAMINADO COM CORANTE.....	24
FIGURA 5	–	PLANTA DE SISAL.....	29
FIGURA 6	–	FIBRA DE SISAL .....	30
FIGURA 7	–	ESPECTRO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO DA FIBRA DE SISAL.....	32
FIGURA 8	–	DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DE SISAL .....	33
FIGURA 9	–	REPRESENTAÇÕES POSSÍVEIS DE ISOTERMAS DE ADSORÇÃO .....	35
FIGURA 10	–	CLASSIFICAÇÃO DAS ISOTERMAS SEGUNDO GILES, SMITH E HUDSON (1973) .....	36
FIGURA 11	–	EXEMPLO DE PLANEJAMENTO FATORIAL COM DUAS VARIÁVEIS E DOIS NÍVEIS .....	42
FIGURA 12	–	EXEMPLO DE GRÁFICO DE PARETO NÃO PADRONIZADO...	44
FIGURA 13	–	EXEMPLO DE GRÁFICO DE PARETO PADRONIZADO .....	44
FIGURA 14	–	EXEMPLO DE GRÁFICO DE DESEJABILIDADE COM 3 VARIÁVEIS.....	45
FIGURA 15	–	FIBRA DE SISAL CORTADA.....	46
FIGURA 16	–	EXEMPLO DE DISPOSIÇÃO DE ENSAIO EM BANHO FINITO .	49
FIGURA 17	–	PONTO DE CARGA ZERO DA FIBRA DE SISAL.....	50
FIGURA 18	–	CURVA DE CALIBRAÇÃO DO CORANTE VIOLETA CRISTAL .	51
FIGURA 19	–	GRÁFICO DE PARETO PARA OS EFEITOS PADRONIZADOS EM $P = 0,05$ .....	52
FIGURA 20	–	GRÁFICO DE DESEJABILIDADE DO PROCESSO.....	53
FIGURA 21	–	SOLUÇÕES DO ENSAIO DA ISOTERMA (CONCENTRAÇÕES INICIAIS ENTRE 10 E 50 MG/L) APÓS FILTRAÇÃO .....	54
FIGURA 22	–	ISOTERMA DE ADSORÇÃO (APROXIMADAMENTE 25°C) .....	54
FIGURA 23	–	LINEARIZAÇÃO DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO PELO MODELO DE LANGMUIR .....	55

FIGURA 24	–	LINEARIZAÇÃO DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO PELO MODELO DE FREUNDLICH .....	55
FIGURA 25	–	AJUSTE AOS MODELOS DE ISOTERMAS DE ADSORÇÃO NÃO-LINEARES .....	57

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1	–	DESCRIÇÃO DOS ITENS QUE DETERMINAM A EFICIÊNCIA DE UM PROCESSO DE TINGIMENTO.....	19
QUADRO 2	–	DESCRIÇÃO DAS INTERAÇÕES QUE OCORREM DURANTE O PROCESSO DE TINGIMENTO .....	19
QUADRO 3	–	DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE CORANTES E SEUS PRINCIPAIS USOS.....	20
QUADRO 4	–	PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CORANTE VIOLETA CRISTAL .....	21
QUADRO 5	–	EQUILÍBRIOS DE PROTONAÇÃO DO CORANTE VIOLETA CRISTAL, DE ACORDO COM O PH.....	22
QUADRO 6	–	CONDIÇÕES PARA DESCARTE DE EFLUENTES .....	25
QUADRO 7	–	BREVE DESCRIÇÃO DE ALGUNS TIPOS DE TRATAMENTOS DE EFLUENTES UTILIZADOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL .....	25
QUADRO 8	–	USOS ASSOCIADOS ÀS PARTES DA PLANTA DE SISAL .....	29
QUADRO 9	–	ESTUDOS DE ADSORÇÃO UTILIZANDO A FIBRA DE SISAL COMO BIOSSORVENTE .....	31
QUADRO 10	–	DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE ISOTERMAS, SEGUNDO GILES, SMITH E HUDSON.....	37
QUADRO 11	–	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE UM PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	40

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	TEOR DE COMPONENTES QUÍMICOS MAJORITÁRIOS NA FIBRA DE SISAL .....	31
TABELA 2	–	PRINCIPAIS GRUPOS FUNCIONAIS IDENTIFICADOS E SUAS RESPECTIVAS BANDAS .....	32
TABELA 3	–	MOLÉCULAS ASSOCIADAS AOS PLANOS DO DRX DO SISAL .....	33
TABELA 4	–	RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE SEPARAÇÃO ( $R_L$ ) E A ISOTERMA DO PROCESSO DE ADSORÇÃO .....	38
TABELA 5	–	RELAÇÃO ENTRE O A CONSTANTE N E A ISOTERMA DO PROCESSO DE ADSORÇÃO .....	39
TABELA 6	–	REPRESENTAÇÃO DE TABELA ANOVA.....	43
TABELA 7	–	NÍVEIS DO PLANEJAMENTO FATORIAL .....	48
TABELA 8	–	ENSAIOS DO PLANEJAMENTO FATORIAL $2^2 + 3$ PONTOS CENTRAIS.....	48
TABELA 9	–	PARÂMETROS DA CURVA DE CALIBRAÇÃO, OBTIDOS PELA EQUAÇÃO DA RETA .....	51
TABELA 10	–	RESULTADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL $2^2 + 3$ PONTOS CENTRAIS.....	52
TABELA 11	–	EFEITOS ESTIMADOS PARA O %REMOÇÃO .....	52
TABELA 12	–	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O %REMOÇÃO .....	52
TABELA 13	–	PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA O PROCESSO.....	53
TABELA 14	–	RESULTADOS DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO, A TEMPERATURA AMBIENTE (APROXIMADAMENTE 25°C).....	54
TABELA 15	–	PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DA RETA DAS ISOTERMAS LINEARIZADAS .....	56
TABELA 16	–	PARÂMETROS DOS MODELOS DE LANGMUIR E FREUNDLICH LINEARIZADOS .....	56
TABELA 17	–	PARÂMETROS DOS MODELOS DE FREUNDLICH, SIPS E ADSORÇÃO EM MULTI-CAMADAS NÃO-LINEARES.....	56

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
3.1	O PANORAMA DO SEGMENTO TÊXTIL .....	16
3.2	A CADEIA PRODUTIVA E DE DISTRIBUIÇÃO TÊXTIL .....	16
3.3	CORANTES TÊXTEIS.....	18
3.3.1	Violeta Cristal .....	21
3.4	OS EFLUENTES TÊXTEIS E O MEIO AMBIENTE .....	23
3.4.1	A legislação de descarte de efluentes .....	24
3.4.2	O tratamento de efluentes têxteis.....	25
3.5	ADSORÇÃO .....	26
3.5.1	Materiais adsorventes .....	26
3.5.1.1	Ponto de carga zero ( $pH_{PCZ}$ ).....	27
3.6	BIOSSORVENTES VEGETAIS .....	28
3.6.1	O sisal .....	28
3.6.1.1	A fibra de sisal como biossorvente de corantes .....	31
3.6.1.2	Caracterização da fibra de sisal .....	31
3.6.1.2.1	Análise por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR).....	32
3.6.1.2.2	Análise de Difração de Raios-X (DRX).....	33
3.7	EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO.....	34
3.7.1	Isoterma de adsorção .....	34
3.7.1.1	Modelos de isotermas de adsorção.....	37

3.7.1.1.1	Modelo de Langmuir.....	37
3.7.1.1.2	Modelo de Freundlich .....	38
3.7.1.1.3	Modelo de Sips.....	39
3.7.1.1.4	Modelo para adsorção em multi-camadas.....	40
3.8	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	40
3.8.1	Planejamento fatorial.....	41
3.8.2	Análise estatística.....	42
3.8.2.1	Análise dos efeitos .....	42
3.8.2.2	Análise de Variância (ANOVA) .....	42
3.8.2.3	Gráfico de Pareto .....	43
3.8.2.4	Gráfico de desejabilidade .....	44
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>46</b>
4.1	MATERIAIS .....	46
4.2	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOADSORVENTE .....	46
4.2.1	Ponto de Carga Zero (pH <sub>PCZ</sub> ) .....	47
4.3	PREPARO DE SOLUÇÕES .....	47
4.4	CURVA DE CALIBRAÇÃO .....	47
4.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	47
4.5.1	Ensaio em banho finito .....	48
4.6	ISOTERMA DE ADSORÇÃO .....	49
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
5.1	PONTO DE CARGA ZERO (pH <sub>PCZ</sub> ) .....	50
5.2	CURVA DE CALIBRAÇÃO .....	50
5.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	51
5.4	ISOTERMAS DE ADSORÇÃO .....	53
5.4.1	Ajuste da isoterma a modelos linearizados .....	55
5.4.2	Ajuste da isoterma a modelos não-linearizados .....	56

6	CONCLUSÃO .....	58
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	60
	<u>REFERÊNCIAS</u> .....	61

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com os problemas ambientais cada vez mais críticos e frequentes, ao mesmo tempo em que se presencia um crescimento populacional e na atividade industrial, a responsabilidade ambiental está, cada vez mais, sendo colocada em evidência. Entre os maiores prejudicados, estão os recursos hídricos, fazendo com que os processos produtivos consumidores de água ganham mais atenção. Nesse contexto, o setor têxtil ganha destaque (KUNZ et al., 2002).

O processamento têxtil possui três etapas básicas: a formação dos fios, a formação dos tecidos e o acabamento. Entre as matérias primas utilizadas, podem ser citados as fibras, os corantes e diversos agentes químicos. Além disso, a presença de processos molhados em suas operações, como os acabamentos, torna essa indústria uma grande consumidora de água e, conseqüentemente, uma geradora de elevada quantidade de efluentes, sendo boa parte deles composta por água residual (MELLO et al., 2013; SILVA, 2009).

Os efluentes possuem características diferentes de acordo com a etapa do processo na qual foram gerados. Eles são bastante complexos e podem conter corantes, sais, ácidos, bases, dispersantes, emulsificantes etc. Sendo assim, podem apresentar variações de cor, uma elevada razão CQO/DBO, matéria em suspensão e metais pesados e valores de pH variáveis (SILVA, 2009).

Entre os corantes utilizados na indústria têxtil, pode-se citar o Violeta Cristal. Ele também é empregado em diversos processos de tingimento e, também, possui vários usos na área médica, como identificador de bactérias, em tratamentos de queimaduras sérias, para demarcação de pele, entre outros (MORI; CASSELLA, 2009).

Sabendo que o descarte de efluentes industriais, inclusive dos que contém corantes, é comumente feito na natureza, estudam-se diversas formas de tratamento para evitar a contaminação e o desequilíbrio dos ecossistemas. Entre elas estão a foto-degradação, o tratamento biológico e a adsorção, sendo essa última uma das mais utilizadas, devido ao seu baixo custo, simplicidade de aplicação, rapidez e alta eficiência (VARGAS et al., 2017).

A adsorção consiste em um processo físico de separação, utilizado na remoção de diversos contaminantes. O processo sólido-líquido é o mais utilizado, devido à alta capacidade que alguns sólidos, conhecidos de adsorventes, possuem de concentrar, em sua superfície, contaminantes presentes em uma solução aquosa, chamados de adsorbatos (BAZZO, 2015).

Quando são utilizados materiais de origem biológica como adsorventes, tem-se a biossorção. O sisal (*Agave sisalana*) é uma planta com alta disponibilidade e importância econômica no Nordeste e bons resultados foram encontrados utilizando a sua fibra como biossorvente dos corantes Reativo Preto 5 (VARGAS et al., 2017, 2019), Azul de Metileno (SILVA, 2019; VARGAS et al., 2017, 2019; SILVA et al. 2020), Tupy 16 Bordô (CRISPINIANO et al., 2019) e Reativo Laranja 5 (KHADIR; NEGARESTANI; GHASINEJAD, 2020), entretanto, não foram encontrados registros de estudos da capacidade de adsorção desse material em relação ao corante Violeta Cristal.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), o Brasil é o quinto maior produtor de têxteis do mundo, sendo esse ramo da indústria um dos que mais gera empregos no país, com quase 200 anos no mercado. Por isso, a problemática do descarte de seus resíduos no ambiente engloba tanto as empresas produtoras e seus colaboradores, quanto a população que depende dos recursos naturais afetados para a sua sobrevivência.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a remoção do corante Violeta Cristal de soluções aquosas sintéticas através do processo de adsorção, utilizando fibras de sisal (*Agave sisalana*) como adsorvente.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar o ponto de carga zero ( $\text{pH}_{\text{PCZ}}$ ) da fibra de sisal;
- Construir a curva de calibração do corante Violeta Cristal;
- Realizar os ensaios de adsorção em banho finito, aplicando um planejamento fatorial  $2^2 + 3$  pontos centrais;
- Empregar uma análise estatística dos dados obtidos no planejamento para avaliar a influência do pH e da concentração de adsorbato no percentual de remoção;
- Determinar a isoterma de adsorção a  $25^\circ\text{C}$ ;
- Ajustar a isoterma aos modelos de Langmuir, Freundlich, Sips e adsorção em multi-camadas.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 O PANORAMA DO SEGMENTO TÊXTIL

A indústria têxtil tem grande importância na economia mundial, sendo avaliada em US\$ 2,4 trilhões e provedora de 75 milhões de empregos, de acordo com a ONU Meio Ambiente (PORTOGENTE, 2020).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), em 2018, o setor têxtil possuía mais de 25 mil empresas formais atuando no país, responsáveis por um faturamento de US\$ 48,3 bilhões e pela geração de 8 milhões de empregos, diretos e indiretos. Somente nesse ano, o segmento recebeu US\$ 894,4 milhões em investimentos e pela produziu de 1,2 milhões de toneladas de têxteis e 8,9 bilhões de peças de vestuário.

Com quase 200 anos de história, a indústria têxtil brasileira tornou-se a quinta maior produtora de têxtil do mundo, respondendo por 2,4% da produção mundial, (FCEM, 2019), estando em quarto lugar na produção de denim e malhas, sendo referência mundial em design de moda praia, jeanswear e homewear e, ainda, começando a se destacar nos segmentos de fitness e lingerie (ABIT, 2019).

O Brasil conta, ainda, com mais de 100 escolas e faculdades de moda (ABIT, 2019) e diversos polos industriais do setor, como o do Agreste Pernambucano, o do Ceará, o do Vale do Itajaí e o de Americana (FCEM, 2019).

Para 2020, prevê-se um crescimento do setor entre 2 e 2,5% (GOTEX, 2019), sendo assim, esperado um grande investimento em novas tecnologias, marketing e sustentabilidade por parte dos empresários (FCEM, 2019).

#### 3.2 A CADEIA PRODUTIVA E DE DISTRIBUIÇÃO TÊXTIL

A matéria-prima utilizada na indústria têxtil é a fibra têxtil, que pode ser natural ou química. As fibras naturais são aquelas que podem ser encontradas prontas na

natureza, como a lã, a seda, o algodão e o linho. Já as fibras químicas são feitas pelo homem e são classificadas como sintéticas ou artificiais, de acordo com os insumos utilizados no processo químico utilizado na sua produção. As fibras sintéticas são produzidas a partir de materiais naturais, como os diversos tipos de celulose, e seus principais exemplos são a viscose e o acetato, enquanto as fibras artificiais são compostas de matérias-primas não naturais, como as oriundas das indústrias químicas e petroquímicas, podendo-se citar como exemplos o poliéster, a poliamida e o elastano. (DANIEL, 2011).

No processo de produção de tecidos, as fibras são transformadas em fios através de processos físicos, que, em seguida, são tramados de diferentes formas, de acordo com o produto final desejado, que pode ser um tecido plano ou malha. Entretanto, esse material ainda não está pronto para ser utilizado pelos consumidores finais e necessitam passar por etapas de acabamento.

De acordo com a Comissão Nacional de Classificação (CONCLA), os acabamentos consistem na preparação dos produtos têxteis para o uso destinado, estando, entre eles, os processos de estamparia, alveijamento e tingimento.

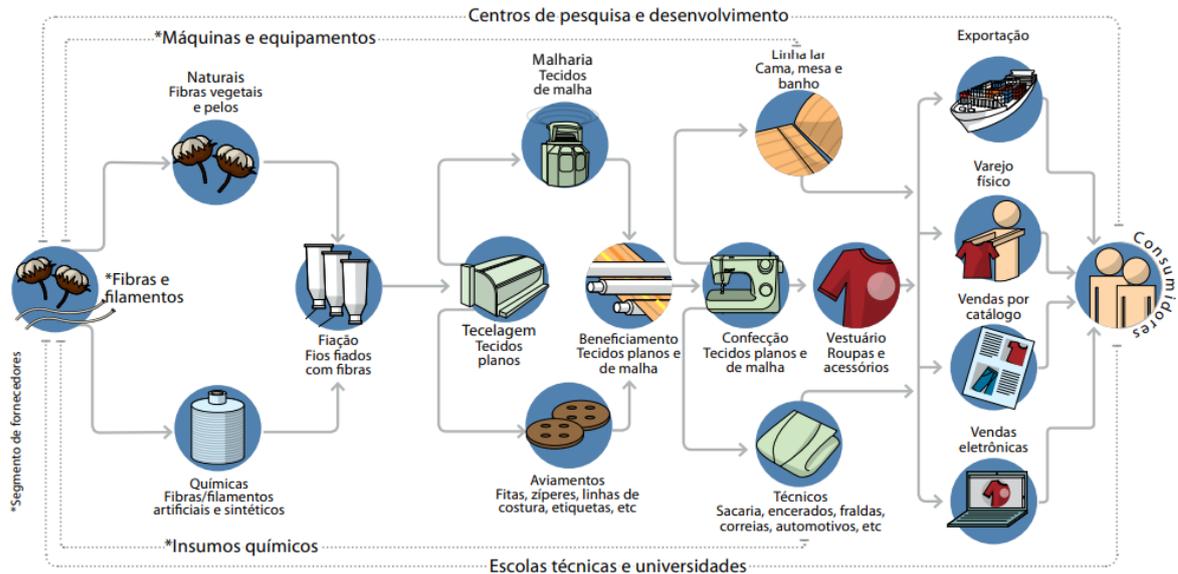
Após a tecelagem, os panos não possuem uma cor definida e apresentam diversas impurezas, como fragmentos de sementes e outros detritos. Por isso, inicialmente, eles são lavados e, em seguida, totalmente descoloridos com cloro. Caso sejam constituídos de fibras naturais, são submetidos ainda a outros banhos que têm o objetivo de remover alguns de seus componentes naturais, como óleos e ceras. Depois disso, a não ser que os produtos desejados sejam tecidos totalmente brancos, os panos são tratados com produtos químicos para promover uma maior abertura dos poros entre os fios e, posteriormente, tingidos. (RICÓN, 2017).

Os tecidos beneficiados por esses processos são utilizados nas indústrias de confecção para a produção de vestuário, acessórios, roupas profissionais, artigos de cama/mesa/banho e decoração de ambientes, entre outros. Estes, por sua vez, alimentam lojas, feiras e até camelôs.

Sendo assim, como pode ser visto na figura 1, a produção e distribuição de têxteis engloba os setores mais diversos, partindo desde a agricultura, na produção de fibras naturais, passando por diversos processos industriais, até chegar na

chamada “indústria da moda”, que envolve design, desfiles, grifes e marketing. (SEBRAE, 2008).

FIGURA 1 – ESTRUTURA DA CADEIRA PRODUTIVA E DE DISTRIBUIÇÃO TÊXTIL



FONTE: ABIT (2013).

### 3.3 CORANTES TÊXTEIS

Corantes têxteis são compostos orgânicos usados com a finalidade de conferir a uma fibra uma cor. Diferentes tipos de fibra requerem o uso de diferentes tipos de corantes, sendo que 75% dos corantes têxteis utilizados no Brasil estão vinculados a fibras celulósicas (ABIQUIM, 2011 apud VELOSO, 2012).

FIGURA 2 – TECIDOS COLORIDOS



FONTE: RICÓN (2017).

O sucesso comercial de um produto têxtil está diretamente relacionado com o processo de tingimento, já que o consumidor espera que ele uma padronagem e uma cor bonitas (figura 2) e com um elevado grau de fixação em relação à luz, lavagem e transpiração. Essa fixação pode ser feita através de reações químicas ou da insolubilização do corante ou de seus derivados. Porém, sempre há um excesso de corante não fixado à fibra, que é retirado ao final do processo em uma lavagem com água corrente (GUARATINI; ZANONI, 2000).

Para que seja considerado eficiente, o processo de tingimento deve atender às condições descritas no quadro 1.

QUADRO 1 – DESCRIÇÃO DOS ITENS QUE DETERMINAM A EFICIÊNCIA DE UM PROCESSO DE TINGIMENTO

ITENS PARA TINGIMENTO	DESCRIÇÃO
Afinidade	Matéria corante passa a fazer parte integrante da fibra.
Igualização	Uniformidade na cor aplicada (dependendo do poder de uniformização do corante, da sua velocidade e temperatura de montagem e de dificuldades inerentes ao material).
Grau de solidez	Grau de resistência aos diversos agentes de alteração e desgaste.
Economia	Capacidade de tingir peso relativamente elevado de material.

FONTE: SEBRAE ([200?]) apud VELOSO (2012).

A fixação do corante às fibras envolve interações intermoleculares, como mostrado no quadro 2.

QUADRO 2 – DESCRIÇÃO DAS INTERAÇÕES QUE OCORREM DURANTE O PROCESSO DE TINGIMENTO

(continua)

TIPOS DE INTERAÇÕES	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE FIXAÇÃO	FIBRAS ONDE OCORREM
Interações iônica	Interações mútuas entre o centro positivo dos grupos amino e carboxilatos presentes na fibra e a carga iônica do corante ou vice-versa	Lã, seda e poliamida
Interações de Van der Waals	Aproximação máxima entre os orbitais $\pi$ do corante e da molécula da fibra, que é fixada por um processo de afinidade	Lã e poliéster
Interações de Hidrogênio	Ligações entre átomos de hidrogênio covalentemente ligados no corante e pares de elétrons livres de átomos doadores presentes na fibra	Lã, seda e fibras sintéticas com acetato de celulose
Interações covalentes	Ligação covalente entre a molécula do corante contendo um grupo reativo (eletrofílico) e resíduos nucleofílicos da fibra	Fibra de algodão

FONTE: Adaptado de GUARATINI; ZANONI (2000).

Os corantes podem ser classificados de acordo com a sua fixação, de acordo com o quadro 3.

QUADRO 3 – DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE CORANTES E SEUS PRINCIPAIS USOS

(continua)

TIPO DE CORANTE	DESCRIÇÃO	PRINCIPAL DESTINO
Reativos	Contém um grupo eletrofílico (reativo) capaz de formar ligação covalente com grupos hidroxila, amino, hidroxila e tióis presentes nas diferentes fibras. Apresentam uma alta solubilidade em água e o estabelecimento de uma ligação covalente entre o corante e a fibra, que confere maior estabilidade na cor do que fixações que ocorrem através de ligações de maior intensidade.	Fibras naturais de algodão, fibras artificiais de viscose, couro e papel
Diretos	Compostos solúveis em água, capazes de tingir as fibras celulósicas através de interações de Van der Waals. Sua grande vantagem é o alto grau de exaustão durante a aplicação e consequente diminuição do conteúdo do corante nas águas de rejeito.	Fibras naturais de algodão, fibras artificiais de viscose, couro e papel
Azóicos	Compostos coloridos, insolúveis em água, que são sintetizados sobre a fibra durante o processo de tingimento, através de seu acoplamento à fibra com um composto solúvel em água, que apresenta alta afinidade por celulose e, em seguida, adição de um sal de diazônio ( $RN_2^+$ ) provoca uma reação com o agente de acoplamento já fixado na fibra e produz um corante insolúvel em água. É um método de tingimento com alto padrão de fixação e alta resistência contra luz e umidade.	Fibras naturais de algodão e fibras sintéticas de poliéster
Ácidos	Corantes aniônicos portadores de um a três grupos sulfônicos, que tornam o corante solúvel em água. No processo de tintura, o corante previamente neutralizado se liga à fibra através de uma troca iônica envolvendo o par de elétrons livres dos grupos amino e carboxilato das fibras protéicas, na forma não-protonada. Possuem ampla faixa de coloração e grau de fixação.	Couro, fibras sintéticas (nylon e elastoméricas) e fibras naturais de lã e papel
Básicos	Apresentam um grupo catiônico e, assim como os corantes ácidos, ligam-se através de ligações iônicas com grupos de carga oposta que são encontrados na fibra. São hidrossolúveis.	Papel e fibras sintéticas acrílicas
Á Cuba	São praticamente insolúveis em água, porém durante o processo de tintura eles são reduzidos em solução alcalina, transformando-se em um composto solúvel, que é posteriormente oxidado e regenera a forma original do corante sobre a fibra. Possuem excelentes propriedades de fixação, porém apresentam alto custo.	Fibras naturais de algodão
Sulfurosos	Após a aplicação, se caracterizam por compostos macromoleculares altamente insolúveis em água, por isso são aplicados após uma pré-redução que lhes confere a forma solúvel e subsequentemente reoxidados sobre a fibra. Conferem as cores preto, verde oliva, azul marinho e marrom às fibras celulósicas e apresentam boa fixação, porém geram resíduos altamente tóxicos.	Fibras naturais de algodão
Dispersivos	Insolúveis em água, são aplicados em fibras de celulose e outras fibras hidrofóbicas através de suspensão, pois, durante a tinturaria, sofre hidrólise e a forma originalmente insolúvel é lentamente precipitada na	Fibras sintéticas (poliéster, nylon) e fibras artificiais de acetato e viscose

QUADRO 3 – DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE CORANTES E SEUS PRINCIPAIS USOS

(conclusão)

	forma dispersa sobre o acetato de celulose. O processo geralmente ocorre na presença de agentes dispersantes com longas cadeias que estabilizam a suspensão, facilitando o contato entre o corante e a fibra. O grau de solubilidade do corante deve ser pequeno, mas definido, e influencia diretamente o processo e a qualidade da tintura.	
Pré-Metalizados	São caracterizados pela presença de um grupo hidroxila ou carboxila na posição ortho em relação ao cromóforo azo, permitindo a formação de complexos com íons metálicos. Nesse caso, explora-se a capacidade de interação entre o metal e os agrupamentos funcionais portadores de pares de elétrons livres, como aqueles presentes nas fibras proteicas. Sua desvantagem ecológica associada ao alto conteúdo de metal nas águas de rejeito.	Tintas, plásticos, couro e papel
Branqueadores	Utilizados para diminuir a aparência amarelada que ocorre pela absorção da luz particularmente na faixa de baixo comprimento de onda em fibras no estado bruto. Estes corantes apresentam grupos carboxílicos, azometino (-N=CH-) ou etilênicos (-CH=CH-) aliados a sistemas benzênicos, naftalênicos, pirênicos e anéis aromáticos que proporcionam reflexão por fluorescência na região de 430 a 440 nm quando excitados por luz ultra-violeta.	Fibras orgânicas em estado bruto

FONTE: Adaptado de GUARATINI; ZANONI (2000) e BAZZO (2015).

### 3.3.1 Violeta Cristal

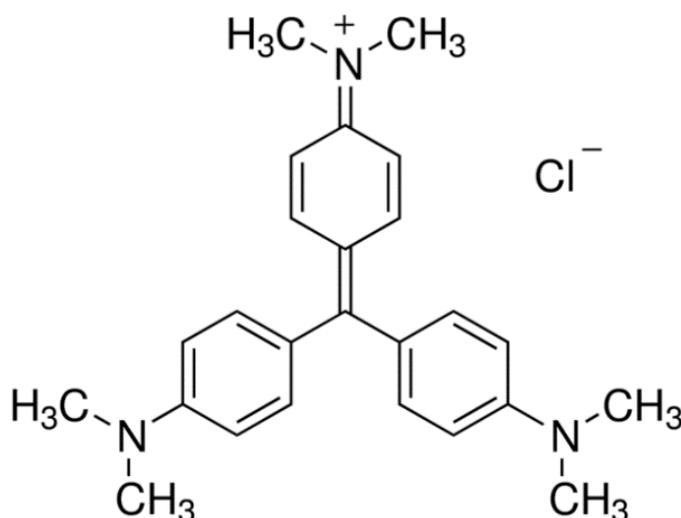
O corante têxtil Violeta Cristal (VC) também é conhecido como Violeta Genciana, Violeta de Metila 10B ou Violeta Básico 3 (MITTAL et al., 2010 apud BERTOLINI; FUNGARO, 2011). Ele é um corante classificado como básico, por sua fixação, de natureza catiônica e apresenta a estrutura química mostrada na figura 3. Algumas de suas propriedades e características estão apresentadas no quadro 4.

QUADRO 4 – PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CORANTE VIOLETA CRISTAL

Nome (IUPAC)	Tris(4-(dimethylamino)phenyl)methylium chloride
Fórmula Molecular	C <sub>25</sub> H <sub>30</sub> N <sub>3</sub> Cl
Peso molecular	407,99 g/mol
Hidrossolubilidade	50 g/L, a 27°C
Cor	Verde escuro
Forma	Pó

FONTE: SIGMA-ALDRICH (2020).

FIGURA 3 – ESTRUTURA QUÍMICA DO CORANTE VIOLETA CRISTAL



FONTE: SIGMA-ALDRICH ([20?]).

Ele apresenta diversos equilíbrios de protonação, de acordo com o pH da solução na qual está inserido, que estão descritos no quadro 5.

QUADRO 5 – EQUILÍBRIOS DE PROTONAÇÃO DO CORANTE VIOLETA CRISTAL, DE ACORDO COM O pH

pH	ESTADO DE PROTONAÇÃO DOS ÁTOMOS DE N	COLORAÇÃO
≤ 1	Três átomos positivamente carregados, dois na forma protonada	Verde
2	Dois átomos positivamente carregados, um na forma protonada	Azul
7	Um átomo positivamente carregado, dois desprotonados	Violeta

FONTE: Adaptado de GÓES (2013) apud BAZZO (2015).

O VC é um corante com diversas aplicações. Por apresentar uma natureza catiônica, é utilizado no tingimento de materiais com características aniônicas, como couro, fibras acrílicas, papéis, também em tintas de impressão, e têxteis, como algodão e seda. Ele também pode ser indicador de pH, no carimbo de cortes de carne e na mistura em rações para aves. (MITTAL et al., 2010 apud BERTOLINI; FUNGARO, 2011. MORI; CASSELA, 2009 apud BAZZO, 2015).

Por possuir atividade antisséptica e antimicótica, possui eficiência como desinfetante de pele de intensidade moderada para seres humanos e animais. E, além disso, é empregado pela comunidade médica como agente bacteriostático e no tratamento de queimaduras sérias e lesões na pele e na gengiva. (MITTAL et al., 2010 apud BERTOLINI; FUNGARO, 2011. MORI; CASSELA, 2009 apud BAZZO, 2015).

### 3.4 OS EFLUENTES TÊXTEIS E O MEIO AMBIENTE

A indústria têxtil produz efluentes em todas as etapas do seu processo produtivo, sejam eles líquidos, sólidos ou emissões atmosféricas, que possuem um grande potencial de geração de impactos ambientais, se não forem devidamente controlados (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (FIEMG); FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM), [201?]).

Entre diversos tipos de indústrias, ela é uma das maiores geradoras de efluentes líquidos, sendo estimado o consumo de 150 litros de água para a produção de 1 quilograma de tecido, sendo 88% desse volume posteriormente descartado (LEÃO, 2002 apud FIEMG; FEAM, [201?]). Os efluentes provenientes dos processos de tingimento são os mais problemáticos, devido à presença de corantes e outros componentes adicionados ao processo, como surfactantes e aditivos, que fazem com que eles sejam caracterizados pela presença de cor e altos volumes de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Biológica de Oxigênio (PEIXOTO; MARINHO; RODRIGUES, 2013).

Grandes quantidades desses efluentes são descartados diariamente em corpos de água do mundo todo, muitas vezes, sem que recebam o devido tratamento. Estima-se que entre 10 e 15% da produção anual de corantes entra no meio ambiente através dos efluentes, sendo essa perda resultante da fixação incompleta dos corantes durante o tingimento das fibras (PEIXOTO; MARINHO; RODRIGUES, 2013; GUARATINI; ZANONI, 2000).

As maiores problemáticas dos corantes estão na sua baixa degradabilidade e alta solubilidade em água (PEIXOTO; MARINHO; RODRIGUES, 2013). Essas características tornam essas substâncias grandes poluidoras, principalmente dos rios, e essa contaminação afeta tanto a fauna e a flora, quanto os seres humanos com os quais tem contato.

Os corantes sintéticos apresentam riscos toxicológicos à saúde, dependendo do modo e do tempo de exposição (GUARATINI; ZANONI, 2000). O corante Violeta Cristal, por exemplo, nos seres humanos, causa irritação na pele e no trato intestinal, pela absorção em grandes quantidades, e nos olhos, pelo contato, podendo levar à

insuficiência renal e respiratória e à cegueira permanente (MITTAL et al., 2010 apud BERTOLINI; FUNGARO, 2011). Ele também é muito tóxico para os organismos aquáticos (SIGMA-ALDRICH, 2020).

FIGURA 4 – CORPO D'ÁGUA CONTAMINADO COM CORANTE



FONTE: BOLDRIN et al. (2010).

Uma característica dos corantes que pode ser considerada uma vantagem ou desvantagem é que eles são altamente detectáveis a olho nu, podendo ser vistos em concentrações muito baixas, como 1 mg/L. Sendo assim, ao mesmo tempo que uma pequena quantidade pode afetar os rios, causando uma mudança de coloração como a vista na figura 4, isso vai imediatamente chamar a atenção pública e das autoridades ambientais (GUARATINI; ZANONI, 2000).

Por isso, há a necessidade de realizar tratamentos que tornem os efluentes menos agressivos ao meio ambiente e obedeçam à legislação.

#### 3.4.1 A legislação de descarte de efluentes

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) foi instituído pela lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, como órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA). Ele tem a finalidade de assessorar, estudar e propor ao Conselho de Governo, diretrizes de políticas governamentais para o meio ambiente e os recursos naturais e deliberar, no âmbito de sua competência, sobre normas e padrões compatíveis com o meio ambiente ecologicamente equilibrado e essencial à sadia qualidade de vida (BRASIL, 1981).

No art. 16, da Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, ele dispõe sobre as condições e padrões do efluente para o lançamento direto no corpo receptor. Essas condições estão dispostas no quadro 6.

QUADRO 6 – CONDIÇÕES PARA DESCARTE DE EFLUENTES

pH	5,0 – 9,0
Temperatura	< 40°C (a variação no corpo receptor não deve exceder a 3°C no limite da zona de mistura)
Materiais sedimentáveis	≤ 1 ml/L (em lagos e lagoas, devem ser virtualmente ausentes)
Vazão máxima de lançamento	≤ 1,5 vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor
Óleos e graxas	Óleos minerais: ≤ 20 mg/L Óleos vegetais e gorduras animais: ≤ 50 mg/L
Materiais flutuantes	Ausentes
DBO (5 dias a 20°C)	Remoção mínima de 60%

FONTE: CONAMA (2011).

### 3.4.2 O tratamento de efluentes têxteis

Existem diversos métodos de tratamento utilizados pela indústria têxtil, que podem ser mais ou menos eficientes de acordo com o tipo de corante que se deseja remover. Alguns deles estão descritos brevemente no quadro 7.

QUADRO 7 – BREVE DESCRIÇÃO DE ALGUNS TIPOS DE TRATAMENTOS DE EFLUENTES UTILIZADOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL

TRATAMENTO	DESCRIÇÃO DO PROCESSO
Biodegradação	Utilização de microrganismos versáteis, capazes de degradar de maneira eficiente um grande número de poluentes a um baixo custo operacional.
Oxidação	Ozônio é adicionado ao efluente, onde reage, direta ou indiretamente, com o corante, quebrando ligações, formando moléculas menores e, assim, descolorindo-o.
Fotocatálise heterogênea	A degradação de compostos tóxicos para CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O é feita sem o uso de oxidantes adicionais, pois é assistida por altas concentrações de radical hidroxil.
Bioacumulação	É o acúmulo de poluentes por ativação de células em crescimento por seu metabolismo.
Biossorção	Tipo de adsorção que utiliza materiais biológicos como adsorventes, sendo realizada ligação do soluto à biomassa através de um processo que não envolve transporte de energia metabólica

FONTE: Adaptado de PEIXOTO; MARINHO; RODRIGUES (2013) e KUNZ et al. (2002).

Muitas vezes, os efluentes têxteis apresentam vários corantes, de diferentes tipos, que provocam a necessidade do uso de mais de um tipo de tratamento.

### 3.5 ADSORÇÃO

A adsorção é um processo muito utilizado para promover a limpeza de fluidos. Ela envolve, geralmente, o contato entre um sólido e um fluido, onde um ou mais componentes do fluido são mais atraídos pela superfície do sólido, sendo, assim, separados dos demais (WANKAT, 1944, tradução).

Os solutos adsorvidos e o material sólido são chamados, respectivamente, de adsorbato e adsorvente (SEADER; HENLEY; ROPER, 1998, p. 568, tradução nossa). Alguns fatores que influenciam a separação entre esses materiais são o peso, o formato e a polaridade das moléculas, que podem garantir uma afinidade entre eles (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993, p. 810, tradução).

Existem três tipos de adsorção, de acordo com o mecanismo que faz com que os as moléculas, átomos ou íons presentes no fluido fiquem ligados à superfície adsorvente. Sendo assim, essa operação unitária pode ser classificada como: física, quando a retenção das partículas ocorre devido a interações intermoleculares do tipo dipolo-dipolo e dipolo induzido; química, quando existem ligações químicas entre as moléculas ou átomos do adsorbato e do adsorvente; ou por troca iônica, quando partículas eletricamente carregadas são cedidas entre os materiais (MATOS, 2015, p. 145).

#### 3.5.1 Materiais adsorventes

Os materiais adsorventes são, em sua maioria, muito porosos, podendo a adsorção ocorrer em sítios específicos de suas partículas ou nas paredes dos poros (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993, p. 810, tradução nossa). Os adsorventes mais comuns são a alumina ativada, as argilas, a bauxita ativada, o carvão ativado, o gel de sílica, as pastilhas deliquescentes, a peneira molecular e as resinas (MATOS, 2015, p. 145).

De acordo com Seader, Henley e Roper (1998, p. 570, tradução nossa), para serem considerados apropriados para o uso comercial, os adsorventes devem apresentar, entre outras, as seguintes características:

- Alta seletividade para possibilitar separações eficientes;
- Alta capacidade de minimizar a quantidade de adsorbato;
- Cinética favorável, para uma rápida adsorção;
- Estabilidade química e térmica;
- Alta resistência à incrustação;
- Nenhuma tendência a promover reações químicas indesejadas.

Uma boa forma de avaliar a eficiência de um material adsorvente é através do percentual de remoção (%Rem), que compara as concentrações do adsorbato na solução, antes da adição do adsorvente e ao final da adsorção. Ele pode ser calculado utilizando-se a equação (1).

$$\%Rem = \frac{c_0 - c_f}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

$C_0$  = concentração inicial (mg/L);

$C_f$  = concentração final (mg/L).

#### 3.5.1.1 Ponto de carga zero (pH<sub>PCZ</sub>)

O ponto de carga zero (pH<sub>PCZ</sub>) de um sólido determina em qual valor de pH sua superfície se encontrará eletricamente nula, ou seja, com o mesmo número de cargas positivas e negativas. Esse parâmetro deve ser conhecido nos materiais adsorventes para determinar as condições do processo de adsorção, de acordo com a natureza do corante.

Se o adsorbato apresentar natureza aniônica, deve ser utilizado um pH menor do pH<sub>PCZ</sub>, pois isso fará com que a superfície do sólido fique positivamente carregada e um grande número de ânions seja adsorvido para balancear a essa carga. O

contrário ocorre quando se tem um adsorbato catiônico, quando deve ser utilizado um valor de pH maior do que o  $pH_{PCZ}$  (DEOLIN et al., 2013).

### 3.6 BIOSORVENTES VEGETAIS

O carvão ativado costumava ser o material adsorvente mais utilizado, devido à sua alta eficiência adsorvente, porém sua aplicabilidade era limitada pelo seu alto custo (BATSIAS; SIDIRAS, 2006, tradução nossa). Por isso, nas últimas décadas, aumentou a busca dos pesquisadores por adsorventes naturais alternativos, que sejam provenientes de fontes renováveis e mais baratos (DJILALI et al., 2012, tradução nossa). Esses materiais são chamados de bioadsorventes ou biossorventes e podem ser oriundos de biomassa (resíduo vegetal) ou microrganismos de origem bacteriana sem vida (BAZZO, 2015).

Os biossorventes de origem vegetal são materiais lignocelulósicos, ou seja, basicamente constituídos por celulose, hemicelulose e lignina, polímeros que interagem entre si e formam uma complexa e resistente estrutura. Além disso, são ricos em grupos funcionais, que se ligam aos corantes através de diferentes mecanismos, já que a adsorção pode ocorrer por troca iônica, complexação ou ligações de hidrogênio (DJILALI et al., 2012, tradução).

Segundo Bazzo (2015), entre as vantagens de utilizar um biossorvente, podem ser citadas: o baixo valor comercial, a alta disponibilidade no ambiente e a simplicidade na sua preparação.

#### 3.6.1 O sisal

O sisal (*Agave sisalana*) é uma planta monocotiledônea, que produz uma fibra dura e grossa, de cor creme ou amarelo pálido, de 1 a 1,5 m de comprimento (SILVA et al., 2008, p. 2). Um exemplo de planta de sisal pode ser visto na figura 5.

FIGURA 5 – PLANTA DE SISAL



FONTE: FIOCRUZ (2013).

Originária do México, essa planta se desenvolve bem em climas quentes e regiões áridas, normalmente impróprias para a agricultura, é muito resistente a doenças e requer um cultivo simples e de baixo custo, que pode ser feito em diversos tipos de solo. A vida produtiva do sisal é de até 12 anos, sendo a primeira colheita feita dois anos após o plantio. Dependendo das condições de cultivo, durante sua vida, ele pode produzir entre 180 e 240 folhas, de onde é retirada a fibra (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 20[?], tradução).

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a fibra de sisal abastece 70% do mercado mundial de fibras duras, sendo 60% de sua produção destinada a fabricação de barbantes. Outras partes da planta também possuem utilidade, como mostra o quadro 8.

QUADRO 8 – USOS ASSOCIADOS ÀS PARTES DA PLANTA DE SISAL

PARTES DA PLANTA	USOS
Seiva das folhas	Contém hecogenina, usada na síntese parcial da cortisona
Resíduos do desfibramento	Produção de pectato de sódio e cera, ração animal e fertilizante Geração de bioenergia
Varas do pendão floral	Cobertura de casas e construção de cercas

FONTE: MAPA (2008).

No Brasil, a Bahia é o estado que mais produz fibra de sisal, responsável por cerca de 90% da produção, seguida por Paraíba e Pernambuco. A adaptação da planta às condições edafoclimáticas da região semiárida faz com que essa atividade

econômica seja a mais importante da região, gerando emprego e renda (SANTOS; BRANDÃO, 201[?]).

A planta é cultivada em 82 municípios da região, ocupando uma área de aproximadamente 200.000 ha, onde predominam propriedades de pequeno porte e mão-de-obra familiar. Cerca de 500 mil pessoas vivem, direta ou indiretamente, de atividades relacionadas à sua fibra (SILVA et al., 2019, p. 948).

Esse cultivo também está associado a diversos benefícios ambientais. Durante o ciclo de vida, a planta absorve mais dióxido de carbono do que produz, podem ser utilizadas como barreiras vegetais para proteger plantações e florestas contra predadores e intrusos, suas raízes reduzem a erosão do solo e os resíduos do seu processamento são 100% reaproveitáveis e biodegradáveis, ao contrário do que ocorre na produção de fibra sintéticas (FAO, 20[?], tradução).

As fibras (figura 6) são dispostas longitudinalmente nas folhas das plantas de sisal, sendo mais abundantes com a proximidade da superfície das mesmas (FAO, 20[?], tradução nossa). Sua composição química básica está disposta na tabela 1, entretanto, ela pode ser alterada de acordo com as condições de cultivo e processamento.

FIGURA 6 – FIBRA DE SISAL



FONTE: COSIBRA ([20?]).

TABELA 1 – TEOR DE COMPONENTES QUÍMICOS MAJORITÁRIOS NA FIBRA DE SISAL

COMPONENTE	TEOR
Celulose	65,5 ± 0,5
Hemicelulose	18,9 ± 0,7
Lignina	12,3 ± 0,5
Umidade	6,7 ± 0,1
Cinzas	1 ± 0,6

FONTE: MEGIATTO JR (2006).

Por ser composto principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, materiais com altíssima reatividade química devido à presença de grupos hidroxila em suas moléculas, espera-se que o sisal apresente uma boa capacidade adsorvente (FERREIRA, 2015).

### 3.6.1.1 A fibra de sisal como bioissorvente de corantes

Poucos estudos podem ser encontrados utilizando a fibra de sisal *in natura* ou modificada como bioissorvente de corantes, estando eles citados no quadro 9.

QUADRO 9 – ESTUDOS DE ADSORÇÃO UTILIZANDO A FIBRA DE SISAL COMO BIOISSORVENTE

AUTOR	ANO (S)	MODIFICAÇÕES NO ADSORVENTE	CORANTE ADSORVIDO	%REM MÁXIMO
VARGAS et al.	2017, 2019	<i>in natura</i>	Azul de Metileno e Reativo Preto 5	> 85%
CRISPINIANO et al.	2019	Lavagem com água destilada e secagem em estufa	Tupy 16 Bordô	64,52%
SILVA	2019, 2020	Modificado com plasma frio reativo	Azul de Metileno	96%
KHADIR; NEGARESTANI; GHIASINEJAD	2020	Modificado com polipirrol e polianilina	Reativo Laranja 5	97%

FONTE: O AUTOR (2020).

### 3.6.1.2 Caracterização da fibra de sisal

A caracterização de um material em um estudo de adsorção é importante para realizar a confirmação de suas características físico-químicas, como a presença de grupos funcionais e a cristalinidade (NASCIMENTO et al., 2014).

### 3.6.1.2.1 Análise por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)

A análise por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) tem como objetivo identificar compostos que contenham ligações covalentes, para identificar grupos funcionais orgânicos que atuar como sítios de adsorção. A análise é feita na região do infravermelho médio, que é onde ocorrem as mudanças nas energias vibracionais e rotacionais das moléculas gerando um espectro em que cada banda representa um grupo funcional (NASCIMENTO et al., 2014).

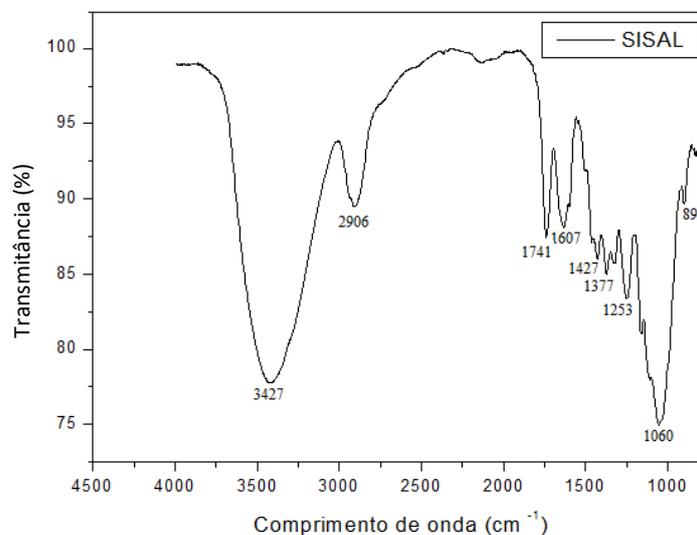
Na figura 7, tem-se o espectro de infravermelho da fibra de sisal e na tabela 2, as principais bandas encontradas e os grupos funcionais correspondentes, segundo a metodologia de análise de espectro proposta por Pavia et al. (2015).

TABELA 2 – PRINCIPAIS GRUPOS FUNCIONAIS IDENTIFICADOS E SUAS RESPECTIVAS BANDAS

BANDA	GRUPO FUNCIONAL
3427	O – H
2906	C – H
1607	C = C
1060	C – O

FONTE: Adaptado de PAVIA et al. (2015).

FIGURA 7 – ESPECTRO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO DA FIBRA DE SISAL



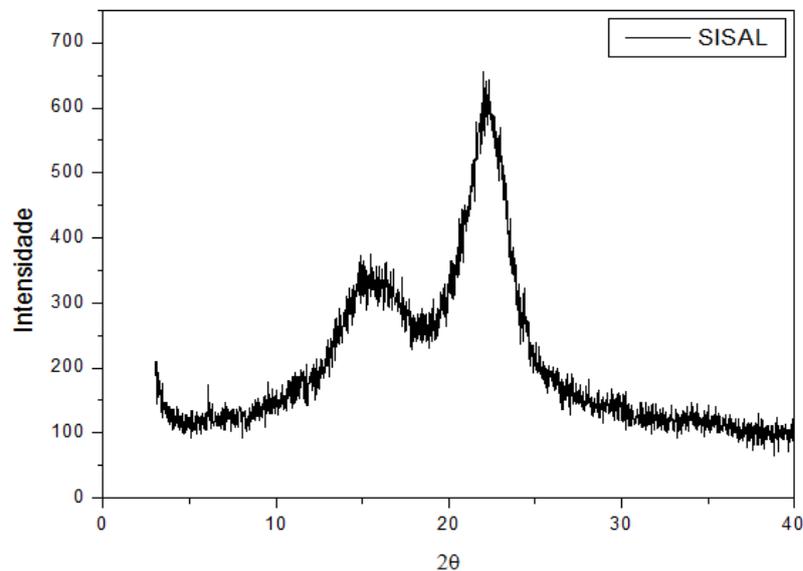
FONTE: Adaptado de D'ARAÚJO (2017).

### 3.6.1.2.2 Análise de Difração de Raios-X (DRX)

A técnica de difração de Raios-X caracteriza os materiais através do fenômeno de espalhamento da radiação eletromagnética, provocada por uma interação entre um feixe de Raio-X com os elétrons dos átomos de seus componentes. A partir disso, é possível determinar a estrutura dos materiais que sejam suficientemente cristalinos, ou seja, que apresentam repetição regular no espaço tridimensional constituído de moléculas ou grupos de moléculas com ordenamento em sua estrutura (NASCIMENTO et al., 2014).

A celulose apresenta uma baixa ordem cristalina, por isso, o difratograma apresenta picos largos (NASCIMENTO et al., 2014). A figura 8 apresenta o difratograma do sisal, onde é possível verificar a presença dos planos característicos dos materiais lignocelulósicos, identificados na tabela 3.

FIGURA 8 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DE SISAL



FONTE: D'ARAÚJO (2017).

TABELA 3 – MOLÉCULAS ASSOCIADAS AOS PLANOS DO DRX DO SISAL

2θ	MOLÉCULAS	CRISTALINIDADE
15°	Lignina e hemicelulose	Amorfas
23°	Celulose	Cristalina

FONTE: Adaptado de D'ARAÚJO (2017).

### 3.7 EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO

Quando um sólido adsorvente e um líquido contendo um soluto adsorbível entram em contato, as moléculas ou íons do soluto tendem a migrar para a superfície do adsorvente, até que sua concentração permaneça constante, devido à uma igualdade na velocidade de adsorção e dessorção, que caracteriza o equilíbrio (PESSOA, 2019).

#### 3.7.1 Isoterma de adsorção

A isoterma de adsorção representa a relação de equilíbrio entre a concentração do adsorbato na fase fluida e nas partículas do adsorvente, a determinada temperatura. (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993, p. 814, tradução nossa).

Segundo Nascimento et al. (2014, p. 24), para obtê-la, deve-se adicionar uma massa de adsorvente a um determinado volume de uma série de soluções com diferentes concentrações iniciais conhecidas e aguardar até que o equilíbrio de adsorção seja atingido. Então, separa-se o adsorvente da solução final, que é analisada através de técnicas analíticas, para determinar a concentração final. Assim, pode-se calcular a capacidade de adsorção do adsorvente no equilíbrio ( $q_e$ ) a partir da equação (2).

$$q_e = (C_0 - C_e) \frac{V}{m} \quad (2)$$

Onde:

$C_0$  = concentração de adsorbato inicial (mg/L);

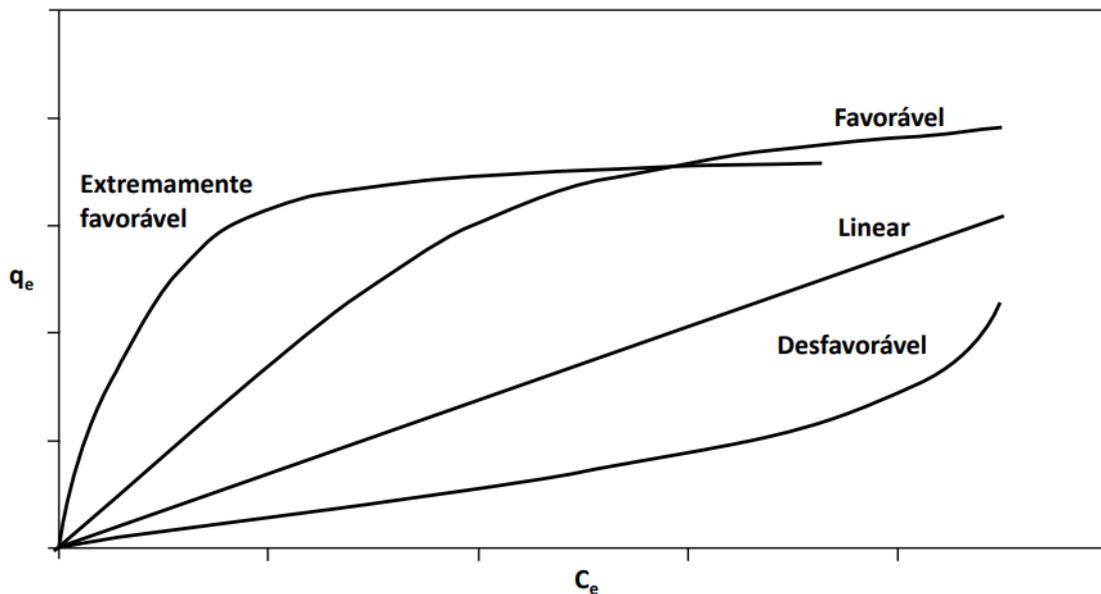
$C_e$  = concentração de adsorbato no equilíbrio (mg/L);

$V$  = volume de solução (L);

$m$  = massa de adsorvente (g).

Plotando o gráfico de  $q_e$  em função de  $C_e$ , como representado na figura 9, é possível perceber a relação entre a quantidade soluto que foi adsorvida e a que restou na solução. A isoterma linear mostra que as duas quantidades são proporcionais. Já a isoterma representada com a concavidade voltada para cima é considerada desfavorável por representar uma baixa quantidade de soluto retida mesmo em altas concentrações (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993, p. 814, tradução).

FIGURA 9 – REPRESENTAÇÕES POSSÍVEIS DE ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

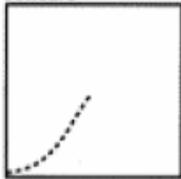
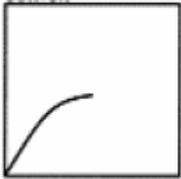
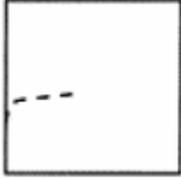
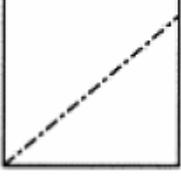
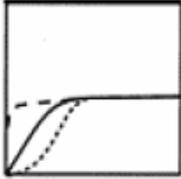


FONTE: MOREIRA (2008) apud NASCIMENTO et al (2014).

No caso das isotermas favoráveis, que são as que apresentam a concavidade voltada para baixo, a quantidade de adsorbato fixada ao adsorvente é maior do que a quantidade livre na solução. Para ser considerada extremamente favorável, a isoterma deve representar uma adsorção irreversível, onde a quantidade adsorvida independe da concentração, mesmo para valores muito baixos (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993, p. 815, tradução).

Outra classificação para as isotermas foi proposta por Giles, Smith e Hudson (1973), como mostrado na figura 10, que propõe que elas devem ser divididas em classes, de acordo com o seu primeiro declive, e em subgrupos, a partir de suas variações subsequentes. A descrição das classes e subgrupos pode ser encontrada no quadro 10.

FIGURA 10 – CLASSIFICAÇÃO DAS ISOTERMAS SEGUNDO GILES, SMITH E HUDSON (1973)

CLASSE	SUB-GRUPO	$q$ versus $C$
S	1	Côncavo 
		Convexo 
		Convexo 
		Linear 
S,L,H	2	Platô 
S,L,H	3	Inflexão do platô 
S,L,H	4	Platô e inflexão 

FONTE: HINZ (2001) apud PINO (2005).

QUADRO 10 – DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE ISOTERMAS, SEGUNDO GILES, SMITH E HUDSON

CLASSE	Isoterma S (sigmoidal)	Apresenta uma curvatura inicial voltada para cima, uma vez que as interações adsorvente-adsorbato são mais fracas que as interações adsorbato-adsorbato e solvente-adsorvente
	Isoterma L (Langmuir)	Possui curvatura inicial voltada para baixo devido à diminuição da disponibilidade dos sítios ativos
	Isoterma H (“high affinity”)	Aparece quando o adsorbato tem grande afinidade pelo adsorvente. A quantidade adsorvida inicial é alta e logo após o equilíbrio é alcançado
SUBGRUPO	Isoterma C (“constant partition”)	Possui um início linear indicando que o número de sítios ativos é constante
	Subgrupo 2	Indica a saturação da superfície em que o adsorbato tem mais afinidade pelo solvente do que pelas moléculas já adsorvidas
	Subgrupo 3	Caracterizada por uma subida após um ponto de inflexão
	Subgrupo 4	Indica a formação de camadas múltiplas de adsorbato adsorvido
	Subgrupo mx	Apresenta um máximo a altas concentrações. É um caso raro e indica que em altas concentrações do adsorbato as interações adsorbato-adsorbato aumentam muito mais rapidamente do que as atrações adsorbato-adsorvente

FONTE: Adaptado de PORPINO (2009) apud PESSOA (2019).

### 3.7.1.1 Modelos de isotermas de adsorção

Existem diversos modelos matemáticos que têm como objetivo prever o comportamento das isotermas de adsorção.

#### 3.7.1.1.1 Modelo de Langmuir

O modelo de Langmuir é um dos mais utilizados para representar os processos de adsorção e pressupõe que a adsorção ocorre em uma monocamada e existe um número definido de sítios na partícula do adsorvente, que possuem energia equivalente e cada um comporta apenas uma molécula adsorvida, esta, por sua vez, não podendo interagir com as outras moléculas adsorvidas por outros sítios (NASCIMENTO et al., 2014, p. 27).

A equação (3) define este modelo, de forma não-linear.

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x}K_L C_e}{1+K_L C_e} \quad (3)$$

Onde:

$q_{m\acute{a}x}$  = capacidade máxima de adsorção (mg/g);

$K_L$  = constante de interação adsorbato/adsorvente (L/mg);

$C_e$  = concentração de adsorbato no equilíbrio (mg/L).

Ela pode ser rearranjada e linearizada, resultando equação (4).

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{m\acute{a}x}} + \frac{1}{q_{m\acute{a}x}K_L C_e} \quad (4)$$

A partir dessas equações,  possível determinar os parâmetros  $q_{m\acute{a}x}$  e  $K_L$  e, conhecendo seus valores, pode-se calcular, através da equação (5), o fator de separação ( $R_L$ ), que corresponde ao grau de desenvolvimento do processo de adsorção.

$$R_L = \frac{1}{1+K_L C_0} \quad (5)$$

A faixa de valores de  $R_L$  encontrada para uma certa isoterma determina se o processo  favorável ou não, de acordo com a tabela 4.

TABELA 4 – RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE SEPARAÇÃO ( $R_L$ ) E A ISOTERMA DO PROCESSO DE ADSORÇÃO

$R_L$	CARACTERÍSTICA DA ISOTERMA
$0 < R_L < 1$	Favorável
$R_L > 1$	Desfavorável
1	Linear
0	Irreversível

FONTE: MOREIRA (2008).

### 3.7.1.1.2 Modelo de Freundlich

Também bastante utilizado, o modelo de isoterma de Freundlich tem uma base empírica, que considera que existem interações entre as moléculas adsorvidas na superfície (FREUNDLICH, 1906 apud SANTOS, 2019). Ele é representado pela equação (6).

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

Onde:

$K_F$  = constante relacionada à capacidade de adsorção (L/g);

$n$  = constante relacionada com a intensidade de adsorção.

Na equação (7), tem-se sua linearização.

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (7)$$

A partir da constante  $n$ , é possível prever a curva gráfica da isoterma, de acordo com a tabela 5.

TABELA 5 – RELAÇÃO ENTRE O A CONSTANTE N E A ISOTERMA DO PROCESSO DE ADSORÇÃO

n	CARACTERÍSTICA DA ISOTERMA
$1 < n < 10$	Favorável
$n < 1$	Desfavorável

FONTE: ALVES (2007) apud MOREIRA (2008).

### 3.7.1.1.3 Modelo de Sips

O modelo de Sips consiste em uma combinação dos modelos de Langmuir e Freundlich, descritos anteriormente, apresentando três parâmetros semi-empíricos. Ele é definido pela equação (8).

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} K_S C_e^{1/n_s}}{1 + K_S C_e^{1/n_s}} \quad (8)$$

Onde:

$q_{m\acute{a}x}$  = capacidade máxima de adsorção (mg/g);

$K_S$  = constante relacionada à energia de adsorção (L/mg);

$n_s$  = grau de heterogeneidade do sistema.

Nessa equação, o parâmetro  $K_S$  corresponde ao  $K_L$  do modelo de Langmuir. Já o parâmetro  $n_s$  refere-se à heterogeneidade do sistema e às interações entre as moléculas adsorvidas. Sendo assim, quando seu valor tende a zero, deduz-se que o

sistema é heterogêneo e aproxima-se do modelo de Freundlich, entretanto, caso seu valor esteja mais próximo de um, o sistema tende à homogeneidade e ao modelo de Langmuir (SIPS, 1950 apud NETO, 2017).

#### 3.7.1.1.4 Modelo para adsorção em multi-camadas

O modelo para adsorção em multi-camadas parte do pressuposto de que o adsorbato pode formar mais de uma camada sobre o adsorvente. Ele é representado pela equação (9) (WANG et al., 1998 apud MOREIRA, 2008).

$$q_e = \frac{Q_1 K_1 C_e}{(1 - K_2 C_3)(1 + (K_1 - K_2) C_e)} \quad (9)$$

Onde:

$K_1$  e  $K_2$  = constantes de equilíbrio para a primeira e segunda camadas (L/mg);

$Q_1$  = capacidade da primeira camada (mg/g).

### 3.8 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental apresenta um conjunto de ensaios que têm como objetivo determinar a influência de variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo e otimizá-lo. Com a sua utilização, é possível avaliar simultaneamente diversas variáveis, reduzindo, assim, o número de experimentos necessário (BUTTON, 2012, p. 6). As principais etapas do planejamento estão dispostas no quadro 11.

QUADRO 11 – DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE UM PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

(continua)

ETAPA	DESCRIÇÃO
Reconhecimento e definição do problema	O pesquisador deve conhecer exatamente o que deseja estudar, obter dados e ter uma estimativa qualitativa de como esses dados serão analisados, a partir da experiência já adquirida no estudo de processos semelhantes

## QUADRO 11 – DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE UM PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

(conclusão)

Escolha das variáveis (fatores de influência) e das faixas de valores em que essas variáveis serão avaliadas	É definindo o nível específico (valor) que será empregado em cada ensaio, que deve ser tão constante quanto possível. Deve-se verificar como essas variáveis serão controladas nos níveis escolhidos e como eles serão medidos
Escolha adequada da variável de resposta	Ela deve garantir a objetividade na análise dos resultados obtidos. O critério principal para essa escolha é de que o erro experimental de medida da variável de resposta seja mínimo, permitindo a análise estatística dos dados, com um número mínimo de réplicas
Delineamento dos experimentos: tamanho da amostra (número de réplicas), seqüência de execução dos ensaios, necessidade de aleatorização ou do uso de blocos	Não se deve partir de um conjunto extenso de experimentos, que envolva um grande número de variáveis, estudadas em diversos níveis. É mais produtivo estabelecer-se um conjunto inicial com número reduzido de ensaios (poucas variáveis, poucos níveis de avaliação), ir aprendendo sobre o processo e aos poucos, acrescentar novas variáveis e níveis e eliminar variáveis que não se apresentem influentes
Execução dos experimentos	Essa etapa é extremamente importante pois garante a validade experimental e exige do pesquisador um conhecimento profundo dos instrumentos e equipamentos, para que possa monitorá-los e controlá-los
Análise dos resultados	Realizada com o uso de métodos estatísticos, a fim de que as conclusões estabelecidas sejam objetivas e estejam garantidas a confiabilidade e a validade dos resultados, de modo que se possa determinar o erro associado nas conclusões, de acordo com um dado grau de confiança previamente estabelecido

FONTE: BUTTON (2012).

## 3.8.1 Planejamento fatorial

O planejamento fatorial faz todas as combinações possíveis entre as variáveis estudadas para definir sua influência. A figura 11 mostra um planejamento fatorial  $2^2$ , onde são estudados os fatores A e B, cada um com dois níveis (BUTTON, 2012).

FIGURA 11 – EXEMPLO DE PLANEJAMENTO FATORIAL COM DUAS VARIÁVEIS E DOIS NÍVEIS

		Fator B	
		níveis	
		B1	B2
Fator A	A1	A1B1	A1B2
	A2	A2B1	A2B2

FONTE: BUTTON (2012).

### 3.8.2 Análise estatística

Existem diversas ferramentas para realizar a análise estatística dos dados obtidos em um planejamento experimental. Algumas delas estão descritas a seguir.

#### 3.8.2.1 Análise dos efeitos

A análise de um experimento envolve a estimativa dos efeitos médios ou principais de cada fator e da interação entre os fatores. O efeito médio refere-se à resposta esperada no centro do design experimental e os efeitos principais são estimados a partir da diferença entre as respostas nos níveis superior e inferior de um fator, quando os outros são mantidos em seu valor central. Essas estimativas estão associadas a indicativas do erro associado a cada efeito, chamado de erro padrão (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, 2017).

#### 3.8.2.2 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de Variância (ANOVA) expressa a variação total de um conjunto de dados como uma soma de termos, que podem ser atribuídos a fontes específicas de variação (CARPINETTI, 2009). A tabela 6 apresenta os principais parâmetros e como são calculados na análise de variância.

De acordo com o manual de utilização da ferramenta de análise de designs experimentais do software Statgraphics Centurion (2017), tem-se:

- Soma dos quadrados: mede o aumento da variância do erro experimental, no caso de cada fator ser removido do modelo separadamente;
- GL: graus de liberdade associados a cada termo;
- Quadrado médio: estima a variância do erro experimental;
- F: usado para determinar a significância estatística de cada efeito. Tendo F, calcula-se o valor-p abaixo do valor, que deve ser abaixo do valor crítico (como 0,05, caso o nível de significância seja de 5%) para ter-se um efeito estatisticamente significativo.

TABELA 6 – REPRESENTAÇÃO DE TABELA ANOVA

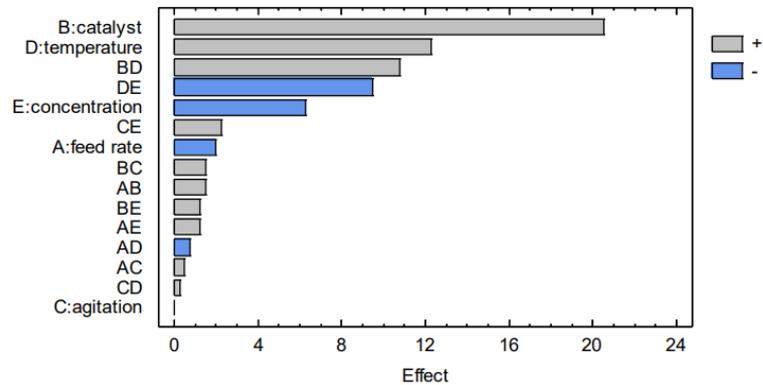
FATOR	SOMA DOS QUADRADOS	GL	QUADRADO MÉDIO	F
A	$SS_A$	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_A = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	$SS_B$	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_B = \frac{MS_B}{MS_E}$
AB	$SS_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_{AB} = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Erro	$SS_E$	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	

FONTE: PENTEADO (2015) apud HAN (2015).

### 3.8.2.3 Gráfico de Pareto

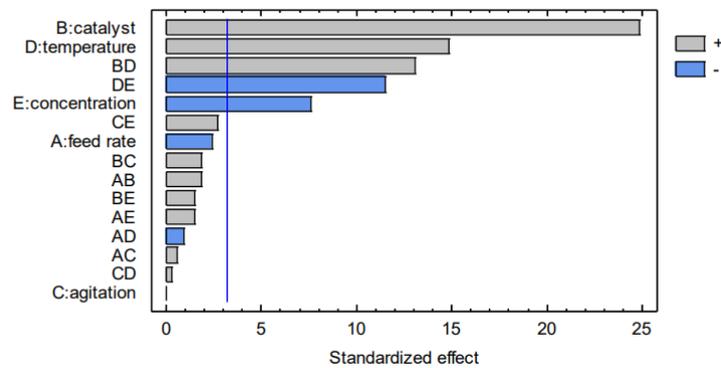
O gráfico de Pareto mostra uma representação gráfica de cada um dos efeitos e pode apresentar uma forma padronizada ou não. O gráfico não-padronizado apresenta o valor de cada efeito em ordem decrescente (figura 12), com cores diferentes para os efeitos positivos e negativos. O gráfico padronizado (figura 13) é plotado da mesma forma, porém dividindo cada efeito pelo seu erro padrão. Nele, é adicionada também uma linha, que representa o limite da significância estatística (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, 2017).

FIGURA 12 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE PARETO NÃO PADRONIZADO



FONTE: STATGRAPHICS TECHNOLOGIES (2017).

FIGURA 13 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE PARETO PADRONIZADO

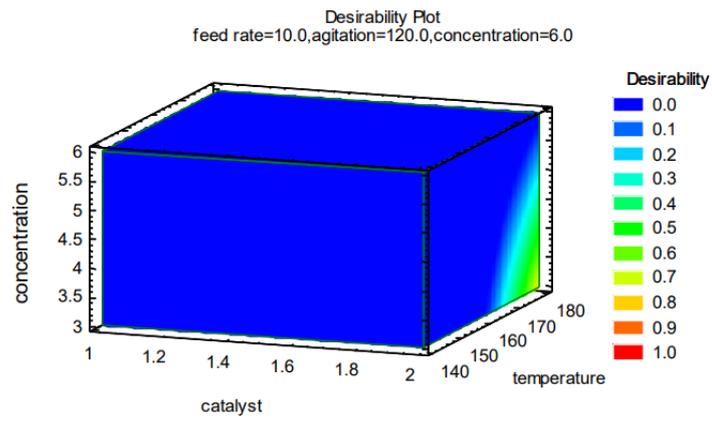


FONTE: STATGRAPHICS TECHNOLOGIES (2017).

### 3.8.2.4 Gráfico de desejabilidade

A função desejabilidade proporciona uma forma de otimizar múltiplos fatores especificando um objetivo para a variável de resposta. Os valores da desejabilidade estão restritos entre 0 e 1, sendo zero um valor inaceitável e 1 o valor mais desejável (TEIXEIRA, 2012). O gráfico de desejabilidade mostra o comportamento da desejabilidade em função das variáveis analisadas, como mostrado na figura 14.

FIGURA 14 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE DESEJABILIDADE COM 3 VARIÁVEIS



FONTE: STATGRAPHICS TECHNOLOGIES (2017).

## 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados nos Laboratórios de Reatores Químicos (LRQ) e Fenômenos de Transporte (LFT) do Departamento de Engenharia Química, localizados no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em João Pessoa – PB.

### 4.1 MATERIAIS

Foram utilizados nos ensaios de adsorção a fibra de sisal como adsorvente e, como adsorbato, o corante Violeta Crista, da marca PROQUIMIOS.

### 4.2 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOADSORVENTE

A fibra do sisal foi cortada manualmente, com uma tesoura, em pedaços medindo entre 0,5 e 1 cm de comprimento (figura 15). Ela foi utilizada sem pré-tratamento químico.

FIGURA 15 – FIBRA DE SISAL CORTADA



FONTE: O autor (2020).

#### 4.2.1 Ponto de Carga Zero (pH<sub>PCZ</sub>)

Para realizar esta caracterização, seguiu-se a metodologia de Deolin et al., 2013. Em doze erlenmeyers, foram adicionados 20 mg de fibra de sisal e 20 ml de solução aquosa de NaCl 0,1 mol/L. O pH inicial de cada solução foi ajustado para diferentes valores, entre 1 e 12, com soluções de NaOH e HCl 0,1 mol/L e o auxílio do pHmetro digital DLA-pH, da marca DEL LAB. As amostras foram deixadas sob agitação em uma Mesa Agitadora Orbital Digital SL-180/D, da marca SOLAB, por 24 h, a 100 rpm e temperatura ambiente, e seus valores de pH finais foram medidos.

#### 4.3 PREPARO DE SOLUÇÕES

Foi preparada uma solução-mãe de efluente sintético, em água destilada, contendo o corante Violeta Cristal em concentração de 100 mg/L. A partir dela, foram realizadas as diluições necessárias para a construção da curva de calibração e os ensaios do planejamento fatorial e da isoterma de adsorção.

#### 4.4 CURVA DE CALIBRAÇÃO

A curva de calibração foi construída relacionando-se a absorbância e a concentração de dez soluções, contendo 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 mg/L de corante. O valor da absorbância de cada uma delas foi medido com um espectrofotômetro UV/Vis, no comprimento de onda de 492 nm (REIS et al., 2017).

#### 4.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Foi elaborado um planejamento fatorial  $2^2 + 3$  pontos centrais, utilizando como variáveis o pH e a concentração inicial de corante. Os níveis utilizados estão

mostrados na tabela 7 e os ensaios foram distribuídos de acordo com a tabela 8. Eles foram realizados em triplicata, totalizando 21 experimentos.

Para os níveis de pH, foram escolhidos valores maiores do que o pH<sub>PCZ</sub> obtido em experimento prévio.

TABELA 7 – NÍVEIS DO PLANEJAMENTO FATORIAL

VARIÁVEIS	NÍVEIS		
	-	0	+
pH	7,5	8,5	9,5
Concentração	20	50	80

FONTE: O autor (2020).

TABELA 8 – ENSAIOS DO PLANEJAMENTO FATORIAL 2<sup>2</sup> + 3 PONTOS CENTRAIS

EXPERIMENTO	pH	CONCENTRAÇÃO (mg/L)
1	9,5	80
2	9,5	20
3	7,5	80
4	7,5	20
5	8,5	50
6	8,5	50
7	8,5	50

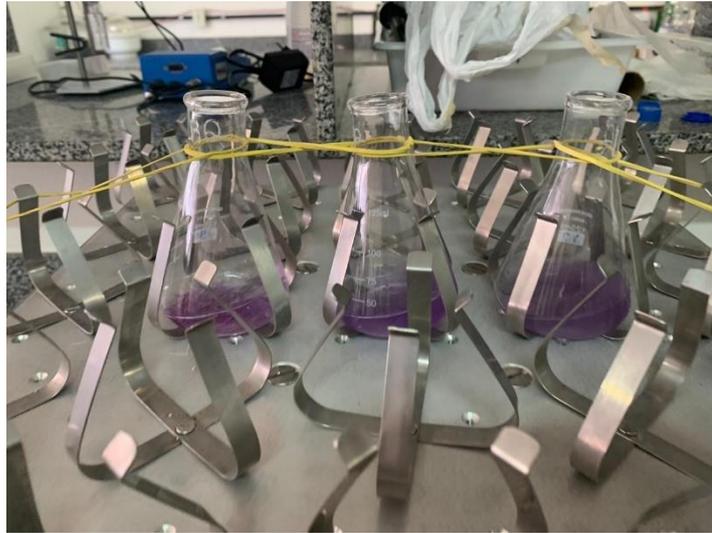
FONTE: O autor (2020).

Os resultados obtidos foram submetidos a uma análise estatística, com o auxílio do programa STATGRAPHICS Centurion XVII, sendo utilizado como resposta o percentual de remoção (%Rem).

#### 4.5.1 Ensaio em banho finito

Os ensaios de adsorção (figura 16) do planejamento fatorial foram realizados a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) e sob agitação de 200 rpm, em uma mesa agitadora, por 5 h. Neles, foram utilizados 25 ml de solução do efluente sintético e 500 mg de fibra de sisal cortada. Antes dos experimentos, foi medida a absorvância das soluções em um espectrofotômetro UV/Vis. Ao final deles, foi realizada a filtração das soluções, em papel de filtro qualitativo, e a absorvância foi medida novamente.

FIGURA 16 – EXEMPLO DE DISPOSIÇÃO DE ENSAIO EM BANHO FINITO



FONTE: O autor (2020).

#### 4.6 ISOTERMA DE ADSORÇÃO

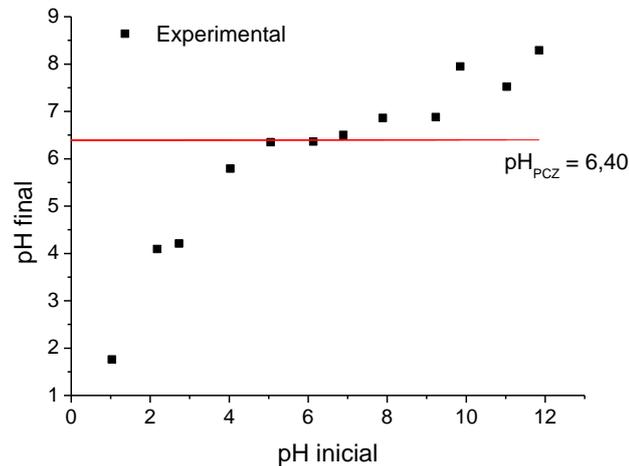
Os experimentos foram realizados de acordo com a metodologia descrita no tópico 4.5.1. Foram utilizadas as concentrações de 10, 20, 30, 40, 50, 60 E 80 mg/L de corante e o pH otimizado de acordo com o planejamento fatorial para a construção da isoterma de adsorção.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 PONTO DE CARGA ZERO (pH<sub>PCZ</sub>)

O ponto de carga zero encontrado para a fibra de sisal foi de 6,40, como mostrado na figura 17. Seu valor foi calculado através da média aritmética dos pontos que se mantiveram aproximadamente constantes no pH final, como proposto por Deolin, et al. (2013).

FIGURA 17 – PONTO DE CARGA ZERO DA FIBRA DE SISAL



FONTE: O autor (2020).

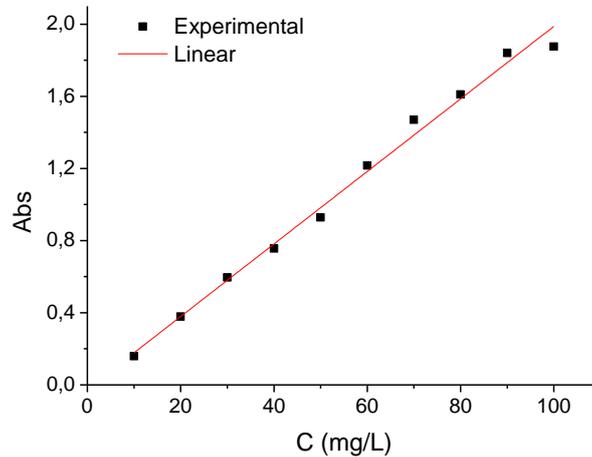
Esse resultado indica que, em uma solução com pH acima desse valor, sua superfície ficará negativamente carregada. Essa é a condição desejada para a remoção do corante VC, já que ele apresenta uma natureza catiônica.

### 5.2 CURVA DE CALIBRAÇÃO

Plotando o gráfico da absorbância em função da concentração de corante, percebe-se uma relação linear entre os valores, como visto na figura 18. Sendo assim, utilizou-se a regressão linear para obter a equação da reta, estando os coeficientes

linear e angular exibidos na tabela 9, assim como o seu coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

FIGURA 18 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO CORANTE VIOLETA CRISTAL



FONTE: O autor (2020).

TABELA 9 – PARÂMETROS DA CURVA DE CALIBRAÇÃO, OBTIDOS PELA EQUAÇÃO DA RETA

a	b	$R^2$
0,02011	-0,023	0,9915

FONTE: O autor (2020).

O  $R^2$  mostra um bom ajuste dos dados experimentais ao modelo proposto pela regressão. Tem-se, então, a equação (10).

$$Abs = 0,02011 C - 0,023 \quad (10)$$

### 5.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Através do planejamento experimental, foi possível analisar a influência dos parâmetros no percentual de remoção obtido em cada ensaio. Os resultados estão expostos na tabela 10 e é possível perceber que a condição que representou o maior percentual de remoção foi a do experimento 1, correspondente a 88%.

A tabela 11 mostra os efeitos calculados para cada um dos fatores. Através dela, nota-se que a concentração inicial e a combinação entre os fatores geram efeitos positivos, enquanto o pH gera um efeito negativo no percentual de remoção.

TABELA 10 – RESULTADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 2<sup>2</sup> + 3 PONTOS CENTRAIS

EXPERIMENTO	C <sub>F</sub> MÉDIA (mg/L)	%REM MÉDIO	DESVIO PADRÃO
1	9,150	88%	0,060
2	7,509	57%	0,198
3	10,426	86%	0,059
4	5,354	74%	0,189
5	7,459	85%	0,059
6	9,929	81%	0,066
7	9,962	80%	0,100

FONTE: O autor (2020).

TABELA 11 – EFEITOS ESTIMADOS PARA O %REMOÇÃO

EFEITO	ESTIMATIVA	ERRO PADRÃO
Média	0,786431	0,020568
A: pH	-0,07815	0,054419
B: C (mg/L)	0,218087	0,054419
AB	0,090356	0,054419

FONTE: O autor (2020).

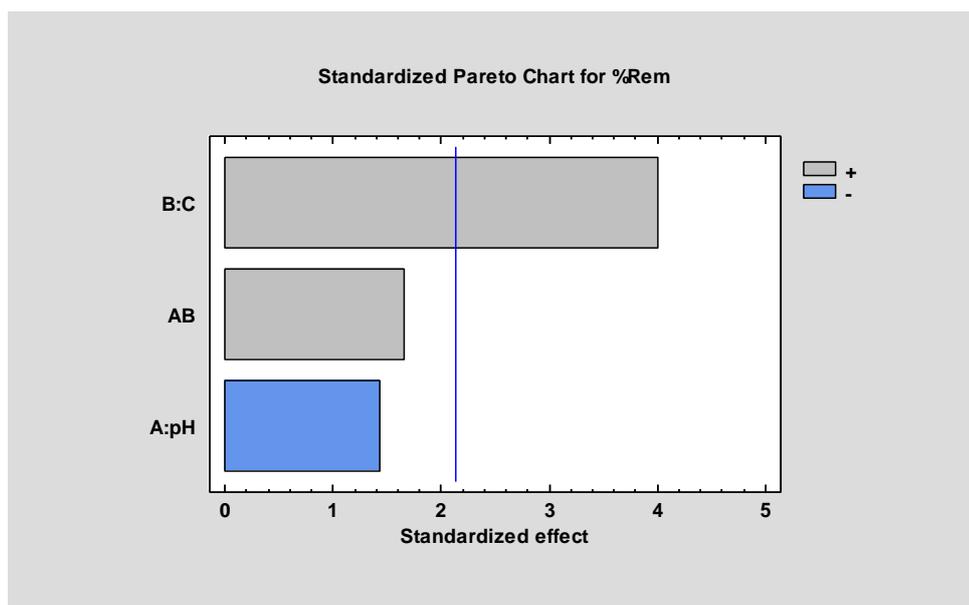
A análise de variância (tabela 12) foi feita para 95% de confiança. Dos parâmetros analisados, apenas a concentração inicial mostrou-se significativo, com o valor-p sendo menor do que 0,05.

TABELA 12 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O %REMOÇÃO

FATOR	SOMA DOS QUADRADOS	GL	QUADRADO MÉDIO	F	VALOR-P
A: pH	0,018324	1	0,018324	2,06	0,1715
B: C	0,142686	1	0,142686	16,06	0,0011
AB	0,024492	1	0,024492	2,76	0,1176
Erro	0,133262	15	0,008884		

FONTE: O autor (2020).

FIGURA 19 – GRÁFICO DE PARETO PARA OS EFEITOS PADRONIZADOS EM P = 0,05

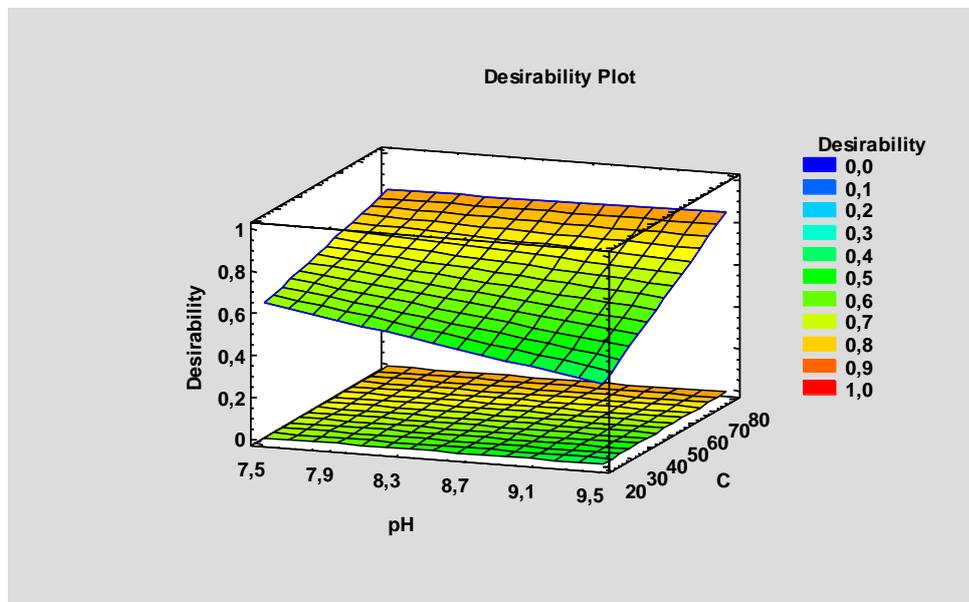


FONTE: O autor (2020).

O gráfico de Pareto (figura 19) confirma essa informação, mostrando que o efeito da concentração é o único que ultrapassa a linha do limite de significância. O maior valor de concentração é o que resulta no maior percentual de remoção. O pH e a combinação entre os dois fatores não apresentaram influência significativa no processo.

O gráfico de desejabilidade (figura 20) indica a melhor condição para a realização do processo, de acordo com os dados encontrados. Essa condição está representada pelo ponto que mais se aproxima do valor 1 de desejabilidade. Sendo assim, os parâmetros otimizados estão dispostos na tabela 13 e são referentes aos utilizados no experimento 1.

FIGURA 20 – GRÁFICO DE DESEJABILIDADE DO PROCESSO



FONTE: O autor (2020).

TABELA 13 – PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA O PROCESSO

PARÂMETRO	VALOR OTIMIZADO
Concentração	80 mg/L
pH	9,5

FONTE: O autor (2020).

#### 5.4 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

Os resultados do ensaio (figura 21) para a obtenção da isoterma de adsorção estão na tabela 14, mostrando que a concentração de 80 mg/L apresenta a maior capacidade adsortiva, de 3,4580 mg/g, e o maior percentual de remoção, de 86%.

FIGURA 21 – SOLUÇÕES DO ENSAIO DA ISOTERMA (CONCENTRAÇÕES INICIAIS ENTRE 10 E 50 mg/L) APÓS FILTRAÇÃO



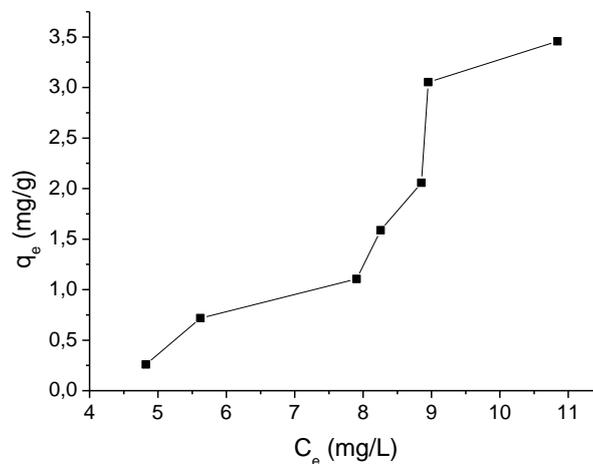
FONTE: O autor (2020).

TABELA 14 – RESULTADOS DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO, A TEMPERATURA AMBIENTE (APROXIMADAMENTE 25°C)

$C_0$ (mg/L)	$C_e$ (mg/L)	$q_e$ (mg/g)	%REM
10	4,8235	0,2588	52%
20	5,6191	0,7190	72%
30	7,9065	1,1047	74%
40	8,2546	1,5873	79%
50	8,8513	2,0574	82%
60	14,4704	2,2765	76%
80	10,8404	3,4580	86%

FONTE: O autor (2020).

FIGURA 22 – ISOTERMA DE ADSORÇÃO (APROXIMADAMENTE 25°C)



FONTE: O autor (2020).

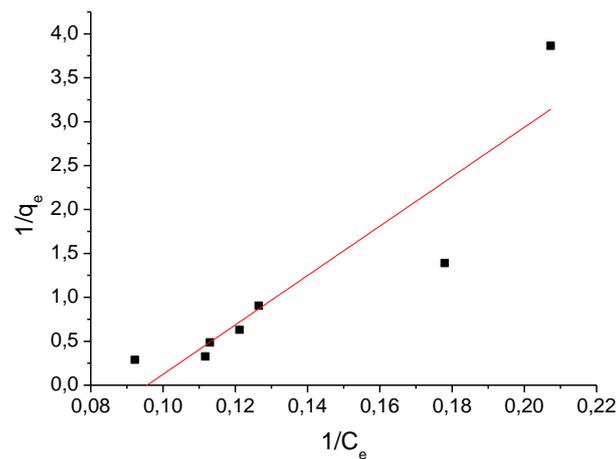
Sua representação gráfica pode ser encontrada na figura 22. Pode-se observar que ela se encaixa na classe L (Langmuir) e no subgrupo 4, de acordo com

a classificação de Giles, Smith e Hudson (1973), devido à formação de duas concavidades voltadas para baixo. Isso sugere que, no começo do processo de adsorção, há uma diminuição na quantidade de sítios ativos e, quando estes estão preenchidos, ocorre a formação de uma segunda camada de adsorbato.

#### 5.4.1 Ajuste da isoterma a modelos linearizados

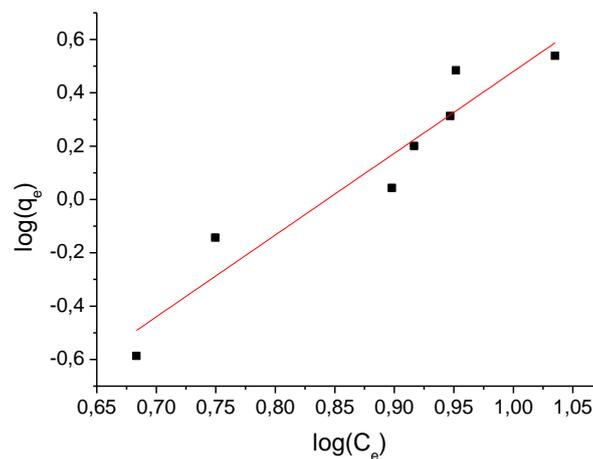
A isoterma foi linearizada para os modelos de Langmuir e Freundlich, como exposto nas figuras 23 e 24, respectivamente.

FIGURA 23 – LINEARIZAÇÃO DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO PELO MODELO DE LANGMUIR



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 24 – LINEARIZAÇÃO DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO PELO MODELO DE FREUNDLICH



FONTE: O autor (2020).

Através de regressão linear, foram obtidos os parâmetros da equação da reta (tabela 15) e estes foram utilizados para calcular as constantes dos modelos (tabela 16).

TABELA 15 – PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DA RETA DAS ISOTERMAS LINEARIZADAS

LANGMUIR			FREUNDLICH		
a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
28,11601	-2,68767	0,8387	3,06732	-2,58722	0,9228

FONTE: O autor (2020).

O R<sup>2</sup> aponta um melhor ajuste dos dados experimentais ao modelo de Freundlich. Além disso, os valores negativos das constantes de Langmuir obtidos mostram que esse modelo não é adequado para o processo. Além disso, o valor da constante n do modelo de Freundlich menor do que um indica que o processo é desfavorável.

TABELA 16 – PARÂMETROS DOS MODELOS DE LANGMUIR E FREUNDLICH LINEARIZADOS

LANGMUIR		FREUNDLICH	
q <sub>máx</sub>	K <sub>L</sub>	n	K <sub>F</sub>
-0,3721	-0,09559	0,3260	0,002587

Fonte: O autor (2020).

#### 5.4.2 Ajuste da isoterma a modelos não-linearizados

As isotermas também foram ajustadas para os modelos de Langmuir, Freundlich, Sips e de adsorção em multi-camadas através de regressão não-linear, com o auxílio do software OriginPro 8.5. Não houve convergência para o modelo de Langmuir, mas a representação gráfica e os parâmetros encontrados para os outros modelos encontram-se na figura 25 e na tabela 17.

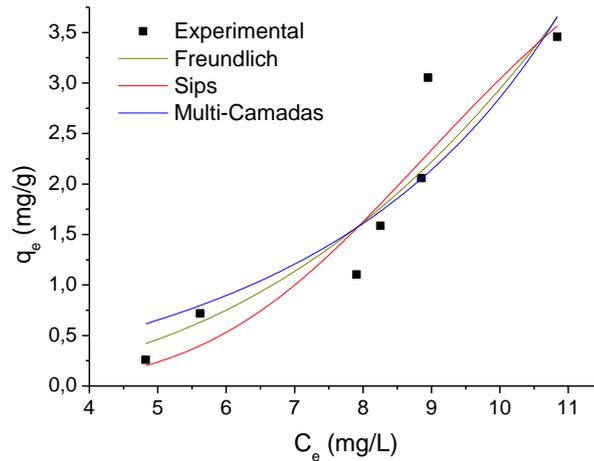
TABELA 17 – PARÂMETROS DOS MODELOS DE FREUNDLICH, SIPS E ADSORÇÃO EM MULTI-CAMADAS NÃO-LINEARES

FREUNDLICH		SIPS		MULTI-CAMADAS	
K <sub>F</sub>	0,00628	K <sub>S</sub>	2,20E-05	Q <sub>1</sub>	61,0560
n	0,3744	q <sub>máx</sub>	5,691	K <sub>1</sub>	0,00122
R <sup>2</sup>	0,8731	n <sub>S</sub>	0,2120	K <sub>2</sub>	0,04949
		R <sup>2</sup>	0,8856	R <sup>2</sup>	0,8464

Fonte: O autor (2020).

As curvas encontradas para todos os modelos, com as concavidades voltadas para cima, indicam um processo de adsorção desfavorável, confirmado pelo parâmetro  $n$  de Freundlich, novamente menor do que um. O modelo que apresentou o melhor ajuste foi o de Sips, com  $R^2$  de 0,8856 e  $n_s$  de 0,2120.

FIGURA 25 – AJUSTE AOS MODELOS DE ISOTERMAS DE ADSORÇÃO NÃO-LINEARES



FONTE: O autor (2020).

O parâmetro  $n_s$ , com seu valor próximo de zero, indica uma aproximação maior do modelo de Freundlich em relação ao modelo de Langmuir e confirma o processo através dos ajustes obtidos. Isso aponta para um sistema heterogêneo, com interação entre as moléculas do adsorbato, provavelmente favorecido pelo efeito de matriz. O teste para avaliar este efeito de matriz deve ser analisado.

Quando o valor  $1/n$  for maior do que a unidade, o adsorvente tem maior afinidade pelo solvente, sugerindo que há uma forte atração intermolecular entre os dois. (DELLE-SITE, 2001).

## 6 CONCLUSÃO

A análise do ponto de carga zero do material foi importante para a determinação das condições de operação do processo de adsorção e indicou que valores de pH maiores do que 6,40 deveriam ser utilizados para tornar a superfície do adsorvente negativamente carregada e favorecer a adsorção do corante catiônico.

No planejamento experimental, foi estudada a influência do pH e da concentração inicial no percentual de remoção. Das condições estudadas, apenas uma apresentou um percentual de remoção médio abaixo de 70% e o melhor resultado foi encontrado no experimento realizado com pH 9,5 e concentração inicial de 80 mg/L do corante, que apresentou um percentual de remoção médio de 88%.

Como os experimentos foram realizados a temperatura ambiente, de aproximadamente 25°C, em relação a esse parâmetro, o efluente sintético já estaria de acordo com a norma do CONAMA, que não permite o seu descarte em temperaturas acima de 40°C. Já um pH de 9,5 não se encaixa nas condições determinadas, que permitem um máximo de 9,0. Entretanto, a análise estatística mostra que o pH não exerce influência significativa sobre o processo, que também pode ser realizado em valores mais baixos, sem muito prejuízo.

A isoterma de adsorção aponta para adsorvente de superfície heterogênea, onde ocorre a formação de mais de uma camada de adsorbato. Os valores do parâmetro  $n$  menores do que um, implicam valores de  $1/n$  maior do que a unidade, obtidos através da aplicação dos dados experimentais aos modelos de isoterma de Freundlich linearizados e não linearizados, e as curvas dos gráficos não-lineares com as concavidades voltadas para cima indicam que o processo é desfavorável. Portanto, os melhores ajustes foram obtidos para o modelo linearizado de Freundlich, com um  $R^2$  de 0,92, e para o modelo não-linear de Sips, com um  $R^2$  de aproximadamente 0,89 e  $ns < 1$ , o que, satisfatoriamente, indicou o processo heterogêneo com possível interferência do efeito de matriz. O modelo de Langmuir, que pressupõe adsorção em monocamada e superfície homogênea não representa o processo.

Os resultados obtidos em relação ao percentual de remoção mostraram-se satisfatórios, quando comparados aos encontrados na literatura para a adsorção com

o sisal *in natura*. Entretanto, a isoterma de adsorção mostrou que, nessa temperatura e nas condições escolhidas, o processo não é favorável para a remoção desse corante devido a possibilidade de interferência nas leituras de absorvância e, conseqüentemente, nos resultados, por efeito de matriz. Nesse caso, é sugerido para efeito de continuidade do trabalho, novo experimento em banho finito, sob as mesmas condições dos ensaios previamente realizados, porém sem a presença do corante, para que seja encontrada a absorvância da matriz e este valor possa ser subtraído dos valores de absorvância encontrados nos ensaios com o corante. Porém, neste trabalho não foi possível prosseguir devido à pandemia de Covid-19 e aos decretos de isolamento social, fato que não impediu a conclusão deste trabalho inicial de forma remota.

Assim, percebe-se que esse material apresenta um potencial para ser utilizado como bioadsorvente de corantes têxteis, porém, requer um estudo mais aprofundado para que as condições mais adequadas para o processo sejam evidenciadas.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fazer o experimento para determinar a interferência da matriz nas leituras de absorbância;
- Obter a isoterma de adsorção para o pH de 7,5;
- Realizar o estudo cinético do processo;
- Avaliar a possibilidade de produção de carvão ativado com o sisal contaminado com o corante;
- Avaliar a possibilidade de modificações na fibra de sisal para aumentar a eficiência da remoção.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA FIOCRUZ DE NOTÍCIAS. **Nova 'Memórias do IOC' traz estudos sobre as propriedades terapêuticas do sisal**. 2013. Disponível em: <<https://agencia.fiocruz.br/nova-mem%C3%B3rias-do-ioc-traz-estudos-sobre-propriedades-terap%C3%AAuticas-do-sisal>>. Acesso em: 29 mar. 2020.
- ALMEIDA, E. V. R. **Valorização da celulose de sisal: uso na preparação de acetatos e de filmes de acetados de celulose/celulose e quitosana/celulose**. 2009. 158 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75131/tde-05072010-104358/publico/ErikaVirginiaRaphaeldeAlmeidaR.PDF>>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira**. Brasília, 2013. Cartilha. Disponível em: <<http://abit-files.abit.org.br/site/publicacoes/cartilha.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Perfil do Setor**. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>. Acesso em: 18 mar. 2020.
- BARROS, C. E. J. **A sustentabilidade têxtil: reaproveitamento de resíduos da indústria têxtil e vestuário: estudo de casos de sistemas de gestão de resíduos têxteis no Brasil**. 2016. 126 p. Dissertação (Mestrado em Design e Marketing) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2016. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/55858>>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- BATZIAS, F. A.; SIDIRAS, D. K. Dye adsorption by prehydrolysed beech sawdust in batch and fixed-bed systems. **Bioresource Technology**, v.98, n. 6, p. 1208-1217, abr. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852406002331?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 jun. 2020.
- BAZZO, A. **Aplicação e caracterização do caroço de abacate (*Persea americana mil*) como adsorvente na remoção do corante Violeta Cristal**. 2015. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em:

<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/117661/000966805.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

BERTOLINI, T. C. R.; FUNGARO, D. A. **Estudos de Equilíbrio e Modelagem Cinética da Adsorção do Corante Cristal Violeta sobre Zeólitas de Cinzas Leve e Pesada de Carvão**. Trabalho apresentado no 3<sup>rd</sup> International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, 2011. Disponível em: <[http://www.advancesincleanerproduction.net/third/files/sessoes/4B/7/Bertolini\\_TCR%20-%20Paper%20-%204B7.pdf](http://www.advancesincleanerproduction.net/third/files/sessoes/4B/7/Bertolini_TCR%20-%20Paper%20-%204B7.pdf)>. Acesso em: 19 mar. 2020.

BOLDRIN, M. V. et al. **Tratamento de efluentes coloridos por fotocatalise**. P11002795-5, 23 ago. 2010. Disponível em: <<https://auin.unesp.br/tecnologias/70/tratamento-de-efluentes-coloridos-por-fotoeletrocatalise>>. Acesso em: 29 mar. 2020.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2 set. 1981. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=313>>. Acesso em: 21 mar. 2020.

BRASIL, J. L. et al. Planejamento estatístico de experimentos como uma ferramenta para otimização das condições de bissorção de Cu(II) em batelada utilizando-se casca de nozes pecã como biossorvente. **Química nova**. São Paulo, v. 30, n. 3, mar./jun. 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422007000300008](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000300008)>. Acesso em: 29 mar. 2020.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Campinas, 2012. Apostila. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/apostila2012.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2020.

CARPINETTI, L. C. R. **Planejamento e análise de experimentos**. São Carlos, 2009. Apostila. Disponível em: <<http://repositorio.eesc.usp.br/bitstream/handle/RIEESC/6043/Planejamento%20e%20analise%20de%20experimentos%20fev%202018.pdf?sequence=5>>. Acesso em: 29 mar. 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes,

complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Lex:** Diário Oficial da União, p. 89, 16 mai. 2011. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res11/res43011.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

COSIBRA. **Desenvolvimento de tecidos de sisal para utilização em compósitos poliméricos.** Disponível em: <[https://www.cosibra.com.br/blog\\_ver.php?id=3](https://www.cosibra.com.br/blog_ver.php?id=3)>. Acesso em: 29 mar. 2020.

CRISPINIANO, F. F. et al. **Avaliação da fibra do sisal como adsorvente de corante Tupy 16 Bordô.** Trabalho apresentado no 4º Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, Campina Grande, 2019. Disponível em: <[https://www.editorarealize.com.br/revistas/conapesc/trabalhos/TRABALHO\\_EV126\\_MD4\\_SA6\\_ID1208\\_30062019232050.pdf](https://www.editorarealize.com.br/revistas/conapesc/trabalhos/TRABALHO_EV126_MD4_SA6_ID1208_30062019232050.pdf)>. Acesso em: 08 dez. 2019.

D'ARAÚJO, A. J. P. **Utilização de caranguejo e sisal como bioadsorventes na remoção de óleo.** 2017. 72 p. Trabalho final de curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

DANIEL, M. H. Tecidos. In: DANIEL, M. H. **Guia prático dos tecidos.** 1 ed. Barueri: Século Editora, 2018.

DELLE-SITE, A. Factors affecting sorption of organic compounds in natural sorbent/water systems and sorption coefficients for selected pollutants. A review. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 30, p. 187-439, 2001.

DEV, V, R. G. et al. *Agave sisalana*, a biosorbent for the adsorption of Reactive Red 120 from aqueous solutions. **The Journal of The Textile Institute**, v. 101, n. 5, p. 414-422, jan. 2010. Disponível em: <[https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00405000802445289?casa\\_token=bO6kl-QciOoAAAAA%3AEKcn1qkMS79FimtOivPTSJhWRBWFATv3weWW2ADzoQEfX4zWf-kioHTgGqRvwmUroSzqKmdJwdjYft3y](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00405000802445289?casa_token=bO6kl-QciOoAAAAA%3AEKcn1qkMS79FimtOivPTSJhWRBWFATv3weWW2ADzoQEfX4zWf-kioHTgGqRvwmUroSzqKmdJwdjYft3y)>. Acesso em: 20 jun. 2020.

DJILALI, Y. et al. Alkaline treatment of timber sawdust: a straightforward route toward effective low-cost absorbent for the enhanced removal of basic dyes from aqueous solutions. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 20, s. 1, p. s241-s249, set. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610312001676?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

FCEM. **O potencial da indústria têxtil no Brasil e como investir.** Disponível em: <<https://fcem.com.br/noticias/o-potencial-da-industria-textil-no-brasil-e-como-investir/>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

FCEM. **Qual a importância da indústria têxtil no Brasil e o que representa?** Disponível em: <<https://fcem.com.br/noticias/qual-a-importancia-da-industria-textil-no-brasil-e-o-que-representa/>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (FIEMG); FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Guia técnico ambiental da indústria têxtil.** [201?]. Disponível em: <[http://www.feam.br/images/stories/producao\\_sustentavel/GUIAS\\_TECNICOS\\_AMBIENTAIS/guia\\_textil.pdf](http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_textil.pdf)>. Acesso em: 21 mar. 2020.

FERREIRA, B. C. S. **Desenvolvimento de novos materiais lignocelulósicos e quitinosos com potencial aplicação em química ambiental.** 2015. 139 p. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/SFSA-9W3RE8/1/2404.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

FERREIRA, R. C. **Aplicação de argila maranhense como adsorvente para os corantes têxteis Violeta Cristal e Azul Turquesa em sistema aquoso.** 2014. 62 p. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2014. Disponível em: <<https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/985>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Sisal.** Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/en/>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

GILES, C. H.; SMITH, D.; HUITSON, A. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 47, n. 3, p. 755–765, jun. 1974.

GOMES, A. V. S.; COSTA, N. R. V.; MOHALLEN, N. D. S. Os Tecidos e a Nanotecnologia. **Química e Sociedade.** São Paulo, v. 38, n. 4, p. 288-296, nov. 2016. Disponível em: <[http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc38\\_4/03-QS-43-15.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc38_4/03-QS-43-15.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2020.

GOTEX SHOW. **Setor têxtil: análises e perspectivas**. Disponível em: <<http://gotexshow.com.br/2019/12/11/setor-textil-analises-e-perspectivas/>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**. São Paulo, v. 8, n. 1, jan./fev. 2000. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-4042200000100013&script=sci\\_arttext&tling=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-4042200000100013&script=sci_arttext&tling=pt)>. Acesso em: 19 mar. 2020.

HAN, H. H. **Utilização da função desirability na otimização do processo de usinagem da superliga Nimomic 80A**. 2015. 66 p. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/139172/000865191.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 29 mar. 2020.

IBGE. **Comissão Nacional de Classificação**. Disponível em: <<https://concla.ibge.gov.br/busca-online-cnae.html?view=divisao&tipo=cnae&versao=10&divisao=13>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

KHADIR, A.; NEGARESTANI, M.; GHIASINEJAD, H. Low cost sisal fibers/polypyrrole/polyaniline biosorbent for sequestration of reactive orange 5 from aqueous solutions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 4, ago. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343720303043?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

KUNZ, A. et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**. São Paulo, v. 25, n. 1, jan./fev. 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422002000100014&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422002000100014&script=sci_arttext)>. Acesso em: 23 mar. 2020.

MARTIN, R. A. et al. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade *Agave sisalana*. **Polímeros**. São Carlos, v. 19, n. 1, 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282009000100011&script=sci\\_arttext&tling=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282009000100011&script=sci_arttext&tling=pt)>. Acesso em: 25 mar. 2020.

MATOS, S. P. Adsorção. In: MATOS, S. P. **Operações Unitárias: Fundamentos, Transformações e Aplicações dos Fenômenos Físicos e Químicos**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2015. p. 145-151.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Adsorption. In: MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5 ed. Singapura: McGraw-Hill, 1993. p. 810-837.

MEGIATTO JR, J. D. **Fibras de sisal: estudo de propriedades e modificações químicas visando aplicação em compósitos de matriz fenólica**. 2006. 267 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75131/tde-25102007-110438/publico/JacksonDirceuMegiattoJr.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

MELLO, V. F. B. et al. Estudo e caracterização de propriedades da argila esmecita na remoção de corantes têxteis. **Matéria**. Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, out./dez. 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762013000400008](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762013000400008)>. Acesso em: 15 mar. 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **O que é o Conama?** Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: 21 mar. 2020.

MOREIRA, S. A. **Adsorção de íons metálicos de efluente aquoso usando bagaço do pedúnculo de caju: estudo de batelada e coluna de leito fixo**. 2008. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Setor de Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/17229>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 1 ed. Fortaleza: UFC, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>>. Acesso em: 16 mar. 2020.

NETO, J. Q. G. **Avaliação da adsorção do corante azul de metileno em coluna de leito fixo utilizando fibra do sisal como adsorvente**. 2017. 68 p. Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.  
PAVIA, D. L. et al. Espectroscopia no Infravermelho. In: PAVIA, D. L. et al. **Introdução à espectroscopia**. 2 ed. Cengage learning, 2015. p. 15-59.

PEIXOTO, F.; MARINHO, G.; RODRIGUES, K. Corantes têxteis: uma revisão. **Holos**. Natal, a. 29, v. 5, p. 98-106, jan./out. 2013. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1239/729>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

PESSOA, M. E. A. **Otimização do processo de bioissorção de corante têxtil Reactive Blue 222**. 2019. 84 p. Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

PINO, G. A. H. **Bioissorção de Metais Pesados Utilizando Pó da Casca de Coco Verde (*Cocos nucifera*)**. 2005. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=7596@1>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

PORTOGENTE. **Por que a indústria têxtil é uma das mais poluentes?** Disponível em: <<https://portogente.com.br/noticias-corporativas/111101-Por%20que%20a%20ind%C3%BAstria%20t%C3%AAxtil%20%C3%A9%20uma%20das%20mais%20poluentes?>>. Acesso em: 21 mar. 2020.

REIS, M. A. et al. **Avaliação da adsorção do corante Violeta Cristal empregando bagaço de malte como bioissorvente**. Trabalho apresentado no XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Ijuí, 2017. Disponível em: <<https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/cricte/article/view/8707>>. Acesso em: 21 mar. 2020.

RINCÓN, M. L. **Você sabe como os tecidos são feitos?** Disponível em: <<https://www.megacurioso.com.br/invencoes/85386-voce-sabe-como-os-tecidos-sao-feitos.htm>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

SANTOS, R. A.; BRANDÃO, A. **Árvore do conhecimento: território sisal**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, [200?]. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio\\_sisal/arvore/CONT000ghou0b0002wx5ok05vadr1fx7pyzy.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_sisal/arvore/CONT000ghou0b0002wx5ok05vadr1fx7pyzy.html)>. Acesso em: 23 mar. 2020.

SANTOS, S. C. R. **Adsorção de corantes têxteis em materiais naturais e residuais de matriz inorgânica**. 2009. 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química e Biológica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/58825>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. Adsorption, Ion Exchange, and Chromatography. In: SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. **Separation Process Principles: with Applications Using Process Simulators**. 4 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. p. 451-518.

SIGMA-ALDRICH. **Crystal Violet**. Disponível em: <[https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/c6158?lang=pt&region=BR&cm\\_sp=Insite-\\_-prodRecCold\\_xviews-\\_-prodRecCold10-2](https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/c6158?lang=pt&region=BR&cm_sp=Insite-_-prodRecCold_xviews-_-prodRecCold10-2)>. Acesso em: 20 mar. 2020.

SILVA, C. C. **Estudo do efeito da modificação da fibra de sisal usando plasma frio reativo e seu impacto na remoção do Azul de Metileno**. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Programa Interdisciplinar em Biociências Aplicadas, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2019. Disponível em: <<http://btdt.ufmt.edu.br/handle/tede/900>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

SILVA, C. C. et al. Influence of plasma treatment on the physical and chemical properties of sisal fibers and environmental application in adsorption of methylene blue. **Materialstoday Communications**, v. 23, jun. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492820309557?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

SILVA, L. R. C. et al. Uso de Fotólise Direta e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV em Solução Aquosa Contendo e Corante Violeta Cristal. **Holos Environment**. Rio Claro, v. 17, n. 1, p. 138-148, ago./nov. 2017. Disponível em: <<https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/12211/8206>>. Acesso em: 19 mar. 2020.

SILVA, O. R. R. F. et al. A cadeia produtiva do sisal no Nordeste brasileiro. In: XIMENES, L. F. et al. **Tecnologias de convivência com o semiárido brasileiro**. 1 ed. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. p. 913-951. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1118787>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

SILVA, O. R. R. F. et al. **Cultivo do sisal no Nordeste brasileiro**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008. Circular Técnica. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/278171>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

SOARES, M. C. S. S. **Biossorção de corante reativo utilizando caranguejo uçá (*Ucides cordatus*)**. 2019. 61 p. Trabalho final de curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

STATGRAPHICS TECHNOLOGIES. **DOE Wizard – Screening Designs**. 2017. Disponível em: <[http://cdn2.hubspot.net/hubfs/402067/PDFs/DOE\\_Wizard-Screening\\_Designs.pdf](http://cdn2.hubspot.net/hubfs/402067/PDFs/DOE_Wizard-Screening_Designs.pdf)>. Acesso em: 29 mar. 2020.

TEIXEIRA, T. A. P. **Utilização de ferramentas estatísticas no desenvolvimento de uma formulação de defensivo agrícola**. 2012. 52 p. Monografia (Graduação em Engenharia Indústria Química) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, Lorena, 2012. Disponível em: <<https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2012/MIQ12019.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2020.

VARGAS, V. H. et al. Adsorção dos corantes Reativo Preto 5 e Azul de Metileno por fibras de sisal: aplicação do modelo HSDM. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2017, São Carlos. **Anais...** São Paulo: Blucher, 2017. p. 2795-2800. Disponível em: <<https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/adsoro-dos-corantes-reativo-preto-5-e-azul-de-metileno-por-fibras-de-sisal-aplicao-do-modelo-hsdm-26422>>. Acesso em: 08 dez. 2019.

VARGAS, V. H. et al. Sisal fiber as an alternative and cost-effective adsorbent for the removal of methylene blue and reactive black 5 dyes from aqueous solutions. **Chemical Engineering Communications**, v. 7, n. 4, p. 523-536, abr. 2019. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00986445.2019.1605362>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

VELOSO, L. A. **Corantes e pigmentos**. SBRT, 2012. Dossiê técnico. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTcwOA==>>. Acesso em: 19 mar. 2020.

WANKAT, P. C. Introduction to Adsorption, Chromatography, and Ion Exchange. In: WANKAT, P. C. **Separation Process Engineering: Includes Mass Transfer Analysis**. 3 ed. New Jersey: Prentiss Hall, 1944.