

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**MARESSA MARTINS DE PINHO**

**ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO A PARTIR DO LODO DE UMA  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**MANAUS  
2023**

**MARESSA MARTINS DE PINHO**

**ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO A PARTIR DO LODO DE UMA  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**Monografia apresentada ao Curso de  
Graduação em Engenharia Química da  
Escola Superior de Tecnologia da  
Universidade do Estado do Amazonas,  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química.**

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Kiki Pinheiro Melo Braga

MANAUS  
2023

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

P634aa Pinho, Maressa Martins de  
Adsorção de azul de metileno a partir do lodo de uma  
estação de tratamento de água / Maressa Martins de Pinho.  
Manaus : [s.n], 2023.  
63 f.: color.; 7 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química -  
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.  
Inclui bibliografia  
Orientador: Braga, Kiki Pinheiro Melo

1. lodo de ETA. 2. adsorção. 3. corante. 4.  
isotermas de adsorção. 5. parâmetros de equilíbrio. I.  
Braga, Kiki Pinheiro Melo (Orient.). II. Universidade do  
Estado do Amazonas. III. Adsorção de azul de metileno a  
partir do lodo de uma estação de tratamento de água

**MARESSA MARTINS DE PINHO**

**ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO A PARTIR DO LODO DE UMA  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**Monografia de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheiro,  
Habitação em Engenharia Química – Escola Superior de Tecnologia,  
Universidade do Estado do Amazonas**

**Banca Examinadora:**

*Kiki Pinheiro Melo Braga*

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Kiki Pinheiro Melo Braga – Orientadora**

*Aline Gabriela Castro da Silva*

**Ma. Aline Gabriela Castro da Silva - UEA**

*Jefferson Luiz G. Silva*

**Prof. Dr. Jefferson Luiz Grangeiro da Silva – UEA**

**Conceito:**

**Manaus, 21 de Agosto de 2023.**

**“Grandes são as obras do Senhor,  
Dignas de estudo para quem as ama.” Salmos 111:2**

**“A minha graça é tudo o que você precisa, pois o meu poder  
é mais forte quando você está fraco.”  
2 Coríntios 12:9.**

## AGRADECIMENTOS

*Soli Deo Gloria!* Agradeço imensamente a Deus, pela sabedoria que me concedeu durante toda a vida escolar, pela força que me sustentou quando eu estava fraca, por ter me trazido até aqui e por todas as oportunidades que surgiram durante a minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais, Valdênia e Job, pelo sacrifício e esforço durante toda a minha vida para proporcionar os estudos adequados para me tornar quem eu sou hoje. A minha irmã, Priscila, por todo o cuidado e apoio durante meu crescimento e anos de graduação. Aos meus avôs, Valdemiro e Waldira, que sempre me apoiaram e me incentivaram na minha vida profissional e meus estudos.

A esta universidade e todos os professores que fizeram a diferença na minha formação. A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kiki Pinheiro Melo Braga, por toda ajuda, instrução e material que propiciou a realização deste trabalho.

À empresa júnior StartHub, local onde eu tive o primeiro contato com o mercado de trabalho, onde eu comecei a moldar a profissional e líder que sou hoje, aos colegas que conheci, trabalhei e vivi experiências importantes que marcaram minha trajetória profissional.

Ao meu coordenador na Águas de Manaus, Eduardo Kale, que me concedeu a oportunidade de ser estagiária na empresa, abrindo as portas do início da minha vida profissional e ao meu supervisor, Edinaldo Viana, por todos os ensinamentos e pela contribuição diária para o meu desenvolvimento profissional.

Às minhas amigas da ABU, Abigail Rebeca e Consuelo Oliveira, e ao meu grupo familiar Esperança, pelo suporte emocional, por vibrarem sinceramente a cada conquista nesse ciclo importante da minha vida, além de orações nos momentos difíceis da graduação.

Ao meu parceiro e minhas parceiras da engenharia química, Gabriel, Maria Eduarda, Idaline e Pâmela, pela paciência, ajuda, dedicação e esforço que compartilhamos durante esses anos de graduação, pelas disciplinas, seminários e trabalhos que concluímos juntos e apoiamos uns aos outros. Ao meus parceiros do laboratório Ilum, Ronildo Pimentel e Guilherme Brasil, que me incentivaram e me ajudaram durante os experimentos.

Para finalizar, agradeço a todos que passaram pela minha vida e contribuíram de alguma forma para que eu estivesse aqui, encerrando esse ciclo e ajudando a me tornar Engenheira Química.

## RESUMO

Atualmente, um grande esforço tem sido realizado para minimizar a contaminação dos corpos hídricos, assim como a geração de resíduos prejudiciais ao meio ambiente. As indústrias têxteis, por apresentarem grande consumo de água para produção de seus produtos, geram uma elevada quantidade de efluente. Entre os principais constituintes do efluente têxtil estão os corantes, e uma das principais formas de remoção de corante é através da adsorção. Este trabalho analisa a obtenção de dois adsorventes de baixo custo, utilizando o lodo proveniente de duas estações de tratamento de água (ETA) em Manaus- uma estação de decantação e outra de flotação. Para isso, fez-se planejamento experimental, visando determinar as melhores condições para o processo de adsorção. Também foram realizados ensaios para as isotermas de adsorção, ajustando os dados experimentais aos modelos de Langmuir e Freundlich para avaliar se a remoção do azul de metileno é favorável, determinando a capacidade máxima de adsorção, assim como os parâmetros de equilíbrio. Para o preparo dos adsorventes, foi feita coleta, evaporação da água, moagem, peneiramento e os lodos foram ativados quimicamente com  $H_3PO_4$  e pirolisado a  $500^\circ C$  por três horas para produção dos adsorventes, ads-leta1 e ads-leta2. Os materiais foram caracterizados morfológicamente por MEV. De acordo, com os resultados após o planejamento, os adsorventes produzidos obtiveram resultados significativos com uma massa de 0,10 g de ads-leta1 e uma temperatura de  $30^\circ C$ , atingindo um percentual de remoção de 98,19%, e uma massa de 0,12 g de ads-leta2 com uma temperatura de  $35^\circ C$  e atingindo um percentual de remoção de 98,76%. As condições do processo para a construção dos ensaios das isotermas, foram construídos com base nas variáveis que tiveram o maior efeito significativo na remoção de acordo com os resultados obtidos pelo planejamento. No caso do ads-leta 1, a massa teve efeito significativo, por isso as isotermas foram construídas variando a massa (0,04; 0,07 e 0,10 g) com uma temperatura fixa de  $30^\circ C$ , já para o ads-leta2, o efeito mais significativo foi a temperatura, por isso realizou a variação da temperatura (30, 35 e  $40^\circ C$ ) com uma massa fixa de 0,12g. Os dados das isotermas mostraram melhor ajuste para o modelo de Freundlich, indicando um processo em multicamada heterogêneo tanto para o ads-leta1 como para o ads-leta2. Os resultados mostraram uma capacidade máxima de adsorção de  $9,1402 \text{ mg.g}^{-1}$  para o ads-leta1 e  $2,5492 \text{ mg.g}^{-1}$  para o ads-leta2, indicando que o lodo de ETA, quando submetido aos tratamentos químico e térmico, apresenta-se como uma matéria-prima alternativa e de baixo custo para produção de adsorvente utilizado na remoção de corantes.

Palavras-chave: Poluição ambiental, lodo de ETA, adsorção, parâmetros de equilíbrio, isotermas de adsorção, adsorvente, corante.

## RESUMO

Currently, significant efforts are being made to minimize water body contamination and the generation of harmful environmental waste. Textile industries, due to their high water consumption in the production of their goods, generate a significant amount of effluent. Among the primary components of textile effluent are dyes, and one of the main methods for dye removal is through adsorption. This study analyzes the production of two low-cost adsorbents using sludge from two water treatment plants (WTPs) in Manaus - one from a settling tank and the other from a flotation unit. To achieve this, an experimental design was conducted to determine the best conditions for the adsorption process. Adsorption isotherm tests were also performed, fitting the experimental data to Langmuir and Freundlich models to evaluate the favorability of removing methylene blue. This helped determine the maximum adsorption capacity and equilibrium parameters. For the preparation of the adsorbents, collection, drying, grinding, and sieving were performed, followed by chemical activation with  $H_3PO_4$ , and pyrolysis at  $500^\circ C$  for three hours to produce the adsorbents, ads-leta1, and ads-leta2. The materials were morphologically characterized by SEM. According to the results from the experimental design, the produced adsorbents achieved significant results with a mass of 0.10g and a temperature of  $30^\circ C$  for ads-leta1, reaching a removal percentage of 98.19%, and for ads-leta2, a temperature of  $35^\circ C$  and a mass of 0.12g achieved a removal percentage of 98.76%. Regarding the isotherm tests, they were designed based on the variables that had the most significant effect on removal, according to the results obtained from the experimental design. For ads-leta1, the mass had a significant effect, so the isotherms were constructed with varying masses (0.04; 0.07; and 0.10g) at a fixed temperature of  $30^\circ C$ . For ads-leta2, the most significant effect was temperature, so the isotherms were constructed with varying temperatures (30, 35, and  $40^\circ C$ ) at a fixed mass of 0.12g. The data from the isotherm tests showed a better fit to the Freundlich model, indicating a heterogeneous multilayer process for both ads-leta1 and ads-leta2. The results showed a maximum adsorption capacity of  $9.1402 \text{ mg.g}^{-1}$  for ads-leta1 and  $2.5492 \text{ mg.g}^{-1}$  for ads-leta2, suggesting that WTP sludge, when subjected to chemical and thermal treatments, serves as an alternative and low-cost raw material for the production of adsorbents used in dye removal.

- Key words: Environmental pollution, WTP sludge, adsorption, equilibrium parameters, adsorption isotherms, adsorbent, dye.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Lançamento de efluentes sem tratamento. ....	13
Figura 2- Estrutura molecular do azul de metileno .....	14
Figura 3- Adsorção e identificação do adsorvato, adsorvente e adsorvido. ....	15
Figura 4- Diagrama das isotermas: (a) favorável, (b) linear e (c) desfavorável. ....	18
Figura 5- Classificação de isotermas. ....	18
Figura 6- Esquema de representação de uma Estação de Tratamento da Água. ....	21
Figura 7- Captação sendo realizada no Rio Negro. ....	22
Figura 8- Aplicação de polímero nos floculadores. ....	23
Figura 9- Decantador em uma estação de tratamento de água. ....	24
Figura 10- Lodo gerado no flotor em uma estação de tratamento de água. ....	24
Figura 11- Filtros em uma estação de tratamento de água. ....	25
Figura 12- Decantador 7 na ETA 1. ....	28
Figura 13- Tubulações de descarga de lodo do decantador 7 da ETA 1. ....	28
Figura 14- Lodo acumulado no flotor na ETA 2. ....	29
Figura 15- Tela de CLP de flotação da ETA 2. ....	29
Figura 16- Estufa utilizada (a) e (b) amostra de lodo condicionada em uma forma ..	30
Figura 17- Amostras de lodo após ter ficado a 105°C na estufa. ....	30
Figura 18- Amostras de lodo ativadas sob agitação na incubadora. ....	31
Figura 19- Amostras de lodo pirolisado macerado (a) e peneiras utilizadas para análise granulométrica (b) .....	32
Figura 20- Ensaio de adsorção em batelada. ....	36
Figura 21- Microscopia eletrônica de varredura das amostras de lodo <i>in natura</i> da ETA 1 .....	38
Figura 22- Microscopia eletrônica de varredura das amostras de lodo <i>in natura</i> da ETA 2. ....	38
Figura 23- Microscopia eletrônica de varredura do: (a) ads-leta1 e (b) ads-leta2. ....	39
Figura 24- Curva analítica da concentração de corante em função da absorbância máxima (664 nm). ....	39
Figura 25- Soluções do corante azul de metileno antes da adsorção. ....	42
Figura 26- Soluções do corante azul de metileno depois da adsorção. ....	42
Figura 27- Diagrama de Pareto para a resposta de remoção pelo ads-leta1. ....	44
Figura 28- Diagrama de Pareto para a resposta de remoção pelo ads-leta2. ....	45
Figura 29 -Superfície de resposta para o ads-leta1. ....	46
Figura 30- Superfície de resposta para o ads-leta2. ....	46
Figura 31- Forma linear da isoterma de Langmuir para o ads-leta1 com a temperatura de 30°C com as seguintes massas: 0,04 g, 0,07 g e 0,1 g. ....	47
Figura 32- Forma linear da isoterma de Freundlich para o ads-leta1 com a temperatura de 30°C com as seguintes massas: 0,04 g, 0,07 g e 0,1 g. ....	48
Figura 33- Forma linear da isoterma de Langmuir para o ads-leta2 nas seguintes temperaturas: 30°C, 35°C e 40°C. ....	50
Figura 34- Forma linear da isoterma de Freundlich para o ads-leta2 nas seguintes temperaturas: 30°C (a), 35°C (b) e 40°C (c). ....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais diferenças entre adsorção física e química.....	16
Tabela 2- Níveis dos fatores reais e codificados. ....	34
Tabela 3- Matriz do delineamento composto central 2 <sup>3</sup> (DCCR).....	34
Tabela 4- Classificação granulométrica dos adsorventes: ads-leta1 e ads-leta2. ....	37
Tabela 5- Compilação de dados do ads-leta1 para a análise estatística do planejamento fatorial. ....	40
Tabela 6 -Compilação de dados do ads-leta2 para a análise estatística do planejamento fatorial. ....	41
Tabela 7- Tabela de efeitos para o ads-leta1.....	43
Tabela 8- Tabela de efeitos para o ads-leta2.....	44
Tabela 9 – Parâmetro das equações de Langmuir e Freundlich para o ads-leta1. ....	48
Tabela 10– Parâmetro das equações de Langmuir e Freundlich para o ads-leta2. ..	51
Tabela 11- Comparação da capacidade de adsorção de alguns adsorventes estudados na remoção de corantes. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Ads-leta1	Adsorvente produzido do Lodo da Estação de Tratamento de Água 1
Ads-leta2	Adsorvente produzido do Lodo da Estação de Tratamento de Água 2
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise de Estabilidade Térmica
CLP	Controlador Lógico Programável
$C_{azm}$	Concentração inicial de azul de metileno, mg/L
$C_{f\ azm}$	Concentração final de azul de metileno, mg/L
$C_e$	Concentração de adsorvato no equilíbrio, mg/L
$C_o$	Concentração inicial de adsorvato, mg/L
DCC	Delineamento Composto Central
E	Taxa de Remoção do Corante, %
EDX	Espectrometria de Energia Dispersiva por Difração de Raios X
ETA	Estação de Tratamento de Água
INPA	Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
$K_f$	Constante de capacidade de adsorção de Freundlich, $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) \cdot (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})^{1/n}$
$K_L$	Constante de interação adsorvato/adsorvente, L/g
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
$m_{ads}$	Massa do adsorvente, g
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
n	Constante de Freundlich relacionada à intensidade de adsorção
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
$q_e$	Quantidade de soluto adsorvido por grama de adsorvente em equilíbrio, mg/g
$q_{m\acute{a}x}$	Capacidade máxima de adsorção, mg/g
$R_L$	Fator de separação de Langmuir
rpm	Rotações por minuto
UEA	Universidade do Estado do Amazonas
V	Volume da solução do corante em contato com o adsorvente, L
UV-Vis	Ultravioleta-visível
1/n	Constante relacionada à heterogeneidade da superfície

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>13</b>
2.1.	CORANTES NA ÁGUA POTÁVEL	13
2.1.1	<b>Azul de Metileno</b>	<b>14</b>
2.2.	A ADSORÇÃO	15
2.2.1	<b>Cinética de Adsorção</b>	<b>16</b>
2.2.2	<b>Isotermas de Adsorção</b>	<b>17</b>
2.2.3	<b>Tipos de Adsorventes</b>	<b>20</b>
2.3.	ORIGEM DO LODO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>27</b>
3.1	PRODUÇÃO DOS ADSORVENTES	27
3.1.1	<b>Procedência e Coleta do Material</b>	<b>27</b>
3.1.2	<b>Pré-tratamento do Lodo</b>	<b>30</b>
3.1.3	<b>Processo de Ativação Química</b>	<b>31</b>
3.2.	CARACTERIZAÇÃO DO LODO	33
3.3.	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS EM BATELADA	33
3.4.	ISOTERMAS DE ADSORÇÃO	35
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>37</b>
4.1.	ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO	37
4.1.1	<b>Determinação de Umidade e Rendimento do Adsorvente</b>	<b>37</b>
4.1.2	<b>Análise Granulométrica</b>	<b>37</b>
4.1.3	<b>Caracterização morfológica- MEV</b>	<b>38</b>
4.2.	CURVA DE CALIBRAÇÃO	39
4.3.	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	40
4.4.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	42
4.4.1	<b>Tabela de efeitos</b>	<b>42</b>
4.4.2	<b>Gráfico de superfície de resposta</b>	<b>45</b>
4.5.	ISOTERMAS DE ADSORÇÃO	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>PERSPECTIVAS</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O descarte de forma inadequada de resíduos sejam eles, sólidos ou líquidos, é um grande problema ambiental. Segundo o Natural Resources Defense Council, aproximadamente 80% das águas residuais provenientes de processos industriais do mundo, são despejadas no meio ambiente na maioria das vezes, sem o devido tratamento, acarretando sérios problemas ambientais relacionados (Mudakkar *et al.*, 2013).

As indústrias têxteis, por apresentarem grande consumo de água para produção de seus produtos, geram uma elevada quantidade de efluente. Entre os principais constituintes do efluente têxtil estão os corantes, sendo a remoção do ambiente aquático extremamente importante já que a maioria deles é tóxica, como por exemplo o azul de metileno, que além possuir elevada toxicidade apresenta resistência ao tratamento químico e biológico podendo na sua decomposição química, produzir substâncias mais tóxicas que o próprio corante em si (Peixoto; Marinho; Rodrigues, 2013; Crini, 2005).

Existem muitas metodologias que podem ser empregadas para remoção de corantes sintéticos, utilizando técnicas de troca iônica, extração por solventes, osmose reversa e adsorção. Os procedimentos de adsorção são os mais eficientes para a remoção, pois os corantes são transferidos do efluente aquoso para uma fase sólida, diminuindo o volume de efluente a uma quantidade mínima retida num sólido (Cardoso, 2010).

Há vários tipos de adsorventes, tais como: o carvão ativado, a alumina ativada e o hidróxido de ferro granular, e sendo o carvão ativado o mais empregado nos processos avançados de tratamento de efluentes, apesar de possuir um alto custo (Metcalf e Eddy, 2015; Pajootan *et al.*, 2012).

Algumas técnicas para a remoção de cor de efluentes têxteis vêm sendo estudadas com adsorventes mais baratos, um deles é o lodo de estação de água (LETA). O LETA é um resíduo originado do tratamento da água, que é descartado em elevadas quantidades correspondendo cerca de 0,2% a 4% do volume de água tratada, sendo por isso um material de baixo custo, que poderia ser reutilizado como

adsorvente, evitando que o mesmo seja destinado ao aterro e aumentando assim sua vida útil. (Richter, 2001; Ahmad; Ahmad; Alam, 2016).

Neste cenário considerando a dificuldade de remoção de corantes, como azul de metileno e a grande quantidade de LETA obtida diariamente, esse respectivo trabalho tem como objetivo geral propor um adsorvente utilizando lodo de estação de tratamento de água para remoção do corante azul de metileno pelo processo de adsorção e os objetivos específicos são:

- (i) obter as isotermas de adsorção para o azul de metileno;
- (ii) realizar ajustes nos modelos matemáticos de isotermas existentes;
- (iii) utilizar o delineamento composto central para encontrar as melhores condições operacionais para estimar a capacidade máxima de adsorção de azul de metileno.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. CORANTES NA ÁGUA POTÁVEL

Os efluentes têxteis são caracterizados por serem altamente coloridos, devido à presença de corantes que não se fixam às fibras durante o processo de tingimento gerando grande quantidade de resíduos (Kunz, Zamora, Moraes, Durán; 2002). A remoção de corantes sintéticos presentes em efluentes industriais é de grande interesse, uma vez que alguns desses corantes e seus produtos de degradação podem ser carcinogênicos e tóxicos e, conseqüentemente, o seu tratamento não pode depender somente da biodegradação (Hameed *et al.*, 2007).

Com suas intensas colorações, os corantes restringem a passagem de radiação solar, reduzindo a atividade fotossintética natural provocando alterações no meio aquático, causando toxicidade aguda e crônica nos ecossistemas. Além disso, os resíduos desses corantes podem apresentar uma quantidade de metais pesados acima dos permitidos pelas leis ambientais (Ferrari, 2010; Booth *et al.*, 1985).

Figura 1- Lançamento de efluentes sem tratamento.



Fonte: Fashion Network (2022).

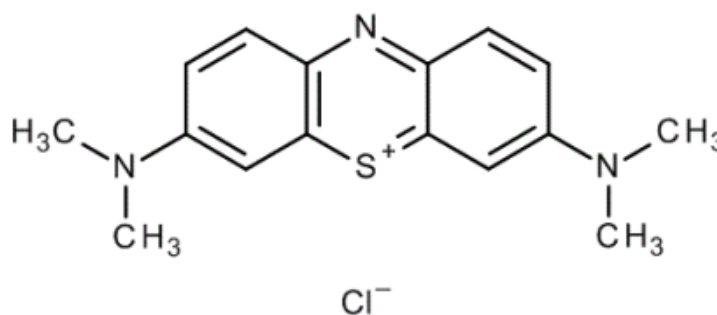
Existem por volta de 10 mil tipos de corantes diferentes, utilizados nas indústrias químicas, que são descartados após a utilização, em associação com

outros efluentes, ocasionando grandes impactos no meio ambiente. Um desses corantes é o azul de metileno (Freitas, 2013).

### 2.1.1 Azul de Metileno

O azul de metileno é um corante orgânico, aromático, heterocíclico e solúvel em água ou em álcool, além disso ele é catiônico pertencente à classe das fenotiazinas (Lima *et al.*, 2007). A estrutura molecular é a que se encontra na Figura 2, com a seguinte fórmula química ( $C_{16}H_{18}N_3S Cl$ ) e massa molecular de 319,8518 g/mol.

Figura 2- Estrutura molecular do azul de metileno



Fonte: Merk Chemicals (2011).

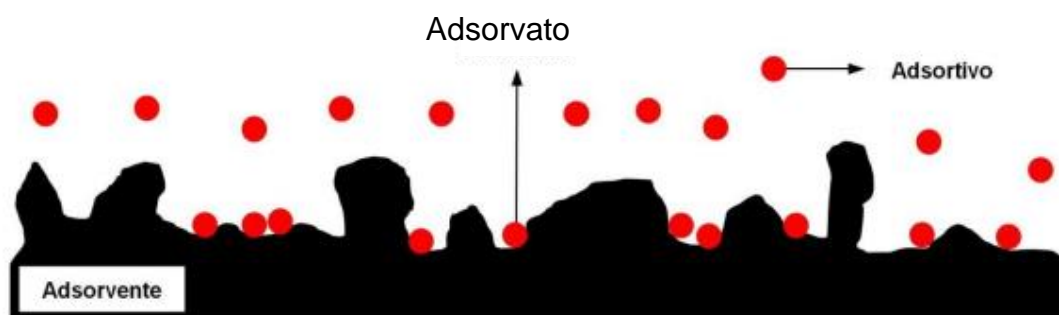
A presença do azul de metileno em água potável é um problema em estudo pois esse material apresenta resistência ao tratamento químico e biológico podendo na sua decomposição química, produzir substância mais tóxicas que o corante em si (Crini, 2005). As principais técnicas disponíveis para descoloração de efluentes têxteis envolvem processos de adsorção, precipitação, degradação química, eletroquímica, fotoquímica e biodegradação (Guaratini; Zanoni, 2000).

Dentre os métodos de tratamento, a adsorção tem se destacado como uma técnica de separação principalmente por ser um processo de alta seletividade, a nível molecular, demonstrando-se eficaz e econômica (Belisário *et al.*, 2009). Sendo o azul de metileno o corante mais utilizado em testes de adsorção porque serve como um composto modelo para o estudo da remoção de contaminantes orgânicos e corantes em solução aquosa (Aygün *et al.*, 2003).

## 2.2. A ADSORÇÃO

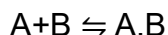
O processo de acumulação de substâncias que estão em solução sob uma interface adequada é denominado adsorção (Metcalf e Eddy, 2003). O material inicialmente adsorvido é o adsorvato e o material onde se faz a remoção é chamado de adsorvente, conforme podemos observar na Figura 3.

Figura 3- Adsorção e identificação do adsorvato, adsorvente e adsortivo.



Fonte: VIANA (2013).

Segundo Letterman (1999); a adsorção de moléculas pode ser representada como uma reação química:



Onde A é o adsorvato, B é o adsorvente e A.B é o composto adsorvido.

A adsorção é um fenômeno decorrente da aderência de moléculas de um componente de uma fase fluida ou gasosa sobre a superfície do sólido adsorvente, e existem dois processos de adsorção que tem origem e podem ser distinguidos de acordo com as forças atrativas envolvidas: a adsorção física e adsorção química (Oliveira, 2004; Peruzzo, 2003).

Na adsorção física, também chamada de fisisorção, as forças atuantes são fracas como as forças intermoleculares de Van der Waals e eletrostáticas. Nela, as moléculas não compartilham nem transferem elétrons, de modo que tanto o adsorvato como o adsorvente preservam sua individualidade, portanto é uma adsorção totalmente reversível (Nascimento *et al.*, 2014).

Em contrapartida, na adsorção química, também chamada de quimissorção, ocorrem ligações químicas entre o adsorvato e o adsorvente envolvendo

essencialmente troca ou partilha de elétrons entre as moléculas, portanto, pode ser irreversível (Nascimento *et al.*, 2014).

Segundo Adamson e Gast (1997) e Nascimento *et al.* (2014), a quimissorção, ocorrerá apenas onde há sítios ativos na superfície do adsorvente, ou seja, uma adsorção localizada e altamente específica; já na fississorção, decorrerá de maneira uniforme na superfície do sólido. A Tabela 1 denota as principais diferenças entre as adsorções química e física.

Tabela 1- Principais diferenças entre adsorção física e química.

<b>Adsorção física</b>	<b>Adsorção química</b>
Não específico	Altamente específico
Sensível a temperatura	
Sem dissociação das espécies adsorvidas	Possível dissociação das espécies adsorvidas
Ocorre por interações intermoleculares	Ocorre por meio de ligações químicas
Reversível	Pode ser irreversível
Baixa energia de ativação	Alta energia de ativação
Monocamada ou múltiplas camadas	Estritamente monocamada na superfície do sólido

Fonte: Adaptado de Radecki (1999) e Ruthven (1984).

O ponto de equilíbrio, ou seja, quando a concentração de soluto se torna constante, determinará o fim do processo de adsorção, que começa assim que o adsorvato entra em contato com o adsorvente. Essa interação adsorvente-adsorvato é estudada a partir da cinética que ocorre no processo de adsorção (Toledo, 2005).

### 2.2.1 Cinética de Adsorção

Os modelos cinéticos objetivam determinar a velocidade (ou taxa) com as quais as moléculas do adsorvato são adsorvidas pelo adsorvente. As cinéticas são curvas obtidas por meio da quantificação da adsorção ao longo do tempo. Esta velocidade depende das características físico-químicas do adsorvato (natureza do adsorvato, peso molecular, solubilidade etc.), do adsorvente (natureza, estrutura de poros) e da solução (pH, temperatura, concentração) (Claudino, 2003). Em princípio,

a cinética de adsorção pode ser conduzida por diferentes processos (Inglezakis *et al.*, 2019):

- a) Transferência de massa externa: a qual corresponde a transferências de moléculas da fase fluida para superfície externa da partícula adsorvente, por intermédio de uma camada de fluido que envolve a partícula;
- b) Difusão no poro: a qual é ocasionada pela difusão de moléculas no fluido para o interior dos poros;
- c) Difusão na superfície: a qual corresponde à difusão das moléculas totalmente adsorvidas ao longo da superfície do poro.

Existem diferentes modelos nos quais se pode ajustar os dados do processo de adsorção com relação ao tempo, além disso esse processo está diretamente relacionado à concentração de adsorvato no sistema fluido, isto é, quanto maior a disponibilidade de adsorvato, maior será a velocidade de difusão desses para a superfície do adsorvente (Nascimento *et al.*, 2014).

### 2.2.2 Isotermas de Adsorção

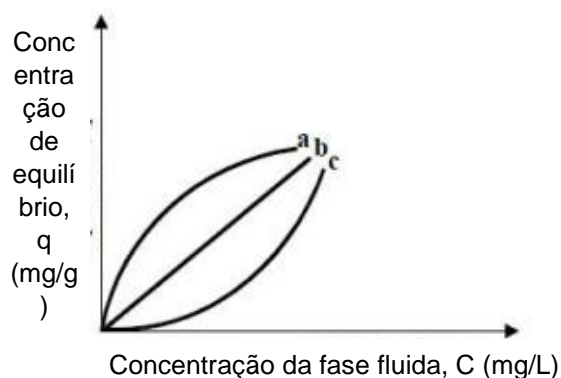
A razão entre a quantidade de substância adsorvida por quantidade de adsorvente ( $q_e$ ) em função da concentração de adsorvato ( $C_e$ ) em solução. Uma expressão desse tipo é denominada de isoterma de adsorção (Letterman, 1999). De acordo com Memlak (2019) a partir de uma isoterma de adsorção, é possível inferir algumas informações:

- como o adsorvente se comportará frente à adsorção do soluto;
- estimar a capacidade máxima adsortiva do adsorvente;
- determinar se o adsorvente será viável para a adsorção do adsorvato em questão.

De acordo com Fogler (2002), os principais fatores que afetam no processo adsortivo são temperatura, velocidade de agitação, relação sólido-líquido, o tamanho das partículas e a presença de outras espécies competindo pelos sítios de adsorção. A capacidade adsortiva também depende do tamanho da molécula a ser adsorvida porque isso define seu acesso aos poros do adsorvente (microporos, mesoporos ou macroporos) e a solubilidade determina as interações hidrofóbicas (Zuim, 2010).

A escolha da melhor isoterma que representa o comportamento para o processo de adsorção é utilizada na modelagem do fenômeno de adsorção (Peruzzo, 2003). A Figura 4 representa a avaliação da dinâmica de adsorção das isotermas podendo ser classificados: (a) linear, (b) favorável e (c) desfavorável.

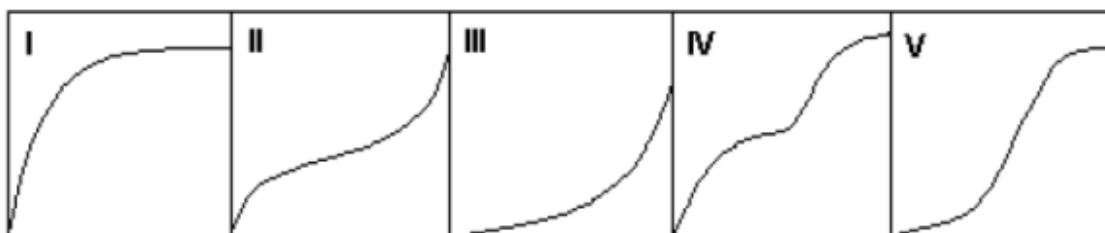
Figura 4- Diagrama das isotermas: (a) favorável, (b) linear e (c) desfavorável.



Fonte: Adaptado de Borba (2006).

No contexto das isotermas de adsorção, Brunauer *et al.* (1940) propuseram um modelo de classificação para elas, por meio do qual todas as isotermas poderiam ser classificadas em cinco tipos diferentes de curvas, como mostra a Figura 5.

Figura 5- Classificação de isotermas.



Fonte: Ruthven (1984).

As isotermas de tipo I são características de adsorventes microporosos, e são classificadas como tipo Langmuir encontradas em sistemas em que o adsorvato é quimiossorvido. As isotermas de tipo II ilustram o comportamento da adsorção em sólidos macroporosos ou que não apresentam formação de poros, e são caracterizadas pela formação de múltiplas camadas de moléculas do adsorvato na superfície do sólido. Nesse tipo de curva, a parte côncava, em relação ao eixo das abcissas, é atribuído à conclusão de uma monocamada. (Ruthven, 1984; Brunauer, Emmett, Teller, 1938).

Assim como a isoterma do tipo II, a isoterma do tipo III é observada para sólidos não porosos, porém é uma forma relativamente rara. As isotermas do tipo IV e V são encontradas em sistemas com sólidos porosos (Ruthven, 1984). Os modelos comumente utilizados para tratamento de dados de isotermas são os de Langmuir e Freundlich (Vilar, 2006).

- Modelo de Langmuir

Segundo Nascimento *et al.* (2014) o modelo de Langmuir considera os seguintes fatores, se há um número definido de sítios e se esses sítios possuem energia equivalente, se as moléculas que são adsorvidas não interagem umas com as outras; a adsorção ocorrer em monocamada; e cada sítio pode suportar somente uma molécula adsorvida. A Equação 1 representa a isoterma de Langmuir:

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

Onde:

$q_e$  = quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg/g);

$q_{\max}$  = capacidade máxima de adsorção (mg/g);

$K_L$  = constante de interação adsorvato/adsorvente (L/g);

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

Além disso, um indicativo muito usado no modelo de Langmuir, corresponde ao grau de desenvolvimento do processo de adsorção, é o valor do fator de separação de Langmuir ( $R_L$ ), o qual é calculado utilizando-se os resultados obtidos de  $q_{\max}$  e  $K_L$ . O valor de  $R_L$  é obtido através da seguinte Equação 2:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

De modo geral, quando  $R_L$  está entre 0 e 1, é indicativo de que a adsorção é favorável e que o adsorvato prefere a fase sólida à fase líquida.

- Modelo de Freundlich

Segundo Nascimento *et al.* (2014), o modelo de isoterma de Freundlich, representado pela Equação 3, pode ser aplicado para sistemas não ideais, superfícies heterogêneas, com adsorção multicamada. Além disso, o modelo considera o sólido heterogêneo, aplicando uma distribuição exponencial para

caracterizar os diversos tipos de sítios de adsorção, que possuem diferentes energias adsorvidas.

$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

(3)

Onde:

$q_e$  = quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg/g);

$C_e$  = concentração na fase sólida no equilíbrio em solução (mg/L);

$1/n$  = constante relacionada à heterogeneidade da superfície;

$K_F$  = constante de capacidade de adsorção de Freundlich [(mg. g<sup>-1</sup>). (g.L<sup>-1</sup>)<sup>1/n</sup>].

$n$  = constante de Freundlich relacionada à intensidade de adsorção. Indica se a isotérmica é favorável ou desfavorável, sendo favorável quando possui valores na faixa de 1 a 10. Quanto maior o valor de  $n$ , maior a interação entre adsorvato e adsorvente.

### 2.2.3 Tipos de Adsorventes

Segundo Metcalf e Eddy (2015) o carvão ativado, o hidróxido de ferro granular e a alumina ativada são materiais adsorventes muito utilizados. Dentre eles, atualmente, o carvão ativado é o mais amplamente empregado nos processos avançados de tratamento de efluentes, pois além de apresentar uma elevada área superficial e eficiência na remoção de uma extensa gama de substâncias, ele apresenta a vantagem de ser regenerável. Para Pajootan *et al.* (2012), no entanto, a utilização do carvão ativado apresenta um elevado custo, associado a dificuldades no processo de reativação e para dispor adequadamente os resíduos.

Nas últimas décadas inúmeros trabalhos vêm estudando e documentando novos materiais adsorventes, como a utilização de resíduos como precursores para material adsorvente. O lodo é um desses materiais alternativos, dentre esses estudos que utilizam ele podemos citar:

- Ritter (2020) estudou a adsorção de fósforo de esgotos sanitários em lodo de estação de tratamento de água contendo alumínio. Onde foram realizados ensaios cinéticos e isotérmicos em batelada e em colunas de leito fixo. Os resultados desse estudo evidenciaram que as

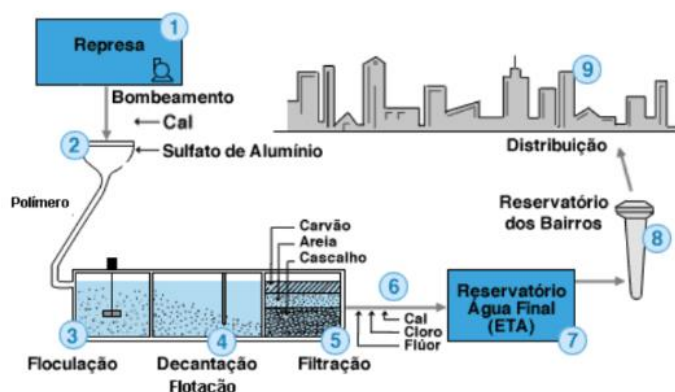
partículas de menor granulometria resultaram em um melhor processo de adsorção.

- Souza (2019) investigou a utilização de lodo de estação de tratamento de água como adsorvente para remoção do corante negro eriocromo T. O lodo foi ativado quimicamente com  $H_3PO_4$  e pirolisado a  $500^\circ C$ . Os resultados desse estudo demonstraram que o adsorvente obtido apresentou um rendimento bastante satisfatório (94,79%), assim como mostrou-se eficaz na remoção do corante (91,57%).
- Viana (2013) estudou a pirólise de lodo de esgoto para obtenção de produtos contendo coque e sua utilização como material adsorvente de poluentes (fenol e tartrazina) em meio aquoso. O lodo foi submetido ao processo de pirólise a  $500^\circ C$  em diferentes períodos (0, 30, 60, 120 e 180 minutos) produzindo cinco produtos de pirólise. Apresentaram uma adsorção de fenol de 3,68 mg/g a 6,21 mg/g e tartrazina de 17,86 mg/g a 45,66 mg/g.

### 2.3. ORIGEM DO LODO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Para transformar água bruta em água potável, as estações de tratamento de água (ETA) utilizam de processos de ciclo convencional como: captação, adução, coagulação, floculação, flotação ou decantação, filtração dos resíduos, os quais são, normalmente, constituídos de partículas coloidais, e por fim desinfecção, conforme a Figura 6. No processo de floculação e decantação, a matéria sólida contida na água junto aos floculantes forma o lodo de ETA (Padilha, 2007).

Figura 6-Esquema de representação de uma Estação de Tratamento da Água.



Fonte: Adaptado de Sabesp (2010).

As etapas podem ser descritas da seguinte forma:

- Captação e adução: a água é captada do rio e levada a estação por adutoras. Na etapa de adução inicia-se o tratamento com a correção de pH da água bruta (pré-correção). Nas estações em Manaus utiliza-se a cal;

Figura 7- Captação sendo realizada no Rio Negro.



Fonte: Própria (2023).

- Coagulação: após a pré-alkalinização, é aplicado o coagulante (sulfato de alumínio) para iniciar o processo de coagulação das partículas;
- Floculação: é necessário a utilização de polímero, na entrada dos floculadores nas estações em Manaus, para que haja a formação de flocos estáveis e densos, e assim a decantação ou flotação ocorra de forma eficiente;

Figura 8- Aplicação de polímero nos floculadores.



Fonte: Própria (2023).

- Decantação ou Flotação: são duas tecnologias diferentes empregadas nas duas estações em Manaus: na ETA 1, os decantadores (Figura 9) com módulos lamelares são responsáveis pela separação do material em suspensão e a água clarificada; na ETA 2, os flotadores desempenham esse papel, com auxílio de microbolhas que se agregam aos flocos, elevando-os em superfície formando um sobrenadante (Figura 10), a água clarificada passa por um fundo falso, a qual é encaminhada para filtração;

Figura 9- Decantador em uma estação de tratamento de água.



Fonte: Própria (2023).

Figura 10- Lodo gerado no flotor em uma estação de tratamento de água.



Fonte: Própria (2023).

- Filtração: O material em suspensão que não foi totalmente removido nas unidades de decantação/ flotação, será retido no sistema de filtração (Figura 11).

Figura 11- Filtros em uma estação de tratamento de água.



Fonte: Própria (2023).

- Desinfecção: Após a filtração da água o pH é corrigido com Cal hidratada. A desinfecção é feita através da injeção de desinfetante, como o hipoclorito de sódio; e a fluoretação, através da dosagem de ácido fluossilícico.

A quantidade de resíduos gerados em ETAs depende, primordialmente, da qualidade da água bruta, do tipo e dosagem dos produtos químicos, das condições de operação, dentre outros fatores. Segundo Richter (2001), o resíduo composto da água e sólidos suspensos contidos na própria água, após a aplicação de produtos químicos durante o tratamento é chamado de lodo. Na Figura 10 pode-se observar o lodo gerado em uma estação de tratamento de água.

Normalmente, este lodo é composto por hidróxido de alumínio, carbonato de cálcio e argilas, portanto, não é totalmente biodegradável e não se decompõe no fundo do tanque (Vesilind e Morgan, 2011). Segundo Richter (2001) a forma de disposição final dos lodos é os aterros sanitários. Antes de ir para os aterros sanitários é necessário, a desidratação até que atinja um teor de sólidos de, no

mínimo, 20%. Para se atingir este valor ou valores superiores, atualmente, são necessários métodos como filtros prensa e centrífugas.

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), o lodo proveniente das estações de tratamento de água, apesar de conter mais de 95% em volume de água, é classificado como resíduo sólido por isso, torna-se inviável seu lançamento em corpos hídricos (por questões ambientais e técnicas) sem nenhum tipo de tratamento prévio. Apesar disso, a maioria das ETAs brasileiras, é comum a prática de lançamento desse lodo, sem nenhum tipo de tratamento prévio, nos corpos hídricos ou em terrenos próximos às estações (Molina, 2010).

Por esse motivo a reutilização e reciclagem do lodo tem despertado o interesse de vários profissionais da área, que têm proposto diferentes métodos de destinação para esse tipo de material. É neste contexto que se enquadra a utilização do lodo como material adsorvente.

O lodo residual utilizado para o desenvolvimento dos adsorventes nos experimentos deste trabalho, foram fornecidos por duas estações de tratamento de água em Manaus que apresentam processos diferentes para obtenção da clarificação da água e na separação e descarte do lodo produzido.

Na ETA 1, realizam-se as etapas de coagulação seguida da floculação e da decantação, para a retirada do lodo formado com água de lavagem. A eliminação do lodo do processo da ETA 1 ocorre pelo fundo dos decantadores a cada 12 minutos, descartados por um sistema de elevação por ar comprimido.

Na ETA 2, aplica-se processo diferenciado, obtendo-se as etapas de floculação e flotação para o descarte com água de lavagem do lodo formado. Nesse caso, o lodo vai se depositando em condição flutuante nos tanques de flotação, sendo eliminados do processo com água de lavagem, automaticamente em um intervalo de aproximadamente 6 a 8 horas, e canalizados para o descarte em um foço de aproximadamente 6 m de profundidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O preparo dos adsorventes e os experimentos de adsorção foram realizados no Laboratório ILUM/HUB e a análise granulométrica foi realizado no Laboratório de Engenharia Química, sendo ambos laboratórios localizados no campus da Escola Superior de Tecnologia (EST) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA). A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizada no Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA).

#### 3.1 PRODUÇÃO DOS ADSORVENTES

##### 3.1.1 Procedência e Coleta do Material

O lodo utilizado como material precursor para a produção dos adsorventes, foi fornecido por duas estações de tratamento de águas (ETAs) da Ponta do Ismael, sendo a ETA 1 com vazão de 3500 L/s e a ETA 2 com vazão de 3400 L/s, localizadas no bairro Compensa, em Manaus-AM.

Foram obtidas um total de quatro amostras de lodo, sendo duas retiradas de cada estação de água. Cada amostra foi devidamente acondicionada em uma garrafa de 12 litros, as quais foram provenientes do decantador 7 (Figura 12), na ETA1 e do flotador 7 na ETA2 (Figura 14). É importante ressaltar que em ambas ETAs a extração de lodo é feita automaticamente, sendo programada no Controlador Lógico Programável (CLP) o tempo de extração e o intervalo entre as extrações, apesar disso a coleta obedeceu a critérios específicos em cada estação.

No caso da ETA 1, o descarte é feito através da injeção de ar (“air lift”), proveniente de sopradores que geram sucção do lodo decantado e sendo conduzidos por tubulações para fora do decantador (Figura 13). O soprador B atua diretamente no decantador 7 e foi escolhido o momento do primeiro descarte do lodo, já que após o intervalo de 20 minutos, há uma queda na quantidade de resíduos, ou seja, há um aumento de líquido nas extrações subsequentes.

Quanto à ETA 2, a coleta foi realizada próximo ao horário agendado para o descarte de lodo dos flotadores, conforme indicado no painel do CLP (Figura 15), essa escolha é justificada pela observação de uma maior acumulação de lodo na superfície do flotador nesse período (Figura14).

Figura 12- Decantador 7 na ETA 1.



Fonte: Própria (2023).

Figura 13- Tubulações de descarga de lodo do decantador 7 da ETA 1.



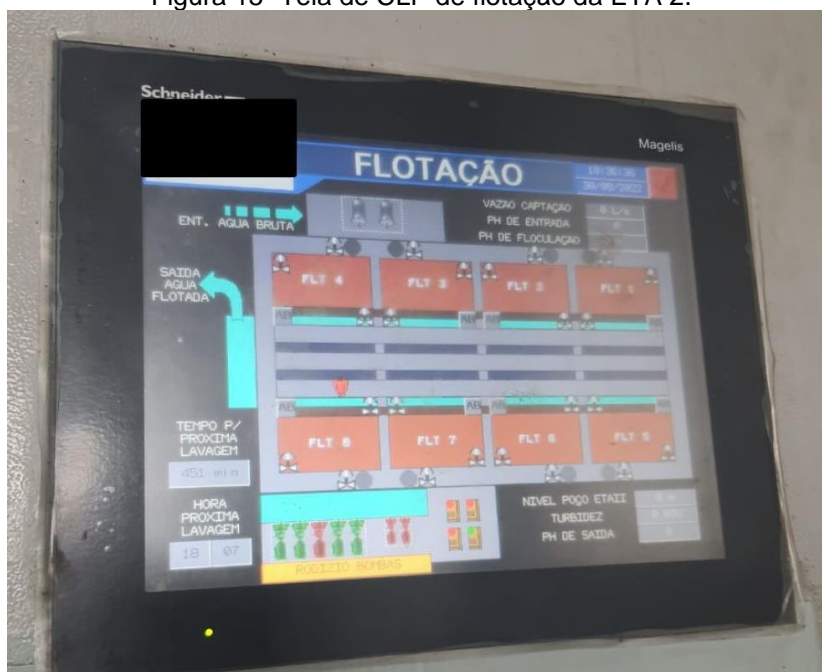
Fonte: Própria (2023).

Figura 14- Lodo acumulado no flotador na ETA 2.



Fonte: Própria (2023).

Figura 15- Tela de CLP de flotação da ETA 2.



Fonte: Própria (2023).

### 3.1.2 Pré-tratamento do Lodo

O processo de pré-tratamento foi feito mediante a metodologia de Souza (2019). Como o lodo gerado nas ETAs apresentam uma elevada umidade (em torno de 95% de água) (Marguti *et al.*, 2018), foi preciso remover a umidade em excesso, por meio da colocação do lodo em uma estufa. Tal procedimento proporcionou uma melhor adequação ao parâmetro inicial de umidade (menor que 15%) tanto na pirólise quanto na realização da análise granulométrica do material (Ribeiro, 2012).

As amostras de lodo foram submetidas na estufa de marca Ethik Technology-modelo 402/5N, a temperatura de 105 °C durante 24 horas.

Figura 16- Estufa utilizada (a) e (b) amostra de lodo condicionada em uma forma



Fonte: Própria (2023).

Figura 17- Amostras de lodo após ter ficado a 105°C na estufa.



Fonte: Própria (2023).

### 3.1.3 Processo de Ativação Química

O processo de ativação química foi feito por meio da metodologia adaptada dos trabalhos de Andretta (2014) e Souza (2019). Para isso, foi usado ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) 85% na proporção 2:1 (g de lodo/ g de ácido), sob agitação por 3 horas a 120 rpm utilizando uma incubadora de bancada com aquecimento e agitação orbital da marca Quimis, modelo Q315IA (Figura 18). O objetivo desse tratamento foi aumentar a capacidade de adsorção da LETA. Em seguida, a mistura resultante foi lavada em média 30 vezes com água destilada, com o objetivo de retirar o agente ativante e de realizar a desobstrução dos poros. Na sequência foi levado para estufa por 24 horas à 90 °C (Andretta, 2014; Souza, 2019; Dawood e Sen, 2012). Posteriormente, foi realizada a pirólise em um forno mufla modelo SSFM, fabricado pela empresa Solidsteel, na temperatura de 500 °C mantida por 1 hora.

Figura 18- Amostras de lodo ativadas sob agitação na incubadora.



Fonte: Própria (2023).

Além disso foi calculado o rendimento da obtenção do adsorvente empregando a Equação 4:

$$\% \text{Rendimento} = \frac{m}{m_0} \times 100 \quad (4)$$

em que:

m - é a massa final;

$m_0$  - é a massa inicial.

O rendimento descreve a perda do material no processo da pirólise e ativação e foi analisado por intermédio da pesagem das amostras do lodo *in natura* e após a pirólise. Em seguida, o material pirolisado, foi macerado com o almofariz e pistilo para aumento da área superficial, e formação de particulados menores, semelhantes aos encontrados na Figura 19a. Na sequência, as amostras foram colocadas no tempo de 20 minutos e com vibração máxima em um agitador de peneiras (Figura 19b) com as aberturas de 0,300; 0,212; 0,106 e 0,075 mm, usando um conjunto de peneiras (Produtest) da série Mesh.

Figura 19- Amostras de lodo pirolisado macerado (a) e algumas das peneiras da análise granulométrica (b)



(a)

(b)

Fonte: Própria (2023).

Foram utilizados dois critérios para realizar a adsorção: ter uma menor granulometria, a fim de maximizar a superfície de contato do adsorvente com o corante azul de metileno potencializando assim a adsorção, e uma quantidade grande retida na peneira para que assim seja o suficiente para a realização dos ensaios de adsorção.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DO LODO

Foram feitas análises para determinação de umidade do lodo e caracterização física por meio da análise morfológica do lodo *in natura* e dos adsorventes produzidos antes da adsorção através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Para a análise de umidade as amostras foram pesadas, em triplicata, em balança analítica com precisão de 0,1 g, sendo o lodo colocado em uma forma e, em seguida, levados à estufa na temperatura de 105° C.

A caracterização morfológica e estrutural foi obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), onde foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura VEGA3 da TESCAN, modelo 51-ADD0007. Para este ensaio foram retiradas duas amostras de cada estação com aproximadamente 0,1 g de lodo e as quais foram colocadas em um suporte para recobrimento por dispersão de íons metálicos de ouro. Este procedimento visa apenas tornar as amostras condutoras de modo a gerar imagens com boa resolução no MEV (Dedavids; Gomes e Machado, 2007).

### 3.3. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS EM BATELADA

Um planejamento fatorial 2<sup>3</sup> do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR) foi realizado para investigar os efeitos individuais e de interação das 3 variáveis experimentais: massa do adsorvente (mads), concentração do azul de metileno (Cam) e temperatura (°C); tendo como variável resposta a remoção de adsorvato “E” (%).

Para a seleção das faixas de valores dos 3 fatores avaliados, utilizou-se como base Souza (2019), que também utiliza o lodo de uma estação de tratamento de água para remoção de corante. As variáveis escolhidas foram a temperatura das soluções (30 a 40 °C) (X1), concentração inicial de corante (2 a 7 mg/L) (X2) e dosagem de adsorvente (40 a 100 mg) (X3). A variável resposta é a eficiência de remoção de corante (E, %), e para a obtenção das respostas da remoção de adsorvato-E, será aplicada a Equação 5:

$$E (\%) = \frac{C_e}{C_o} \cdot 100 \quad (5)$$

em que:

$C_e$ : Concentração de adsorvato em equilíbrio (mg/L);

$C_o$ : Concentração inicial do adsorvato (mg/L);

E: Taxa de remoção (%).

A Tabela 2 contém os níveis reais e codificados para as variáveis independentes avaliadas e na Tabela 3 a matriz de experimentos gerados pelo software Statistica 7, de forma a garantir a reprodutibilidade dos dados experimentais, totalizando em 16 experimentos, os quais foram realizados em duplicata.

Tabela 2- Níveis dos fatores reais e codificados.

Variáveis	Níveis	
	-1	+1
$X_1$ Concentração de azul de metileno (mg/L)	2	7
$X_2$ Temperatura (°C)	30	40
$X_3$ Massa de adsorvente (mg)	40	100

Fonte: Própria (2023).

Tabela 3- Matriz do delineamento composto central  $2^3$  (DCCR).

Ensaio	Parâmetros		
	Cazm (mg/L)	T (°C)	Mads (mg)
1	2	30	40
2	2	30	100
3	2	40	40
4	2	40	100
5	7	30	40
6	7	30	100
7	7	40	40
8	7	40	100
9	0,2955	35	70
10	8,7045	35	70
11	4,5	26,591	70
12	4,5	43,409	70
13	4,5	35	19,5462
14	4,5	35	120,4538
15 (C)	4,5	35	70
16 (C)	4,5	35	70

Fonte: Própria (2023).

Para a construção da curva de calibração da Lei de Lambert-Beer, e conseqüentemente obter os dados de concentração final e taxa de remoção do azul de metileno, foi preparado uma solução mãe do corante azul de metileno com uma concentração de 100 mg/L. Posteriormente, a solução mãe foi diluída nas concentrações de 0,5 mg/L, 1 mg/L, 2 mg/L, 3 mg/L, 4 mg/L, 5 mg/L, 6 mg/L, 7 mg/L, 8 mg/L e 9 mg/L, e leitura no UV-Visível, na determinação da absorbância e concentração em seguida foi possível obter a curva de calibração.

Dessa forma, foi possível obter um modelo linear considerando os efeitos individuais e de interação usado para representar a eficiência de remoção de corante em função das variáveis independentes. Para a avaliação dos resultados obtidos foi utilizado o software Statistica 7.0.

#### 3.4. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

Os ensaios de adsorção sólido-líquido foram feitos por meio do contato da massa de adsorvente com a fase líquida contendo o adsorvato. As isotermas de adsorção foram feitas baseadas nas condições ótimas encontradas no planejamento experimental proposto na Tabela 3, sendo que cada ensaio foi realizado em duplicata.

Para a realização dos ensaios de adsorção, foram utilizados 20 mL das soluções em erlenmeyers de 125 mL, sendo submetidas a agitação em uma incubadora shaker da Marca Novatecnica, modelo NT712 por 1 hora a 120 rpm. Em seguida, as fases foram separadas por filtração a vácuo.

Figura 20- Ensaio de adsorção em batelada.



Fonte: Própria (2023).

A concentração remanescente de contaminante presente na fase líquida foi quantificada por espectrofotômetro da Marca Shimadzu, UV-1800, sendo no comprimento de onda máximo do Azul de metileno de 664 nm. A quantidade do corante adsorvida pelos adsorventes será calculada pela aplicação da Equação 6:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \cdot V}{m_{ads}} \quad (6)$$

em que:

$q_e$  - é a quantidade adsorvida do corante pelo adsorvente (mg/g);

$C_o$  e  $C_e$  - concentrações inicial e final do corante, respectivamente (mg/L);

$m_{ads}$  - é a massa do adsorvente (g) e

$V$  - é o volume da solução do corante em contato com o adsorvente (L).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com relação à caracterização morfológica do adsorvente gerado a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a análise estática dos ensaios de adsorção e o ajuste das isotermas de adsorção aos modelos.

### 4.1. ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO

#### 4.1.1 Determinação de Umidade e Rendimento do Adsorvente

Observou-se que a umidade média das amostras de lodo da ETA 1 foi de 98% e para as amostras da ETA 2 foi de 92,51%, demonstrando características semelhantes ao que se refere a umidade de 95% de acordo com a NBR 10.004. Já o valor encontrado para o rendimento do adsorvente, em base seca, da ETA 1 (ads-leta 1) e ETA 2 (ads-leta2) foi de 39,49% e 59,14%, respectivamente. Em uma análise primária o rendimento total pode parecer baixo, mas comparando com a literatura para o lodo tem-se que Ferreira *et al.* (2022) encontraram um rendimento total de 35% na produção de um carvão que foi produzido através da ativação com ácido fosfórico e pirolisado, compreende-se que esse rendimento pode ter sido afetado pelo agente ativante utilizado, pois ele aumenta a desidratação, ocasionando a maior perda de massa do precursor. Gao *et al.* (2015).

#### 4.1.2 Análise Granulométrica

A classificação granulométrica dos adsorventes obtidos está disposta na Tabela 4, sendo utilizadas os adsorventes das duas últimas peneira e o do fundo.

Tabela 4- Classificação granulométrica dos adsorventes: ads-leta1 e ads-leta2.

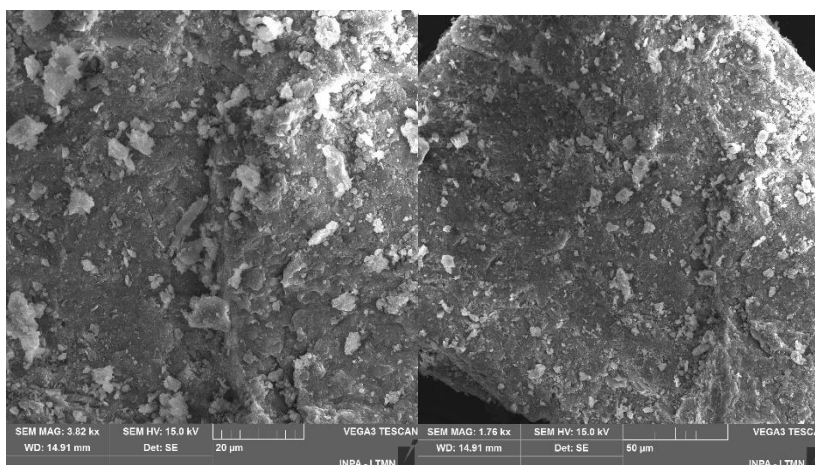
Classificação	Mesh	Abertura (mm)	Massa ETA 1 (g)	Massa ETA 2 (g)
1	48	0,3	0,74	3,48
2	65	0,212	2,85	5,02
3	150	0,106	4,29	4,33
4	200	0,075	2,02	1,82
Fundo	-	-	0,75	0,97
<b>Total</b>	-	-	<b>10,65</b>	<b>15,62</b>

Fonte: Própria (2023).

### 4.1.3 Caracterização morfológica- MEV

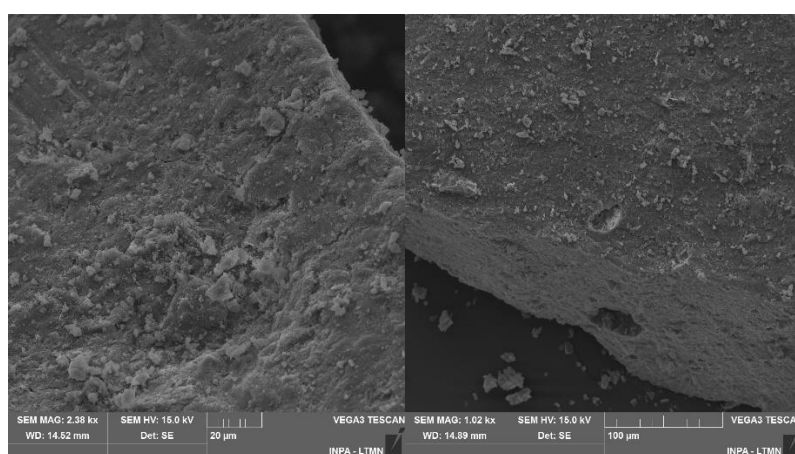
As micrografias do lodo *in natura* da ETA 1 (Figura 21) e ETA 2 (Figura 22) obtidas por MEV, apresentam sobre suas superfícies alguns grãos de tamanhos irregulares e variados, segundo Silva *et al.* (2019) essas partículas menores agregadas podem ser consequência dos produtos químicos, sulfato de alumínio e polímero não iônico, utilizados na etapa de coagulação e floculação. Além disso, é possível observar uma quantidade maior de agregados no lodo da ETA 1 do que no lodo da ETA 2, isso possivelmente é explicado por que o processo de decantação utilizado na ETA1, consegue mais facilmente sedimentar a matéria orgânica, já que na ETA2 a matéria orgânica vai para superfície do flotador.

Figura 21- Microscopias eletrônica de varredura das amostras de lodo *in natura* da ETA 1



Fonte: Própria (2023).

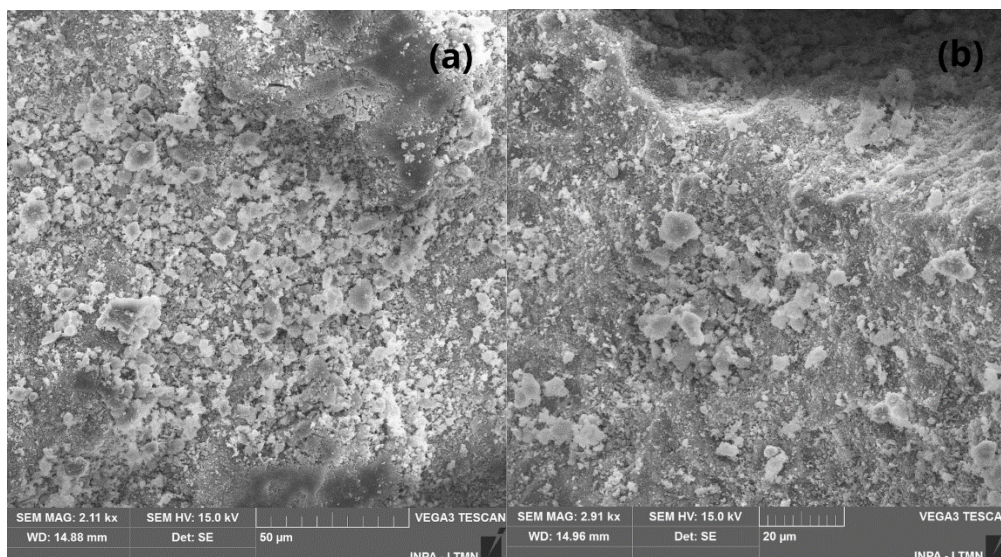
Figura 22- Microscopia eletrônica de varredura das amostras de lodo *in natura* da ETA 2.



Fonte: Própria (2023).

Na Figura 23 (a) e (b), que correspondem as amostras de ads-leta1 e ads-leta2 após o processo de ativação e pirólise, observa-se um aumento de agregados formados na superfície bem como o desenvolvimento de um material mais poroso.

Figura 23- Microscopia eletrônica de varredura do: (a) ads-leta1 e (b) ads-leta2.

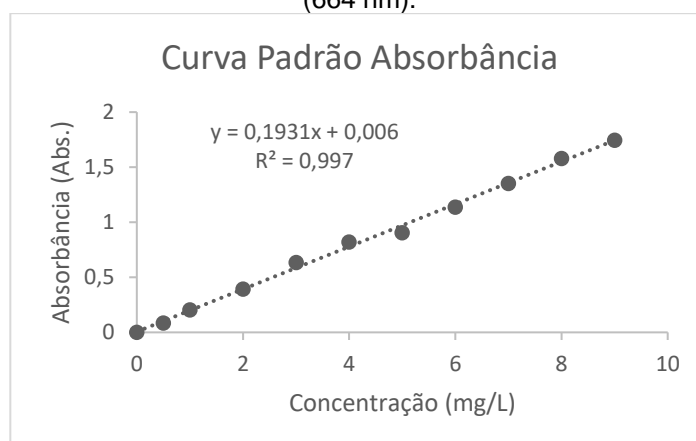


Fonte: Própria (2023).

#### 4.2. CURVA DE CALIBRAÇÃO

A curva analítica (Figura 24) foi construída com 11 pontos utilizando concentrações de soluções de azul de metileno variando de 0 a 9 mg/L. A equação de regressão linear obtida foi  $y = 0,1931x + 0,006$ , para um coeficiente de determinação linear ( $R^2$ ) de 0,997, caracterizando um bom ajuste para ser usada nos cálculos da concentração de azul de metileno submetidos aos experimentos de adsorção.

Figura 24- Curva analítica da concentração de corante em função da absorbância máxima (664 nm).



Fonte: Própria (2023).

#### 4.3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Na Tabela 5 (ads-leta1) e 6 (ads-leta2), são apresentados os valores da: absorvância, concentração final do azul de metileno, quantidade de analito adsorvido no equilíbrio ( $q_e$ ) e taxa de remoção (%), para cada ensaio de adsorção utilizado de acordo com o delineamento cúbico composto rotacionado, para diferentes temperaturas, massa do adsorvente ( $M_{ads}$ ) e concentração do azul de metileno ( $C_{azm}$ ).

Tabela 5- Compilação de dados do ads-leta1 para a análise estatística do planejamento fatorial.

Ensaio	Parâmetros						
	Cazm (mg/L)	T (°C)	Mads (mg)	Abs	Cf azm (mg/L)	Qe (mg/g)	Remoção (%)
1	2	30	40	0,0230	0,0880	0,9560	95,60%
2	2	30	100	0,0130	0,0363	0,3928	98,19%
3	2	40	40	0,0210	0,0777	0,9612	96,12%
4	2	40	100	0,0190	0,0673	0,3865	96,63%
5	7	30	40	0,2395	1,2092	2,8954	82,73%
6	7	30	100	0,0520	0,2382	1,3524	96,60%
7	7	40	40	0,2075	1,0435	2,9783	85,09%
8	7	40	100	0,0310	0,1295	1,3741	98,15%
9	0,2955	35	70	0,0100	0,0207	0,0785	93,10%
10	8,7045	35	70	0,1340	0,6629	2,2976	92,38%
11	4,5	26,5910	70	0,1130	0,5541	1,1274	87,69%
12	4,5	43,4090	70	0,1480	0,7354	1,0756	83,66%
13	4,5	35	19,5462	0,1940	0,9736	3,6083	78,36%
14	4,5	35	120,4538	0,0320	0,1346	0,7248	97,01%
15 (C)	4,5	35	70	0,1035	0,5049	1,1415	88,78%
16 (C)	4,5	35	70	0,0995	0,4842	1,1474	89,24%

Fonte: Própria (2023).

De acordo com a Tabela 5, a remoção máxima do corante ocorreu no ensaio 2, o qual utilizou uma solução de 2 mg/L de azul de metileno para 0,10 g de ads-leta1 na temperatura de 30°C, alcançando a remoção de 98,19%. Considerando essa remoção máxima do corante azul de metileno, pode-se dizer que, para as condições operacionais aplicadas neste trabalho, o ads-leta1 foi mais eficiente que o adsorvente de LETA utilizada por Souza (2019) que removeu cerca de 91,57% do corante negro de eriocromo T, com massa de 0,3 g e concentração de 0,05 mg/L.

Tabela 6 -Compilação de dados do ads-leta2 para a análise estatística do planejamento fatorial.

Ensaio	Parâmetros						
	Cazm (mg/L)	T (°C)	Mads (mg)	Abs	Cf azm (mg/L)	Qe (mg/g)	Remoção (%)
1	2	30	40	0,0235	0,0794	0,9603	96,03%
2	2	30	100	0,011	0,0259	0,3948	98,71%
3	2	40	40	0,018	0,0621	0,9689	96,89%
4	2	40	100	0,0175	0,0482	0,3904	97,59%
5	7	30	40	0,2385	1,1945	2,9027	82,94%
6	7	30	100	0,058	0,2583	1,3483	96,31%
7	7	40	40	0,176	0,8703	3,0648	87,57%
8	7	40	100	0,054	0,2376	1,3525	96,61%
9	0,2955	35	70	0,0105	0,0119	0,081	95,96%
10	8,7045	35	70	0,05	0,2168	2,4251	97,51%
11	4,5	26,591	70	0,0885	0,4165	1,1667	90,74%
12	4,5	43,409	70	0,1205	0,5825	1,1193	87,06%
13	4,5	35	19,54622	0,0615	0,2765	4,3216	93,86%
14	4,5	35	120,4538	0,019	0,056	0,7379	98,76%
15 (C)	4,5	35	70	0,018	0,0508	1,2712	97,83%
16 (C)	4,5	35	70	0,025	0,0871	1,2608	98,06%

Fonte: Própria (2023).

De acordo com a Tabela 6, a remoção máxima do corante ocorreu no ensaio 14, o qual utilizou uma solução de 4,5 mg/L de azul de metileno para 0,12 g de ads-leta2 na temperatura de 35°C, alcançando a remoção de 98,76%. Assim como o ads-leta1, o ads-leta2 foi mais eficiente na remoção que o adsorvente de LETA utilizada por Souza (2019) e o próprio ads-leta1. Nas Figuras 25 podemos observar as soluções com as seguintes concentrações da esquerda para à direita: 0,3 mg/L; 2 mg/L; 4,5 mg/L; 7 mg/L e 8,7 mg/L e na Figura 26 podemos observar o efeito do adsorvente, com as seguintes concentrações da esquerda para à direita: 0,3 mg/L; 2 mg/L; 8,7 mg/L; 0,3 mg/L e 7 mg/L.

Figura 25- Soluções do corante azul de metileno antes da adsorção.



Fonte: Própria (2023).

Figura 26- Soluções do corante azul de metileno depois da adsorção.



Fonte: Própria (2023).

#### 4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

##### 4.4.1 Tabela de efeitos

Foi feito uma análise de estimativa de efeitos com o objetivo de avaliar os efeitos das variáveis temperatura, massa de adsorvente e concentração do azul de metileno para o módulo, sendo a Tabela 7, para o ads-leta1, e a Tabela 8 para ads-leta2.

Na Tabela 7 podemos observar para o ads-leta1 para esse experimento o valor encontrado para o  $R^2$  é igual a 0,79212, ou seja, 79,21% da variação média é explicada pela regressão utilizada, sendo um valor satisfatório, além do ajuste ser de 0,48031, ou seja, esse modelo matemático explica somente 48,031% da variância

sobre os resultados do módulo, por esse motivo não podemos utilizar esse modelo para determinar o ponto ótimo.

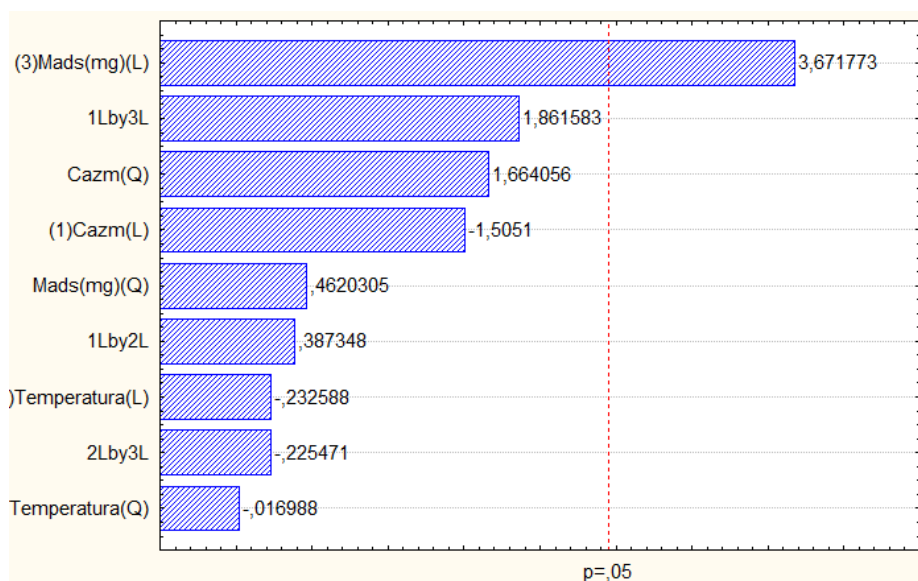
Tabela 7- Tabela de efeitos para o ads-leta1.

Estimativa de Efeito; Var.: Remoção (%); R <sup>2</sup> =0,79212; Ajuste:0,48031 MQ=0,0020469 DV: R						
Fator	Efeitos	Erro Padrão	t(22)	p-Valor	-95,00% (Lim Inf.)	95,00% (Lim Sup.)
Intercepto	0,885314	0,031898	27,75486	0	0,807264	0,963365
(1)Cazm (L)	-0,03685	0,024485	-1,5051	0,183004	-0,09677	0,02306
Cazm (Q)	0,04947	0,029729	1,66406	0,147158	-0,02327	0,122214
(2)T (L)	-0,0057	0,024485	-0,23259	0,823812	-0,06561	0,054218
T (Q)	-0,00051	0,029729	-0,01699	0,986997	-0,07325	0,072238
(3)m (L)	0,089904	0,024485	3,67177	0,010432	0,029991	0,149817
m (Q)	0,013736	0,029729	0,46203	0,660338	-0,05901	0,086479
1L by 2L	0,012392	0,031991	0,38735	0,711866	-0,06589	0,090672
1L by 3L	0,059555	0,031991	1,86158	0,111978	-0,01873	0,137835
2L by 3L	-0,00721	0,031991	-0,22547	0,829096	-0,08549	0,071067

Fonte: Própria (2023).

Nenhum efeito da interação foi significativo, por isso podemos interpretar isoladamente cada efeito principal. De forma mais visual, utiliza-se o diagrama de Pareto (Figura 27), em que as variáveis que não apresentam significância de 95%, ou valor de probabilidade (p) menor que 5% são demonstradas com as barras não chegando a esse valor, não influenciando significativamente no processo, podemos observar que a massa do adsorvente é significativa ( $p < 0,05$ ), ou seja, no caso da alteração da massa do ads-leta1 pode alterar positivamente a adsorção.

Figura 27- Diagrama de Pareto para a resposta de remoção pelo ads-leta1.



Fonte: Própria (2023).

Na Tabela 8 podemos observar para o ads-leta2 para esse experimento o valor encontrado para o  $R^2$  é igual a 0,82013, ou seja, 82,01% da variação média é explicada pela regressão utilizada, sendo satisfatório, porém o ajuste foi de 0,55032, ou seja, esse modelo matemático explica somente 55,03% da variância sobre os resultados do módulo, por esse motivo não podemos utilizar esse modelo para determinar o ponto ótimo.

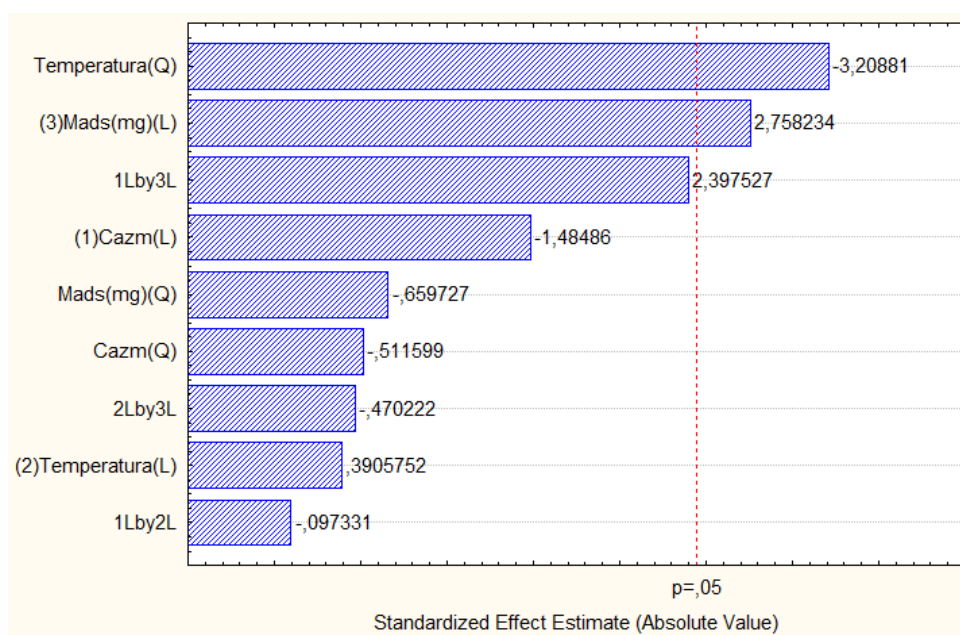
Tabela 8- Tabela de efeitos para o ads-leta2.

Estimativa de Efeito; Var.: Remoção (%); $R^2=0,82013$ ; Ajuste:0,55032 Runs; MQ=,0009774 DV: R						
Fator	Efeitos	Erro Padrão	t(22)	p-Valor	-95,00% (Lim Inf.)	95,00% (Lim Sup.)
Intercepto	0,979885	0,022041	44,45671	0	0,925952	1,033818
(1)Cazm (L)	-0,02512	0,016919	-1,48486	0,188118	-0,06652	0,016277
Cazm (Q)	-0,01051	0,020543	-0,5116	0,627208	-0,06078	0,039756
(2)T (L)	0,006608	0,016919	0,39058	0,709602	-0,03479	0,048008
T (Q)	-0,06592	0,020543	-3,20881	0,018395	-0,11618	-0,01565
(3)m (L)	0,046667	0,016919	2,75823	0,032931	0,005267	0,088067
m (Q)	-0,01355	0,020543	-0,65973	0,533918	-0,06382	0,036713
1L by 2L	-0,00215	0,022106	-0,09733	0,925633	-0,05624	0,05194
1L by 3L	0,053	0,022106	2,39753	0,053475	-0,00109	0,107092
2L by 3L	-0,0104	0,022106	-0,47022	0,654802	-0,06449	0,043697

Fonte: Própria (2023).

Da mesma maneira que o ads-leta1, para o ads-leta2 também nenhum efeito da interação foi significativo, por isso podemos interpretar isoladamente cada efeito principal, e pela Figura 28, pode-se observar que a massa do adsorvente e a temperatura são significativos ( $p < 0,05$ ), ou seja, se alterar alguma delas pode alterar positivamente a adsorção, no caso da massa do ads-leta2, ou negativamente, no caso da temperatura.

Figura 28- Diagrama de Pareto para a resposta de remoção pelo ads-leta2.

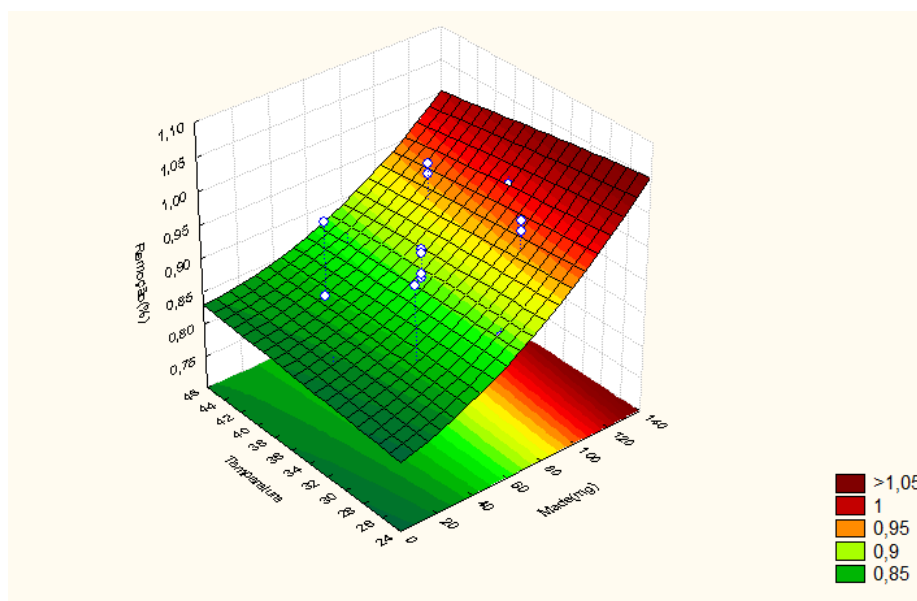


Fonte: Própria (2023).

#### 4.4.2 Gráfico de superfície de resposta

As Figuras 29 e 30, mostra os gráficos de superfície de resposta que podem simplificar a interpretação dos resultados. Observa-se na Figura 29 que os maiores valores do percentual de remoção (%) para o ads-leta1, ocorrem para níveis altos de massa, pois é onde se encontra as maiores porcentagens de remoção, indicada pela cor vinho, pela imagem percebe-se também que a variação da temperatura não interfere muito na remoção.

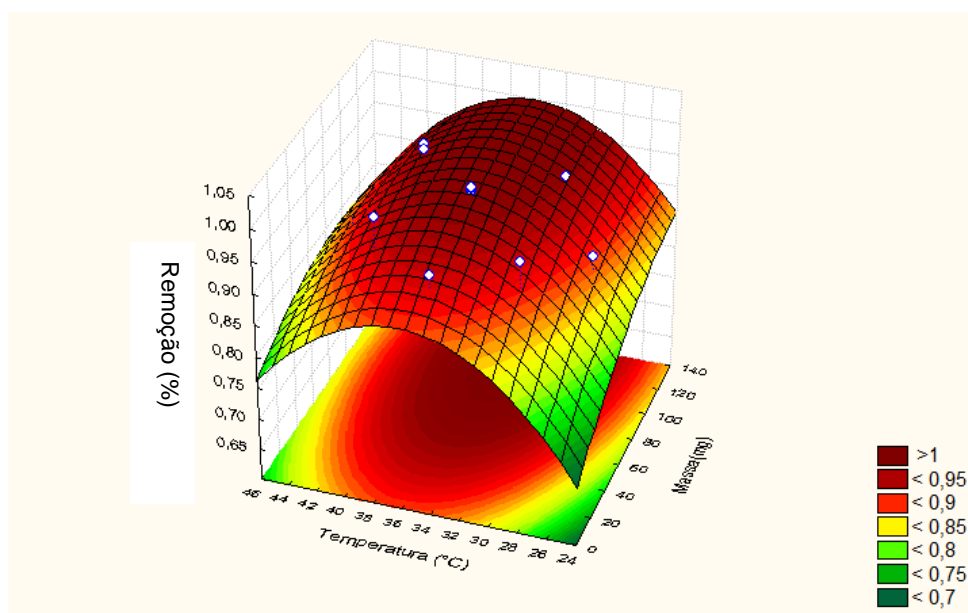
Figura 29 -Superfície de resposta para o ads-leta1.



Fonte: Própria (2023).

A Figura 30 mostra o gráfico de superfície de resposta para o ads-leta2, observa-se que nos intervalos estudados, os maiores valores do percentual de remoção (%), ocorrem para níveis altos de massa de ads-leta2 (120 mg) e com temperatura intermediária (35°C), pois é onde se encontra as maiores porcentagens de remoção, indicada pela cor vinho.

Figura 30- Superfície de resposta para o ads-leta2.



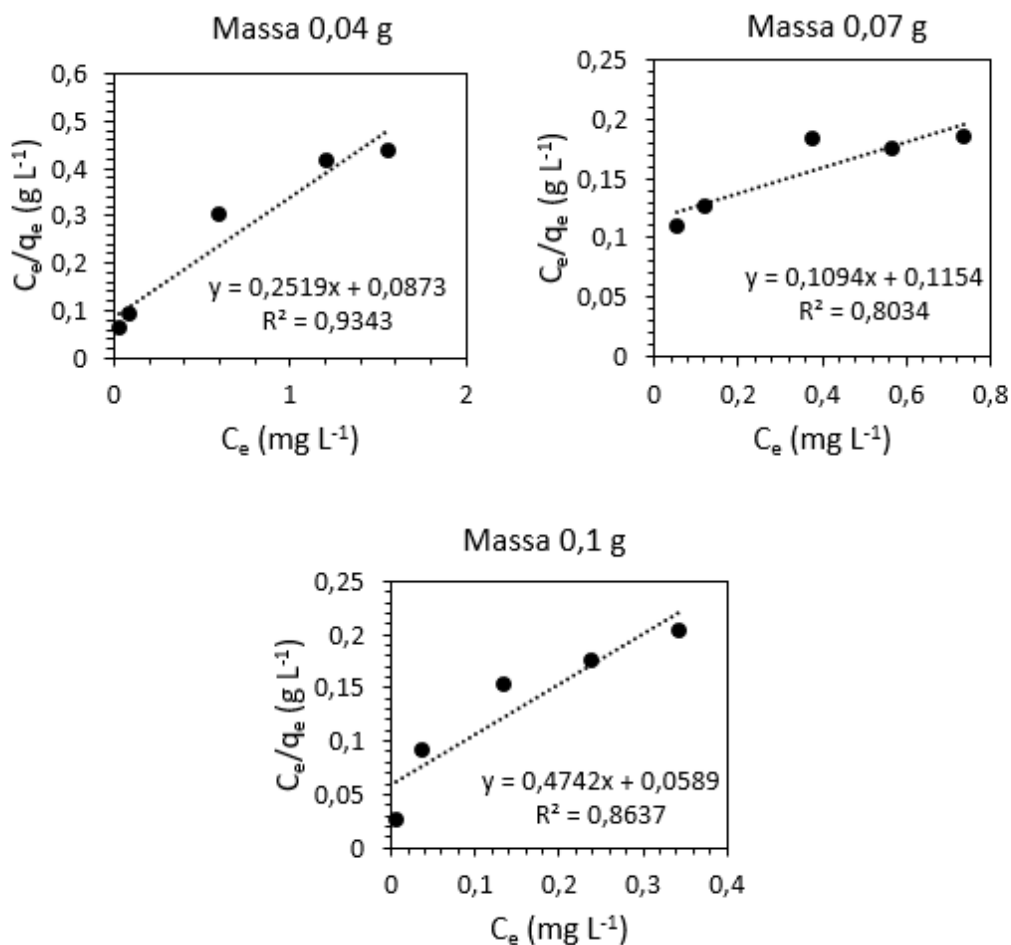
Fonte: Própria (2023).

#### 4.5. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

Para a construção das isotermas, foi construído com base nas variáveis que tiveram o maior efeito significativo na remoção, no caso do ads-leta 1 variou a massa e fixou na temperatura que obteve uma melhor remoção (30°C) de acordo com a Tabela 5, já para o ads-leta2 variou a temperatura e fixou na massa que obteve uma melhor remoção (120 mg) de acordo com a Tabela 6.

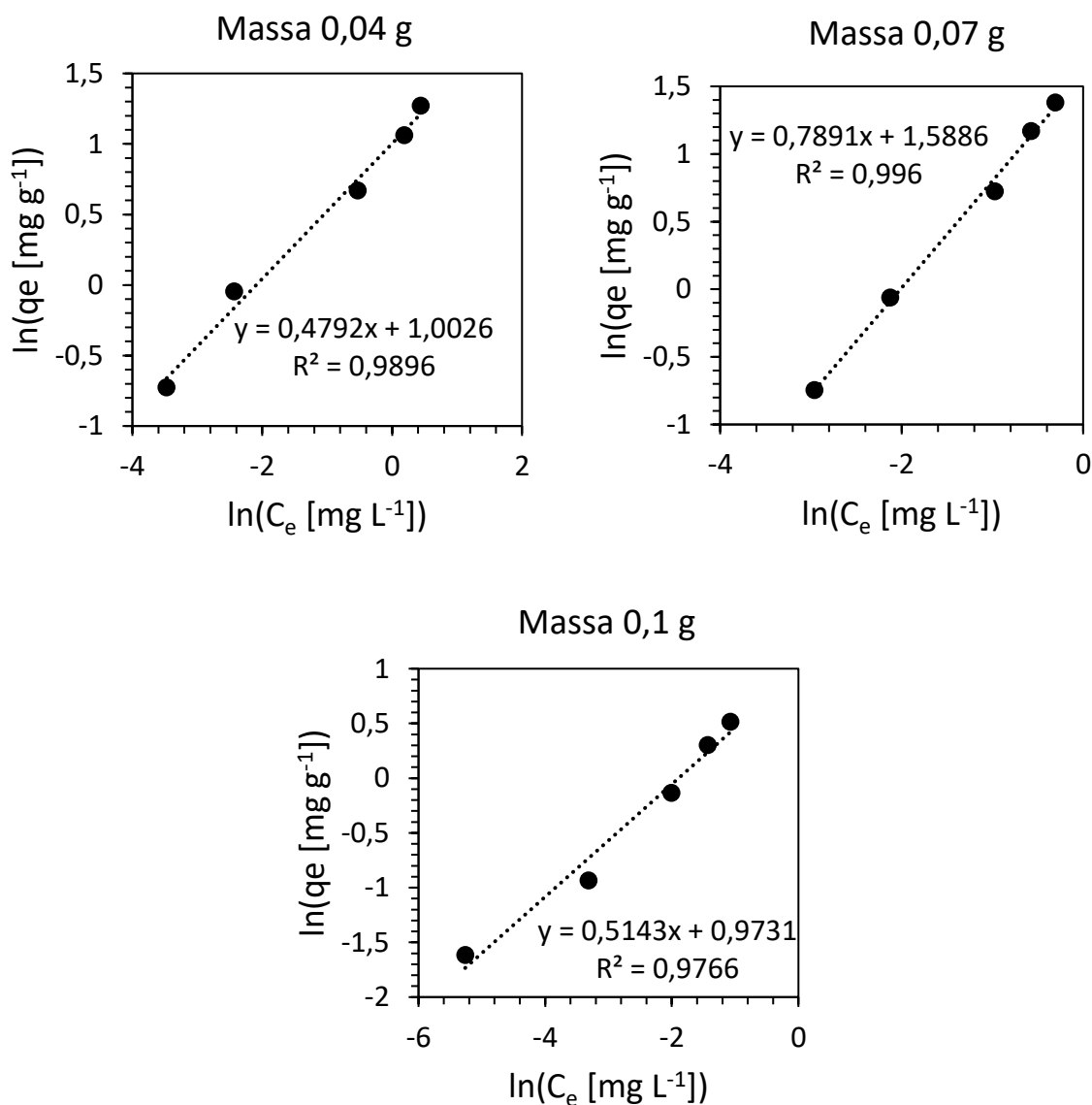
As isotermas obtidas a partir dos dados experimentais de equilíbrio para o ads-leta1 na temperatura de 30°C para três massas diferentes (0,04g, 0,07g e 0,1g) para foram ajustadas aplicando o modelo de Freundlich e Langmuir na sua forma linearizada (Figura 31 e 32), e os parâmetros  $q_{máx}$ ,  $K_F, K_L$ ,  $R^2$ ,  $n$ ,  $1/n$  e  $R_L$  foram calculados e apresentados na Tabela 9.

Figura 31- Forma linear da isoterma de Langmuir para o ads-leta1 com a temperatura de 30°C com as seguintes massas: 0,04 g, 0,07 g e 0,1 g.



Fonte: Própria (2023).

Figura 32- Forma linear da isoterma de Freundlich para o ads-leta1 com a temperatura de 30°C com as seguintes massas: 0,04 g, 0,07 g e 0,1 g.



Fonte: Própria (2023).

Tabela 9 – Parâmetros das equações de Langmuir e Freundlich para o ads-leta1.

Massa	Langmuir				Freundlich			
	$q_{m\acute{a}x}$ (mg. g <sup>-1</sup> )	$K_L$ (L.mg <sup>-1</sup> )	$R_L$	$R^2$	$K_F$ (L.mg <sup>-1</sup> )	n	1/n	$R^2$
0,04	3,9700	2,8851	0,08029	0,9343	2,725321	2,08700	0,4791	0,9896
0,07	9,1402	0,9478	0,103481	0,8034	4,8967	1,2672	0,7891	0,996
0,1	2,108805	8,0875	0,055646	0,8637	2,64600	1,9442	0,51433	0,9766

Fonte: Própria (2023).

Ao analisar os parâmetros obtidos a partir dos modelos de Langmuir e Freundlich, apresentados na Tabela 9, podemos notar que o modelo de Freundlich demonstrou o melhor ajuste para descrever o comportamento de adsorção do azul de metileno através do ads-leta1, especialmente com a massa de 0,07 g, onde o valor do coeficiente de determinação  $R^2$  é de 0,996, caracterizando uma adsorção de caráter físico que ocorre em superfície heterogênea com interações entre moléculas adsorvidas, além disso o parâmetro  $1/n$  é igual 0,7891, comprovando novamente a heterogeneidade da superfície, por ser menor do que zero. (Chowdhury *et al.* 2011).

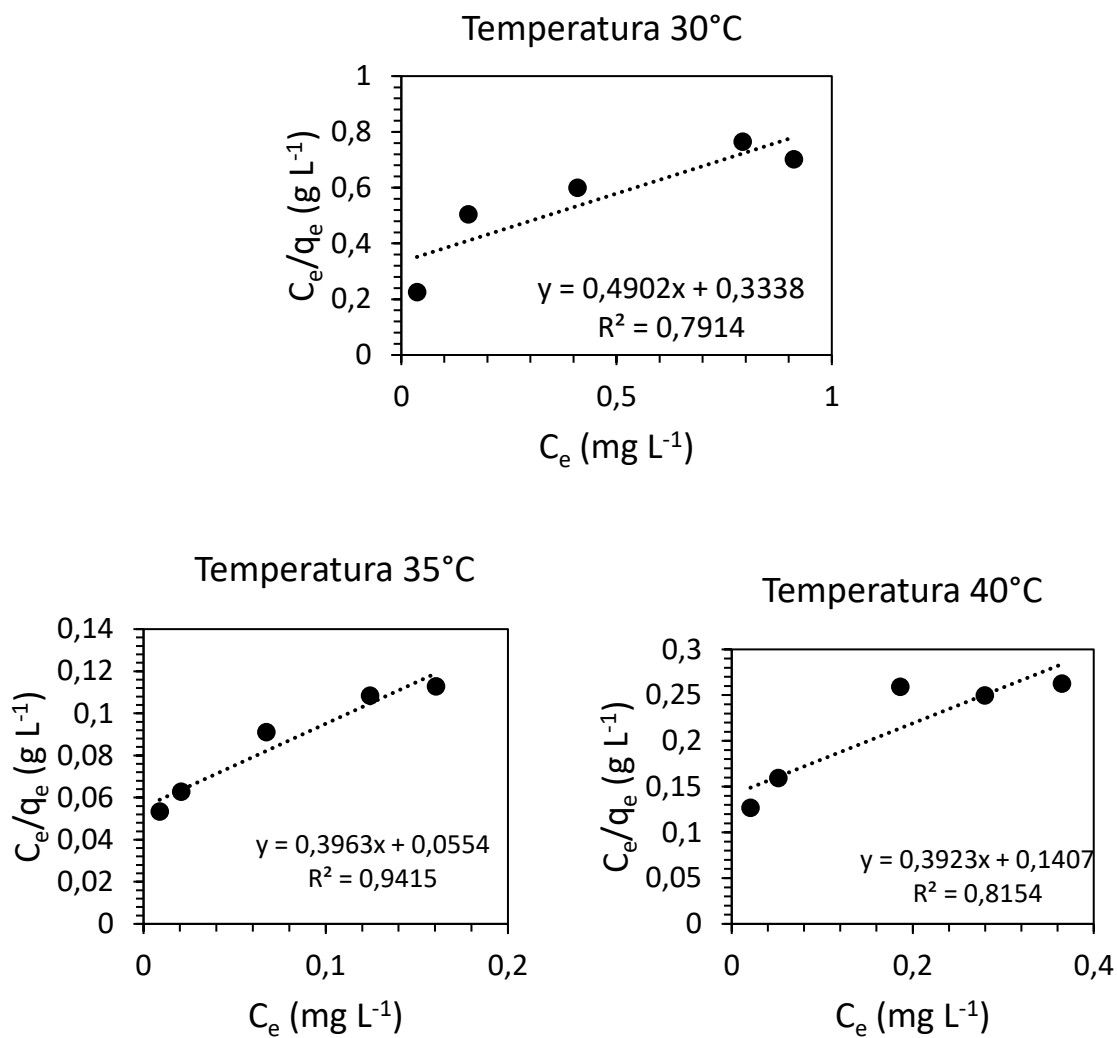
Com relação ao parâmetro  $n$  de Freundlich para o ads-leta1, este apresentou, com todas as diferentes massas, valor entre 1 e 10, indicando adsorção favorável, ou seja, existe forte interação entre o ads-leta1 e o azul de metileno. Essa forte interação entre eles também pode ser comprovada por meio de  $R_L$  (fator de separação de Langmuir), cujos valores calculados permaneceram entre 0 e 1, indicando que o adsorvato( $azm$ ) apresenta maior afinidade com a fase sólida do que a líquida. Assim, a adsorção é considerada favorável (Mayakaduwa *et al.*, 2016).

Segundo Worch (2012), a constante  $K_F$ , caracteriza a força da adsorção, quanto maior o valor, maior a capacidade do adsorvente. Neste estudo, o ads-leta1 apresentou maior valor com a massa de 0,07g, no valor de 4,8967 L.mg<sup>-1</sup>. O parâmetro  $K_F$  de Freundlich está relacionado a capacidade de adsorção, no entanto,  $K_F$  não fornece a capacidade máxima de remoção, como no caso da constante  $q_{m\acute{a}x}$  de Langmuir, uma vez que o modelo de Freundlich não prevê a saturação do adsorvente, por isso é importante verificá-lo. (Febrianto, 2009).

Com base nos dados, é possível observar que os valores para  $q_{m\acute{a}x}$  de Langmuir, os resultados mostram que para uma massa de 0,07 gramas de adsorvente, a capacidade máxima de adsorção (9,1402 mg. g<sup>-1</sup>) aumentou quase 3 vezes mais do que para uma massa de 0,04 g e aumentou quase 4 vezes mais para uma massa de 0,1 gramas de adsorvente.

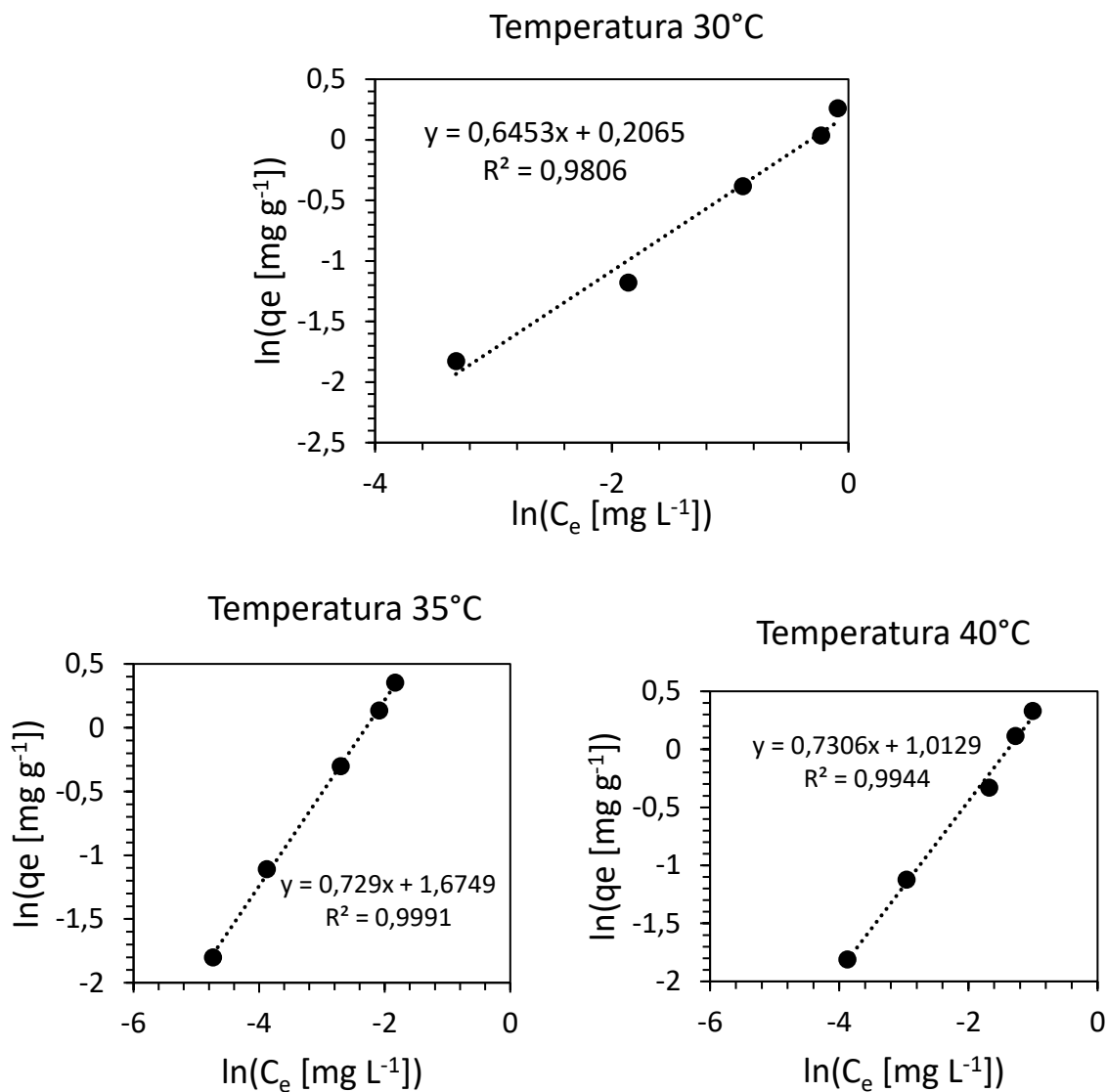
Assim como as isotermas do ads-leta1 foram ajustadas, as isotermas do ads-leta2, com uma massa fixada de 0,12 g, obtidas a partir dos dados experimentais para as três temperaturas (30°C, 35 °C e 40°C) foram ajustadas aplicando o modelo de Freundlich e Langmuir na sua forma linearizada (Figuras 33 e 34), e os parâmetros  $q_{m\acute{a}x}$ ,  $K_F$ ,  $K_L$ ,  $R^2$ ,  $n$ ,  $1/n$  e  $R_L$  foram calculados e apresentados na Tabela 10.

Figura 33- Forma linear da isoterma de Langmuir para o ads-leta2 nas seguintes temperaturas: 30°C, 35°C e 40°C.



Fonte: Própria (2023).

Figura 34- Forma linear da isoterma de Freundlich para o ads-leta2 nas seguintes temperaturas: 30°C (a), 35°C (b) e 40°C (c).



Fonte: Própria (2023).

Tabela 10- Parâmetros das equações de Langmuir e Freundlich para o ads-leta2.

Temperatura	Langmuir				Freundlich			
	$q_{m\acute{a}x}$ (mg. g <sup>-1</sup> )	$K_L$ (L.mg <sup>-1</sup> )	$R^2$	$R_L$	$K_F$ (L.mg <sup>-1</sup> )	$n$	$1/n$	$R^2$
30°C	2,0397	1,46847	0,7914	0,25029	1,22939	1,5497	0,6453	0,9806
35°C	2,5233	7,1480	0,9415	0,05231	5,338048	1,3716	0,729	0,999
40°C	2,5492	2,7871	0,8154	0,12338	2,753539	1,3687	0,7306	0,994

Fonte: Própria (2023).

Analisando os parâmetros obtidos de Langmuir e Freundlich disposto na Tabela 10, observa-se que o melhor ajuste para descrever o comportamento de adsorção do azul de metileno por meio do ads-leta2 foi o do modelo de Freundlich na temperatura de 35°C com  $R^2$  igual 0,999, caracterizando uma adsorção que ocorre em superfície heterogênea, assim como o ads-leta1. Neste caso, também  $1/n$  está menor do que zero, igual 0,729, comprovando a heterogeneidade da superfície (Oliveira, 2018).

Com base nos dados, é possível observar que os valores para  $q_{máx}$  de Langmuir para as três temperaturas são muito próximas, entretanto entre as três, o modelo também foi mais bem ajustado na temperatura de 35°C, podemos observar que a temperatura não interfere na capacidade máxima de remoção.

Como podemos observar, a temperatura de 35°C, é onde apresenta maior valor de  $K_F$ , 5,338048, já na temperatura de 40°C o valor  $K_F$  diminui consideravelmente, isso se explica pelo fato de que um aumento na temperatura aumenta a solubilidade do composto em água, diminuindo as forças de atração entre as moléculas do adsorvente e adsorvato e conseqüentemente, diminui o processo de adsorção (Jodeh *et al.*, 2016).

Em relação ao parâmetro  $n$  de Freundlich para o ads-leta2, este apresentou, em todas as temperaturas, valores de  $n > 1$ , indicando uma adsorção favorável. Ainda, por meio da constante de adsorção de Langmuir ( $K_L$ ) é possível calcular o fator de separação adimensional ( $R_L$ ), é comprovar novamente se a adsorção é favorável, como os valores calculados permaneceram entre 0 e 1, comprova-se que novamente que a adsorção é favorável.

O parâmetro  $q_{máx}$  é relacionado com a saturação do adsorvente, ele é utilizado para comparar a eficiência entre diferentes adsorventes. A Tabela 11 apresenta a comparação entre a capacidade de adsorção de corantes encontrada neste estudo com a de outros adsorventes descritos na literatura.

Tabela 11- Comparação da capacidade de adsorção na remoção de corantes.

Adsorventes	Condições	Corante	Capacidade de adsorção ( $q_{\text{máx}}$ mg. g <sup>-1</sup> )	Referências
Fibras de Posidonia oceânica <i>in natura</i>	0,5 g; 10 a 50 mg/L; 30°C	Azul de Metileno	5,56	(Ncibi <i>et al.</i> , 2007)
Resíduos de Poincianella pluviosa	1 g; 1 a 50 mg/L; 35°C	Azul de Metileno	0,4718	(Teixeira, 2021)
Coroa do abacaxi tratado com ácido fosfórico	0,1 g; 100 a 1000 mg/L; 25°C	Azul de Metileno	34,1131	(Cordeiro, 2016)
LETA tratado com ácido fosfórico e pirolisado a 500°C	0,3 g; 0,01 a 0,05 mg/L, 25°C	Negro de Eriocromo T	4,548	(Souza, 2019)
Casca de ovo	0,1 g; 1 a 10 mg/L; 25°C	Azul de Metileno	0,8	(Tsai <i>et al.</i> 2006)
Ads-leta1	0,07 g; 1 a 8,7 mg/L, 30°C	Azul de Metileno	9,1402	(Própria, 2023)
Ads-leta2	0,12 g; 1 a 8,7 mg/L; 40°C	Azul de Metileno	2,5492	(Própria, 2023)

Fonte: Própria (2023).

Como pode ser visto, a capacidade máxima de adsorção varia bastante de um adsorvente para outro, resultado dependente das características de cada adsorvente e das condições de estudo, ou às vezes de adsorventes teoricamente parecidos, por exemplo a capacidade de adsorção do ads-leta1 é maior (9,1402 mg. g<sup>-1</sup>) que o a do ads-leta2 (2,5492 mg. g<sup>-1</sup>) e com o lodo que foi estudado por Souza (2019) que obteve o valor de 4,548 mg. g<sup>-1</sup>.

De forma geral, o ads-leta1 demonstrou ser um material eficiente na remoção do corante azul de metileno, pois sua capacidade de adsorção foi superior a diversos adsorventes já estudados, como casca de ovo, resíduos de Poincianella, fibras, necessitando de uma quantidade menor de adsorvente, entretanto em concentrações menores de azul de metileno. No caso do ads-leta2 obteve uma baixa capacidade de adsorção quando comparado a todos os outros adsorventes da literatura, com exceção da casca de ovo, que obteve uma baixa capacidade máxima de adsorção mesmo com uma massa de adsorvente bem parecida.

## 5 CONCLUSÃO

A LETA é um resíduo originado do tratamento da água que é descartado em elevadas quantidades e muitas das vezes sem reaproveitamento, por isso se torna uma ótima alternativa de adsorvente de baixo custo na remoção do azul de metileno de efluentes.

A aplicação dos adsorventes ads-leta1 e ads-leta2 para remoção de corante azul de metileno demonstrou eficácia, ainda que as análises estatísticas não tenham determinado as condições ideais. Os resultados obtidos revelaram que um alto percentual de remoção (%) como variável resposta foi alcançado, sendo que para o ads-leta1 foi necessário um alto valor de massa (100 mg) para atingir um poder de adsorção de 98,19%, enquanto para o ads-leta2 é necessário tanto uma massa grande (120 mg) quanto uma temperatura intermediária (35°C), atingindo um percentual de remoção de 98,76%.

Para as isotermas de adsorção do ads-leta1, obteve-se uma capacidade de adsorção de 9,1402 mg. g<sup>-1</sup> conforme o modelo de Langmuir e 4,8967 L.mg<sup>-1</sup> conforme o modelo de Freundlich, em uma temperatura de 30°C e massa de 0,07g. No caso do ads-leta2, a capacidade de adsorção foi de 2,5233 mg. g<sup>-1</sup> pelo modelo de Langmuir e 5,338 L.mg<sup>-1</sup> pelo modelo de Freundlich, em uma temperatura de 35°C e massa de 0,12 g.

Em ambos os adsorventes o modelo de Freundlich foi melhor ajustado quanto ao comportamento dos dados experimentais com coeficiente de correlação de para o ads-leta1 0,996, e para o ads-leta2 foi de 0,999. O fator de separação de Langmuir (R<sub>L</sub>) e o parâmetro (1/n) de Freundlich ficaram entre 0 e 1, em ambos os casos indicando adsorção favorável.

Por fim, os resultados do equilíbrio de adsorção indicaram que o resíduo sólido (lodo) proveniente das Estações de Tratamento de Águas (ETAs) Ponta do Ismael em Manaus, constituem-se como excelente matéria-prima com grande potencial para aproveitamento na produção de adsorvente para ser utilizado na remoção de corantes.

## 6 PERSPECTIVAS

- Testar a eficiência de adsorção com os adsorventes das duas estações *in natura* e com diferentes granulometrias;
- Realizar as isotermas de adsorção variando a massa do ads-leta2 e realizar os devidos ajustes aos modelos de Langmuir e Freundlich;
- Realizar as seguintes análises do efluente de uma indústria têxtil antes e depois de utilizar o adsorvente: turbidez, DBO, DQO e cor;
- Verificar se a filtração com papel filtro de porosidade de  $<10\mu\text{m}$  irá obter um melhor resultado para absorvência do filtrado;
- Análises de caracterização dos adsorventes e do lodo *in natura*: determinação de área superficial (BET), determinação da composição química-Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDX) e comportamento térmico-Análise Térmica (ATG).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMSON, A. W.; GAST, A. P. Electrical aspects of surface chemistry. Physical chemistry of surfaces, New York, **Wiley-Interscience Publication**, v. 6, 1997.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 124, p. 1–13, jun. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073>. Acesso em: 20 jul. 2022.

ANDRETTA, G.C. et al. **Remoção de corante azul de metileno em águas residuárias através de adsorventes de resíduos industriais**. In: XX Congresso Brasileiro De Engenharia Química 2014, Florianópolis-SC. Disponível em: <[http://pdf.blucher.com.br.s3.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cob\\_eq2014/0263-26282-160337.pdf](http://pdf.blucher.com.br.s3.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cob_eq2014/0263-26282-160337.pdf)> Acesso em: 23 ago. 2022.

ARAÚJO, D.E. **Remoção de fluoretos em amostras de água utilizando lodo de ETA como adsorvente**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba-SP, 2016. Disponível em: <[https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/8999/ARAUJO\\_Diego\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/8999/ARAUJO_Diego_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)> Acesso em: 23 ago. 2022.

ARAÚJO, I.P. **Obtenção e caracterização de adsorventes oriundos de LETA com potencial aplicação à remoção de H<sub>2</sub>S proveniente de ETE**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Química e Biológica) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Química e Biológica, Universidade de Brasília, Brasília- DF, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. 2004.

AYGUN, A.; YENISOY-KARAKAS, S.; DUMAN, I. Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. **Microp. Mesop. Mater.**, v. 66, p. 189-195, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1387181103005754?via%3Dihub>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

BELISÁRIO, M.; BORGES, P. S.; GALAZZI, R. M.; PIERO, P. B. Del; ZORZAL, P. B.; RIBEIRO, A. V. F. N.; RIBEIRO, J. N. O emprego de resíduos naturais no tratamento de efluentes contaminados com fármacos poluentes. **Revista Inter Science Place**, v.2., n.10, p.6, 2009.

BOOTH, G.; ZOLLINGER, H.; MCLAREN, K.; SHARPLES, W. G.; WESTWALL, A. **Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry** 5th ed. VCH: Weinheim, 1985.

BORBA, C.E. **Modelagem da remoção de metais pesados em coluna de adsorção de leito fixo**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, março de 2006.

BRUNAUER, S. et al. On a theory of the van der waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, v. 62, p. 1723–1732, 1940.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, p. 309–319, 1938.

CARDOSO, N.F. **Remoção do corante azul de metileno de efluentes aquosos utilizando casca de pinhão in Natura e carbonizada como adsorvente.** Dissertação (Mestrado em Química) - Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/21692/000734456.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 ago. 2022.

CHOWDHURY, S.; MISHRA, R.; SAHA, P.; KUSHWAHA, P. Termodinâmica de adsorção, cinética e calor isostérico da adsorção de verde malaquita em casca de arroz quimicamente modificada. *Dessalinização*, v. 265, p. 159-168, 2011.

CLAUDINO, Andréia. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes.** 2003. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/86346/192226.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

CRINI, G. Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. **Progress in Polymer Science**, v. 30, p. 38-70, jan. 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007967000400125X>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

CORDEIRO, J.; BRITO, S; OLIVEIRA, J.F. Purificação de efluentes contaminados pelo corante azul de metileno, utilizando a coroa do abacaxi com superfície modificada. In: XX SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS, 2016, Feira de Santana. **Anais...** Feira de Santana, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.uefs.br/index.php/semic/article/view/3327>>. Acesso em: 03 ago. 2023.

DAWOOD, S.; SEM, T. K. (2012), Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by raw pine and acid treated pine cone powder as adsorbent: Equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design, **Water Research**, Vol. 46, p.1933-1946 Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135412000255>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de varredura: aplicação e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores [recurso eletrônico]**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP. Tratamento de Água. São Paulo: SABESP, 2010. Disponível em: <<https://www.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=47>>. Acesso em: 25 ago. 2023

FEBRIANTO, J.; KOSASIH, A.N.; SUNARSO, J.; JU, Y. H.; INDRASWATI, N.; ISMADJI, S. Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: A summary of recent studies. **Journal of Hazardous Materials** 2009, 162, 616.

FERRARI, Leila D. F. **Remoção de corante de efluentes da indústria têxtil utilizando processos com membranas e adsorção em bagaço de laranja**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Maringá, 2010.

FERREIRA, J.P.R.; MONTEIRO, K.A.; MOUNTEER, A.H.; MOREIRA, R.P.L.; SILVA, A.A.S. Uso de lodo industrial para síntese de bioadsorvente para tratamento terciário de esgoto doméstico. In: ANAIS DO XL CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2022, Uberlândia. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/enemp/enemp-2022/trabalhos/uso-de-lodo-industrial-para-sintese-de-bioadsorvente-para-tratamento-terciario-d?lang=pt-br>>. Acesso em: 01 ago. 2023.

FREITAG, J. **Adsorção do corante azul de metileno na rama de mandioca (*manihot esculenta crantz*)**. 2013. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2013.

FOGLER, H.S. **Elementos de engenharia das reações químicas**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002, 896p.

GAO, Y.; YUEN, Q.; XU, S.; GAO, B. (2015), “Activated carbons with well-developed mesoporosity prepared y activation with different alkali salts”, *Materials Letters*, Vol. 146, p.34-36.

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

HAMEED, B.H.; AHMAD, A.L.; LATIFF, K.N.A., 2007. Adsorption of basic dye (methylene blue) onto activated carbon prepared from rattan sawdust, **Dyes and Pigments**. Vol. 75, p.143-149. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143720806002051>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

INGLEZAKIS, V. J.; FYRILLAS, M. M.; PARK, J. Variable diffusivity homogeneous surface diffusion model and analysis of merits and fallacies of simplified adsorption kinetics equations. *Journal of hazardous materials*, **Jornal of Hazardous Materials** v. 367, n. 5, p. 224-245, 2018. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389418311622>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S. G.; DURÁN, N. Novas Tendências no Tratamento de Efluentes Têxteis, **Química Nova**, 25(1), p. 78-82, 2002.

Lançamento de efluentes sem tratamento. Disponível em: <<https://br.fashionnetwork.com/news/China-abre-sua-1%C2%AA-usina-de-tratamento-de-aguas-residuais-industriais,804324.html>>. Acesso em: 23 set. 2022.

LETTERMAN, R.D. **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. 5 Ed. New York: McGraw-Hill: American Water Works Association, 1999 1v.

LIMA, Adriana; GRACETTO, Augusto; BIONDO, Carlos E. G.; BATISTELA, Vagner; HIOKA, Noboru; SEVERINO, Divinomar; MACHADO, Antônio E. H.; RODRIGUES, Máira R.; OLIVEIRA, Hueder P. M. **Efeito do Solvente sobre as Propriedades Espectroscópicas do Azul de Metileno**. XI Encontro Latino-Americano de Iniciação

Científica e VII Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2007.

LING, Y. P.; THAM, R. H.; LIM, S. M.; FAHIM, M.; OOI, C. H.; KRISHNAN, P.; MATSUMOTO, A.; YEOH, F. Y. Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent. **Applied Clay Science**, [S.l.], v. 143, n. 1, p. 300–306, jul. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.04.007>>. Acesso em: 07 ago. 2022.

MARGUTI, A. L.; FERREIRA FILHO, S. S.; PIVELI, R. P. Full-scale effects of addition of sludge from water treatment stations into processes of sewage treatment by conventional activated sludge. **Journal of Environmental Management**, v. 215, p. 283-293, 2018. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.072>>. Acesso em: 10 set. 2022

MAYAKADUWA, S.S.; KUMARATHILAKA, P.; HERATH, I.; AHMAD, M.; ALWABEL, M.; OK, Y.S.; USMAN, A.; ABDULJABBAR, A.; VITHANAGE, M. Equilibrium and kinetic mechanisms of woody biochar on aqueous glyphosate removal. *Chemosphere*, v. 144, p. 2516-2521, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.080>

MEMLAK, D.M. **Aplicação de coluna de leito fixo na adsorção e dessorção mono e multicomponente de metais tóxicos presentes em água utilizando adsorvente alternativo**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Santa Catarina, 2019.

MERCK CHEMICALS, Molécula do Azul de Metileno. Disponível em: <[http://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Azul-de-metileno-%28C.I.-52015%29,MDA\\_CHEM-159270](http://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Azul-de-metileno-%28C.I.-52015%29,MDA_CHEM-159270)>. Acesso em: 07 ago. 2022.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4ª edição. New York: McGraw-Hill. 2004.

METCALF E EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5 Ed. Tradução: HESPANHOL I, MIERZWA J C. New York: AMGH Editora Ltda, 1980 p., 2015.

MOLINA, T. Caracterização e tratamento de água de lavagem de filtros de ETA com o uso de polímeros sintéticos e amido de batata. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 2, n.3, p. 28-44, 2010.

MUDAKKAR, S. R.; ZAMAN, K.; KHAN, M. M.; AHMAD, M. Energy for economic growth, industrialization, environment and natural resources: Living with just enough. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 25, p. 580–595, set. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113003274>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NCIBI, M. C.; MAHJOUR, B.; SEFFEN, M. Kinetic and equilibrium studies of methylene blue biosorption by *Posidonia oceanica*. **US National Library of Medicine**, 2007

OLIVEIRA, F.M.; COELHO, L.M. **Avaliação de processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante azul de metileno.** Revista Matéria, v.23, n.04, p.1-14, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/sr77vD85GPLKfByS5vhFFjk/?format=pdf.>> Acesso em: 26 jun. 2023.

OLIVEIRA, M.H.A. **Cinética e Equilíbrio de Adsorção para Armazenamento de Gás Natural.** 2004, 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco, 2004.

PADILHA, J.C. **Aplicação de lodos de tratamentos de água e esgoto em latossolos cultivados com milho e soja.** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo Química) — Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007

PAJOOTAN, E.; ARAMI, M.; MAHMOODI, N. M. Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 43, p. 282-290, 2012.

PEIXOTO, F; MARINHO, G; RODRIGUES K. Corantes têxteis: uma revisão. **Holos**, v. 5, Ano 29, 2013.

PERUZZO, L.C. **Influência de agentes auxiliares na adsorção de corantes de efluentes da indústria têxtil em coluna de leito fixo.** Dissertação (Mestrado)– Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

RADECKI, P. P. Emerging separation and separative reaction technologies for process waste reduction: adsorption and membrane systems. New York: **American Institute of Chemical Engineers**, 1999.

RADKE, C. J.; PRAUSNITZ, J. M. Adsorption of organic solutes from dilute aqueous solution of activated carbon. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, ACS Publications**, v. 11, n. 4, 1972.

RIBEIRO, R. F. **Estudo de dosagem de lodo de ETA em argamassa 2012.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2012.

RICHTER, C.A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água.** São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2001.

RITTER, M.T. **Estudo do lodo da ETA contendo alumínio para a adsorção de fósforo de esgotos sanitários previamente tratados em wetlands construídos.** Dissertação (Mestrado) – Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2020.

RUTHVEN, D.M. **Principles of adsorption and adsorption processes.** New York: John Wiley & Sons, 1984.

SILVA, J. S., CHOQUE FERNANDEZ, O. J., COSTA, J. H. B., FIGUEIRA, B. A., LUZ, P. T. S., & NOGUEIRA, M. H. P. (2019). **Caracterização físico-química de lodo de estação de tratamento de água (ETA) com tratamento térmico a 650°C, e suas aplicações.** Anais do Entmme, 1-9. Disponível em: <<https://www.artigos.entmme.org/download/2019/SILVA,%20J.S.,%20CHOQUE%20FERNANDEZ,%20O.J.,%20COSTA,%20J.H.B.,%20FIGUEIRA,%20B.A.,%20LUZ,%>

20P.%20T.%20S.%20,%20NOGUEIRA,%20M.H.P.%20-  
%20CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20F%C3%8DSICO-  
QU%C3%8DMICA%20DE%20LODO%20DE%20ESTA%C3%87%C3%83O%20DE  
%20TRATAMENTO%20DE%20%C3%81GUA....pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023.

SOUZA, C.D.R.; CARVALHO, S.F. Adsorvente preparado a partir do lodo de uma estação de tratamento de águas e sua aplicação para remoção de corantes. In: XXXIX Congresso Brasileiro De Sistemas Particulados ENEMP 2019, 2019, Belém. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/enemp-2019/papers/adsorvente-preparado-a-partir-do-lodo-de-uma-estacao-de-tratamento-de-aguas-e-sua-aplicacao-para-remocao-de-corantes?lang=en>> Acesso em: 26 jul. 2022.

TEIXEIRA, I. R. F.; VERNASQUI, L. G.; SIA, N. B. P.; MEDEIROS, F. V. S. Adsorção de azul de metileno por meio de resíduos de *Poincianella pluviosa* var. *peltophoroides* (Benth.) L.P. Queiroz. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.6, p.297-306, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.006.0025>

TOLEDO, Bautista I. et al. Bisphenol A removal from water by activated carbon. Effects of carbon characteristics and solution chemistry. **Environmental Science & Technology, ACS Publications**, v. 39, n. 16, 2005.

TSAI, W. T.; YANG, J. M.; LAI, C. W.; CHENG, Y. H.; LIN, C. C.; YEH, C. W.

Characterization and adsorption properties of eggshells and eggshell membrane. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 3, p. 488-493, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852405001689>>. Acesso em: 15 fev.2016.

UNITED NATIONS. **Data query**. [S.l.]: United Nations, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/DataQuery/>. Acesso em: 4 ago. 2022.

VALERIO FILHO, A. **Carvão ativado a partir do lodo de estação de tratamento de água aplicado na remoção de contaminantes**. 99f.: 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2021. Disponível em: Repositório Institucional da Unipampa: Carvão ativado obtido a partir de lodo de estação de tratamento de água aplicado na remoção de contaminantes. Acesso: 29 ago. 2022.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M. **Introdução à Engenharia Ambiental**. Norteamericana: Cengage Learning, 456p., 2011.

VIANA, M. M. **Obtenção e utilização de produtos de pirólise do lodo de esgoto para adsorção de poluentes em meio aquoso**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-18082014-115608/publico/Tese\\_MarceloViana.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-18082014-115608/publico/Tese_MarceloViana.pdf)>. Acesso em: 03 jul.2022.

VIEIRA, G. E. G. et al. Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 15, n. 24, 2014.

VILAR, Vitor Jorge Pais. **Remoção de iões metálicos em solução aquosa por resíduo da indústria de extracção de agar**. 2006. 560 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade do Porto, Porto, 2006.

WORCH, E. **Adsorption technology in water treatment: fundamentals, processes, and modeling.** Walter de Gruyter, 2012

ZUIM, D. R.; **Estudo da adsorção de componentes do aroma de café (benzaldeído e ácido acético) perdidos durante o processo de produção do café solúvel.** Dissertação de Mestrado. Paraná: Universidade Federal do Paraná. 2010. 154f.