



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

AYRTON NATTHAN SILVA RAMOS

**AVALIAÇÃO DO USO DA BORRA DE CAFÉ COMO ADSORVENTE PARA A
REMOÇÃO DO CORANTE TÊXTIL AZUL DE METILENO PRESENTE EM ÁGUAS
RESIDUÁRIAS**

**CAMPINA GRANDE - PB
2022**

AYRTON NATTHAN SILVA RAMOS

**AVALIAÇÃO DO USO DA BORRA DE CAFÉ COMO ADSORVENTE PARA A
REMOÇÃO DO CORANTE TÊXTIL AZUL DE METILENO PRESENTE EM ÁGUAS
RESIDUÁRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Tratamento de águas residuárias.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira.
Coorientadora: Me. Ketyla Karla Rodrigues do Nascimento.

**CAMPINA GRANDE - PB
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

R175a Ramos, Ayrton Natthan Silva.

Avaliação do uso da borra de café como adsorvente para a remoção do corante têxtil azul de metileno presente em águas residuárias [manuscrito] / Ayrton Natthan Silva Ramos. - 2022.
24 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira , Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Bioadsorvente. 2. Quimissorção. 3. Efluentes têxteis. 4. Corante têxtil. I. Título

21. ed. CDD 660.284 235

AYRTON NATTHAN

AVALIAÇÃO DO USO DA BORRA DE CAFÉ COMO ADSORVENTE PARA A
REMOÇÃO DO CORANTE TÊXTIL AZUL DE METILENO PRESENTE EM ÁGUAS
RESIDUÁRIAS

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Tratamento de águas residuárias.

Aprovada em: 29/03/2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Neyliane Costa de Souza
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

À Deus, minha família e amigos, DEDICO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Gráfico de Pareto efeitos padronizados para QT.....	13
Figura 2 –	Gráfico de Pareto efeitos padronizados para remoção.....	14
Figura 3 –	Modelo aplicado aos valores observados para QT e remoção.....	15
Figura 4 –	Gráfico de superfície Massa x Conc. para QT.....	16
Figura 5 –	Gráfico de superfície Massa x Conc. para remoção.....	16
Figura 6 –	Gráficos de superfície Massa x Tempo e Conc. x Tempo para QT....	16
Figura 7 –	Gráficos superfície Massa x Tempo e Conc. x Tempo para remoção.	17
Figura 8 –	Gráfico dos valores obtidos de QT em função do Tempo.....	18
Figura 9 –	Modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem aplicados.....	18
Figura 10 –	Gráfico da curva de CE em relação a QE.....	19
Figura 11 –	Modelos de Freundlich e Langmuir ordem aplicados.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das variáveis operacionais da cinética de adsorção.....	12
Tabela 2 – Matriz do planejamento experimental para QT e remoção.....	13
Tabela 3 – Efeitos estimados, valor p e limites de confiança para QT.....	14
Tabela 4 – Efeitos estimados, valor p e limites de confiança para remoção.....	14
Tabela 5 – Análise de ANOVA para QT e remoção.....	15
Tabela 6 – Comparação da remoção de corante por diferentes literaturas.....	17
Tabela 7 – Estudo de cinética com massa e concentração fixas.....	17
Tabela 8 – Estudo de equilíbrio com massa e tempo fixos.....	19

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	METODOLOGIA	11
2.1	Preparo da borra de café	11
2.2	Ensaio de adsorção	11
2.2.1	<i>Preparação do adsorbato</i>	11
2.3	Planejamento experimental	11
2.4	Estudo da cinética do processo de adsorção	12
2.5	Estudo do equilíbrio no processo de adsorção	12
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
4	CONCLUSÃO	21
	REFERÊNCIAS	22

AVALIAÇÃO DO USO DA BORRA DE CAFÉ COMO ADSORVENTE PARA A REMOÇÃO DO CORANTE TÊXTIL AZUL DE METILENO PRESENTE EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

EVALUATION OF COFFEE GROUNDS AS ADSORBENT FOR THE REMOVAL OF METHYLENE BLUE TEXTILE DYE PRESENT IN WASTEWATER

Ayrton Natthan Silva Ramos*

RESUMO

Nos últimos anos uma temática que tem sido bastante discutida são os tratamentos alternativos para problemas ambientais. Um dos grandes problemas é o lançamento de efluentes têxteis com corantes em corpos aquáticos, que quando passam pelo tratamento convencional tem uma taxa de remoção da concentração de corante baixa. Um dos métodos alternativos é o uso de bioadsorventes, como a borra de café, para remoção desses corantes. Com isso, o trabalho teve como objetivo realizar a secagem da borra de café e avaliar seu potencial como adsorvente, com diferentes variáveis, a fim de descobrir sua eficiência de remoção de corante têxtil em efluentes, usando um efluente têxtil sintético (ETS) com grande concentração de azul de metileno. Foi realizado um planejamento experimental e com ele ficou explícito que as melhores condições de remoção do corante foram com massa da borra de café de 0,1 gramas, concentração de azul de metileno de 100 mg.L⁻¹ e tempo de agitação de 30 minutos. Em seguida no estudo cinético foi fixado a massa e concentração para análise da curva de crescimento da quantidade de corante adsorvido por quantidade de massa do adsorvente (QT) no qual foram aplicados os modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, sendo que o de pseudo-segunda ficou mais ajustado aos dados, indicando o processo como quimissorção. Após isso, no estudo de equilíbrio com massa e tempo fixados, foi analisada a curva entre a concentração de corante no tempo de equilíbrio (CE) e a quantidade de corante adsorvido por quantidade de massa do adsorvente no equilíbrio (QE) no qual foram aplicados os modelos de Freundlich e Langmuir que se ajustaram muito bem aos dados, sendo possível indicar o processo como uma quimissorção em monocamada. Por fim, depois de comparar com outras literaturas, a borra de café se mostrou satisfatória na remoção do azul de metileno, tendo uma faixa de 95 a 99% de remoção.

Palavras-chave: Bioadsorvente. Quimissorção. Efluentes têxteis. Corante têxtil.

*Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental. E-mail: ayrtonatthan17@gmail.com

ABSTRACT

In recent years, alternative treatments for environmental problems has been a widely discussed topic. One of the major problems is the release of textile effluents with dyes into aquatic bodies, which, when undergoing conventional treatment, have a low dye concentration removal rate. One of the alternative methods is the use of bioadsorbents, such as coffee grounds, to remove these dyes. With this, the work aimed to perform the drying of coffee grounds and evaluate its potential as an adsorbent, with different variables, in order to discover its efficiency in removing textile dye in effluents, using a synthetic textile effluent (ETS) with big methylene blue concentration. An experimental design was carried out and it became clear that the best conditions for removing the dye were with a coffee grounds mass of 0.1 grams, methylene blue concentration of 100 mg.L^{-1} and stirring time of 30 minutes. Then, in the kinetic study, the mass and concentration were fixed for analysis of the growth curve of the amount of dye adsorbed by amount of adsorbent mass (QT) in which the pseudo-first and pseudo-second order models were applied, with the pseudo-second order being more adjusted to the data, indicating the process as chemossorption. After that, in the equilibrium study with fixed mass and time, the curve between the dye concentration at equilibrium time (EC) and the amount of dye adsorbed per amount of adsorbent mass at equilibrium (QE) was analyzed, applying the Freundlich and Langmuir models, which adjusted very well to the data, being possible to indicate the process as a monolayer chemossorption. Finally, after comparing with other literature, the coffee grounds proved to be satisfactory in the removal of methylene blue, having a range of 95 to 99% removal.

Keywords: Bioadsorbent. Chemossorption. Textile effluents. Textile dyes.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, adversidades no âmbito ambiental têm se tornado progressivamente mais frequentes e intensas, em especial devido ao crescimento populacional e de atividades industriais. Problemas decorrentes de ações antrópicas têm acarretado impactos na qualidade da água, solo e do ar de forma irreversível. Um dos setores a ser destacado nesse cenário é o têxtil, que por sua vez gera uma elevada quantidade de efluente (HAN et al., 2016).

Os efluentes têxteis apresentam uma composição extremamente heterogênea, grandes porções de material tóxico e recalcitrante, além da presença de corantes (JERÔNIMO, 2012), que ao serem lançados em corpos hídricos sem um tratamento apropriado provocam prejuízo à qualidade da água (DA COSTA, DE ALMEIDA SAWAGUCHI e DA ASSUNÇÃO JÚNIOR, 2020).

Grande parte dos corantes que são usados na indústria têxtil não são absorvidos na etapa de tingimento, por isso ao serem introduzidos na água reduzem a solubilidade de gases como o oxigênio, gás imprescindível para a respiração dos peixes, além de afetarem a fotossíntese das plantas aquáticas ao impedir a penetração da luz na água (ODY, 2014).

Esses corantes, de maneira mais direta, contribuem na elevação da turbidez, diminuindo a incidência da radiação solar, conseqüentemente prejudicam os organismos aquáticos como algas e os peixes que ingerem essas algas, além de interferir nos ciclos biogeoquímicos (NIEBISCH et al., 2014).

Um dos corantes mais utilizados pela indústria têxtil é o azul de metileno, que é composto aromático heterocíclico com peso molecular de $319,58 \text{ g.mol}^{-1}$ de fórmula molecular $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$, solúvel em água, do tipo catiônico, que é normalmente aplicado no tingimento de celulose, lãs e tecidos (OLIVEIRA, SILVA e VIANA, 2013).

Embora, o azul de metileno não seja demasiadamente perigoso, é um corante que pode causar danos tanto ao ambiente como à saúde humana, já que quando inalado ou ingerido, pode provocar sintomas como dificuldade respiratória, ardência, náuseas, vômitos, diarreia e gastrite. Ademais, em maiores doses, pode ocasionar dores de cabeça e abdominais, desordem mental, transpiração excessiva e metemoglobinemia (GHOSH e BHATTACHARYYA, 2002; OLIVEIRA, COELHO e MELO, 2018). Portanto, é necessário um tratamento adequado ao mesmo.

O aumento da complexidade e dificuldade para o tratamento das águas residuárias têxteis levam a uma busca constante por novos métodos de tratamento. Atualmente, uma grande variedade de métodos físicos, químicos e biológicos estão disponíveis e a escolha de qual será o melhor certamente deve ser feita considerando os objetivos a serem alcançados em tal tratamento (CHICATTO et al., 2018). Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente mais limpas e de baixo custo para descontaminação desses efluentes contendo corantes vêm sendo estudadas e a adsorção se mostra uma técnica bastante eficiente. (ODY, 2014).

O processo de adsorção tem seu destaque em detrimento de sua eficácia no tratamento de águas residuárias contendo corantes, reputada como uma técnica simples e conveniente para aplicações industriais (TANG et al., 2019), somando ao fato de ser ecologicamente acessível e com utilização reduzida de química, ocasionando assim a dispensa de geração de lodos e produtos intermediários (UNUABONAH, OMOROGIE e OLADOJA, 2019).

Devido à preocupação sobre a preservação do meio ambiente e à saúde pública, tem crescido a busca por materiais de baixo custo a serem usados como adsorventes em meio aquoso para serem utilizados no processo de adsorção

(MÜLLER et al., 2019). Nesse sentido, a borra de café se mostra como alternativa, já que é um produto muitas vezes descartado sem uso, além de ser abundante em termos de produção no país, que segundo a associação brasileira da indústria de café (ABIC) de 2017, o consumo de café eventualmente atingirá cerca de 1,2 milhões de toneladas até 2021/2022, tendo assim uma média anual de crescimento de aproximadamente 3,5% no período de 2016-2021 com a tendência de aumento a cada ano.

Nesse sentido, o objetivo do trabalho é realizar a secagem da borra de café e avaliar o seu potencial como adsorvente para remoção do corante têxtil azul de metileno, presente em águas residuárias, avaliando as melhores condições de remoção, a eficácia como tratamento e aplicando modelos cinéticos e de equilíbrio no processo de adsorção.

2 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

2.1 Preparo da borra de café

Em relação à produção do material adsorvente será utilizada como matéria-prima a borra de café derivada do preparo convencional, realizado em residências e nas cantinas da Universidade Estadual da Paraíba. Depois de coletada, a mesma foi armazenada em potes de vidro hermético e conduzida até o laboratório, para respectiva preparação e análises.

Inicialmente, a borra foi lavada com água destilada em temperatura ambiente para remoção de compostos solúveis. Em seguida, ela foi colocada em bandejas de alumínio que foram expostas ao sol por um período de 48h, para secagem natural.

2.2 Ensaio de adsorção

2.2.1 Preparação do adsorbato

Para a realização dos experimentos, foi preparado um efluente têxtil sintético (ETS), tendo em vista que seu uso permite maior controle das características físico-químicas ao longo do processo de adsorção abordado nessa pesquisa.

O ETS estudado, foi preparado de acordo com a metodologia proposta por MO et al. (2007), como se segue: adição do corante têxtil azul de metileno, com uma concentração de 1000 mg.L^{-1} ; álcool polivinílico (PVA) a uma concentração de 500 mg.L^{-1} ; cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 250 mg.L^{-1} e; sulfato de sódio (Na_2SO_4) a uma concentração de 750 mg.L^{-1} . Após a devida preparação, o ETS foi solubilizado por agitação manual em balão volumétrico de 1000 mL.

A fim de caracterizar o ETS, foi realizada a varredura deste visando a determinação do comprimento de onda máximo, no qual ocorre o maior valor de absorvância. Subsequentemente, foram realizadas 4 diluições distintas para construção da curva de calibração, sendo essas: 10, 20, 30, 40 e 50 mg.L^{-1} . Para obtenção da absorvância durante a varredura e para a construção da curva de calibração, foi utilizado espectrofotômetro.

Concluída a etapa de secagem da borra de café, o material adsorvente obtido foi testado em diferentes condições operacionais de secagem de acordo com o planejamento experimental proposto.

2.3 Planejamento experimental

Será realizado um planejamento fatorial para avaliar a influência das variáveis experimentais (massa do adsorvente, concentração do corante têxtil, tempo de agitação) do material sobre duas respostas, a quantidade de corante têxtil adsorvido por unidade de massa do adsorvente (QT) e a remoção da concentração da solução de corante têxtil (% remoção), a fim de determinar as melhores condições de trabalho.

As variáveis independentes utilizadas no estudo são apresentadas na Tabela 1 com os valores codificados e reais.

Tabela 1 - Valores das variáveis operacionais da cinética de adsorção

Pontos	-1	+1
Massa do adsorvente (g)	0,10	0,30
Concentração do corante têxtil (mg.L ⁻¹)	20	100
Tempo de agitação (min)	30	60

Fonte: Elaborada pelo autor, 2022.

Os experimentos de adsorção serão realizados sobre uma mesa agitadora orbital, usando-se frascos de Erlenmeyer de 125 mL contendo 50 mL da solução de corante têxtil. As condições de cada erlenmeyer serão definidas conforme a matriz do planejamento experimental.

Com o objetivo de verificar qual modelo cinético melhor descreve o processo de adsorção do corante têxtil sobre a borra de café, serão realizados ensaios, usando as melhores condições operacionais definidas no planejamento experimental.

2.4 Estudo da cinética do processo de adsorção

Uma vez estabelecida as condições experimentais, o adsorvente (borra de café) e adsorbato (corante têxtil, 25 mL), serão colocados dentro de frascos de Erlenmeyer de 125 mL, postos na mesa agitadora orbital, durante 60 minutos. A cada intervalo de 5 minutos, as amostras serão retiradas e filtradas para remover a borra de café. A determinação da concentração residual de corante têxtil será feita por espectrofotometria.

2.5 Estudo do equilíbrio no processo de adsorção

Visando a determinação da capacidade máxima de adsorção da borra de café, será realizado o estudo do equilíbrio, cujo tempo de equilíbrio será definido a partir da análise dos resultados da modelagem cinética.

Os ensaios serão realizados utilizando frascos de Erlenmeyer contendo uma determinada quantidade do adsorvente (borra de café), um determinado volume da solução contendo o corante têxtil. Essa massa de adsorvente e volume de solução serão definidos em função dos resultados do planejamento experimental. Os frascos de Erlenmeyer serão postos em uma mesa agitadora orbital, durante o tempo necessário para atingir o equilíbrio. Após os ensaios, as amostras serão filtradas para remover a borra de café. A determinação da concentração residual de corante têxtil será feita por espectrofotometria.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

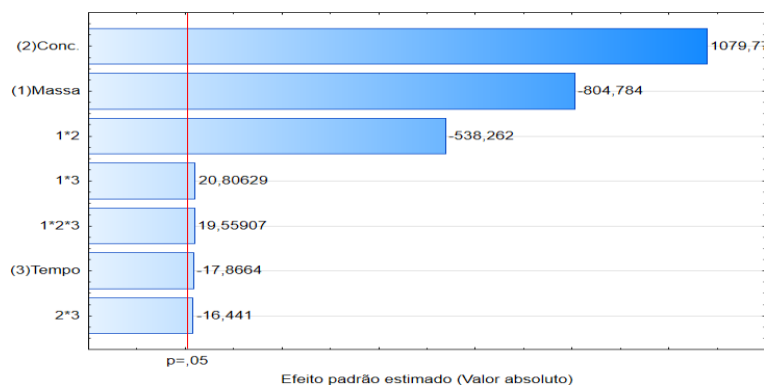
O objetivo da aplicação do planejamento fatorial no sistema, foi a avaliação dos efeitos significativos na resposta que tem a capacidade de serem modificados a fim de aumentar a eficiência do método. As variáveis analisadas foram: massa do adsorvente, concentração do corante (azul do metileno) e tempo de agitação, de acordo com as matrizes codificadas do planejamento experimental (Tabela 1) com os valores de QT e remoção que são observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz do planejamento experimental para QT e remoção

Ensaio	Massa	Concentração	Tempo	QT (mg.g ⁻¹)	Remoção (%)
1	-1	-1	-1	9,7553	97,55
2	1	-1	-1	3,3033	99,10
3	-1	1	-1	49,6098	99,22
4	1	1	-1	16,2760	97,66
5	-1	-1	1	9,6909	96,91
6	1	-1	1	3,2990	98,97
7	-1	1	1	47,8105	95,62
8	1	1	1	16,4220	98,53
9	0	0	0	14,6780	97,85
10	0	0	0	14,6909	97,94
11	0	0	0	14,6265	97,51

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Figura 1 – Gráfico de Pareto efeitos padronizados para QT

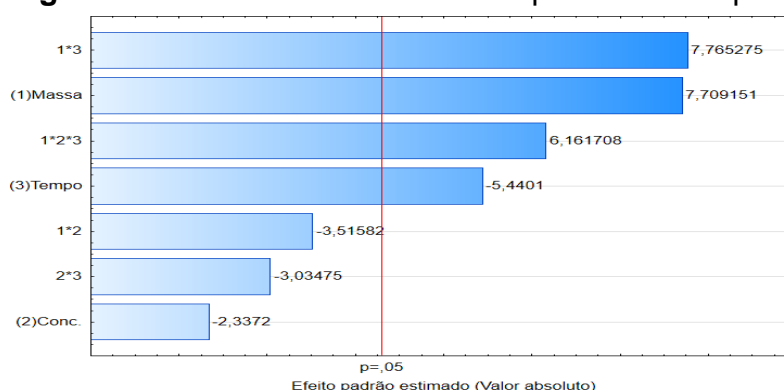


Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Para a análise de quais dados são significativos foram feitos gráficos de Pareto, para QT (Figura 1) e para remoção (Figura 2). Nesses gráficos, todos os valores que se situam à direita do valor de P igual a 0,05 são estatisticamente significativos, já os que se encontram à esquerda não são.

Percebe-se na Figura 1 que todos os valores foram significantes estatisticamente para QT, desde os padrões até as relações deles entre em si, validando que todos influenciam o processo. Já na Figura 2, nota-se que a concentração, a relação entre massa e concentração e a relação de concentração com o tempo não foram estatisticamente significativas para eficiência de remoção.

As Tabelas 3 e 4 mostram uma análise de regressão que apresenta os valores da estimativa dos principais efeitos dos fatores envolvidos no processo de adsorção. O fator que tiver significância será mostrado com o valor p menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, podendo assim dizer que ele é significativo.

Figura 2 – Gráfico de Pareto efeitos padronizados para remoção

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Tabela 3 - Efeitos estimados, valor p e limites de confiança para QT

Efeitos	Coefficientes de regressão	T	p	Desvio do coeficiente
Constante	18,1965	1771,077	0,0000	0,0103
(1) Massa	-19,3916	-804,784	0,0000	0,0120
(2) Conc.	26,0174	1079,770	0,0000	0,0120
(3) Tempo	-0,4305	-17,866	0,0031	0,0120
1*2	-12,9696	-538,262	0,0000	0,0120
1*3	0,5013	20,806	0,0023	0,0120
2*3	-0,3962	-16,441	0,0037	0,0120
1*2*3	0,4713	19,559	0,0026	0,0120

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Analisando a Tabela 3, percebe-se que os valores de p novamente são menores que o seu nível de significância $\alpha = 0,05$, e a Tabela 4 que a concentração e suas relações isoladas com massa e tempo não são significativas, que corrobora com o que foi apresentado no gráfico de Pareto.

Tabela 4 - Efeitos estimados, valor p e limites de confiança para remoção

Efeitos	Coefficientes de regressão	T	p	Desvio do coeficiente
Constante	97,89643	1429,244	0,0000	0,0685
(1) Massa	1,23836	7,709	0,0164	0,0803
(2) Conc.	-0,37544	-2,337	0,1444	0,0803
(3) Tempo	-0,87387	-5,440	0,0322	0,0803
1*2	-0,56477	-3,516	0,0722	0,0803
1*3	1,24738	7,765	0,0162	0,0803
2*3	-0,48749	-3,035	0,0936	0,0803
1*2*3	0,98979	6,162	0,0253	0,0803

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Os efeitos estimados indicam o quanto que o fator influi em respeito à resposta estudada, isso significa que quanto maior o seu valor em módulo, maior é a sua influência. A concentração é o efeito que mais influência em QT, explicitando que maiores valores resultam no aumento desse fator, já em relação à massa, menores valores resultam em maiores valores de QT, como mostrado na Tabela 3.

Em relação à remoção, os efeitos não são tão expressivos, tendo maior destaque na massa e sua relação com o tempo, mas ainda sim, é possível deduzir pelos dados que maiores valores de massa e menores valores de tempo aumentam a remoção, explícito na Tabela 4.

Tendo base nesses efeitos significativos, é possível desenvolver modelos matemáticos lineares, representados nas equações I e II:

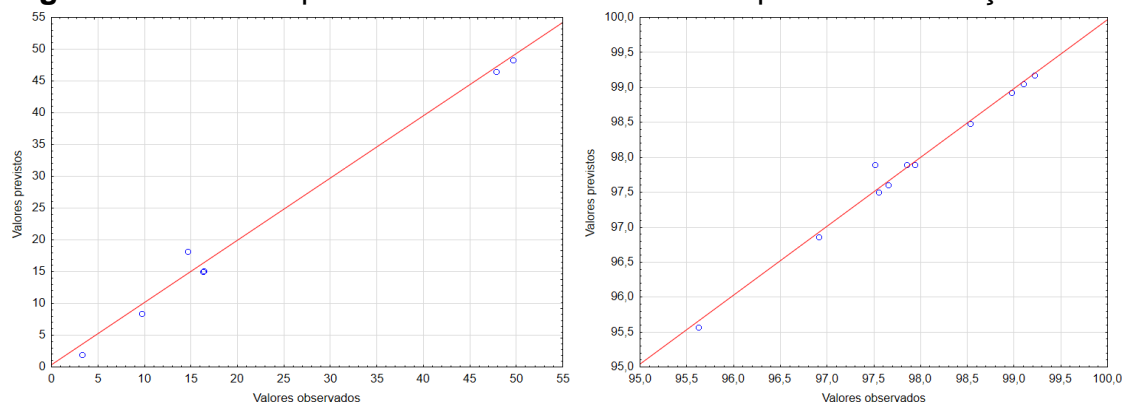
$$Y_{qt} = 18,1965 - 19,392 * x_1 + 26,0174 * x_2 - 0,4365 * x_3 - 12,970 * x_1 * x_2 + 0,5013 * x_1 * x_3 - 0,3962 * x_2 * x_3 + 0,4713 * x_1 * x_2 * x_3 \text{ (I)}$$

$$Y_{rem} = 97,8964 + 1,2384 * x_1 - 0,3754 * x_2 - 0,8739 * x_3 - 0,5648 * x_1 * x_2 + 1,2474 * x_1 * x_3 - 0,4875 * x_2 * x_3 + 0,9898 * x_1 * x_2 * x_3 \text{ (II)}$$

Em que: $Y_{qt} = QT \text{ (mg.g}^{-1}\text{)}$, $Y_{rem} = \text{Remoção (\%)}$, $x_1 = \text{Massa}$, $x_2 = \text{Concentração}$, $x_3 = \text{Tempo de agitação}$. Usando x_1 , x_2 e x_3 nessas equações e substituindo pelos valores absolutos de -1,0 e +1 é possível encontrar os valores estimados, tanto de QT, como da remoção do corante.

Pelos gráficos mostrados na Figura 3, nota-se que os valores previstos pelo modelo para QT e remoção são bem satisfatórios, com poucos pontos longe da linha principal, dessa forma é possível ver graficamente o quão satisfatório o modelo se aplica aos dados.

Figura 3 – Modelo aplicado aos valores observados para QT e remoção



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Pela Tabela 5 na análise de QT e remoção, a razão entre o F calculado (F_{cal}) e F tabelado (F_{tab}) é maior que 1, o que significa que os dados são estatisticamente significativos, com 97,94% e 98,47% de dados explicados respectivamente.

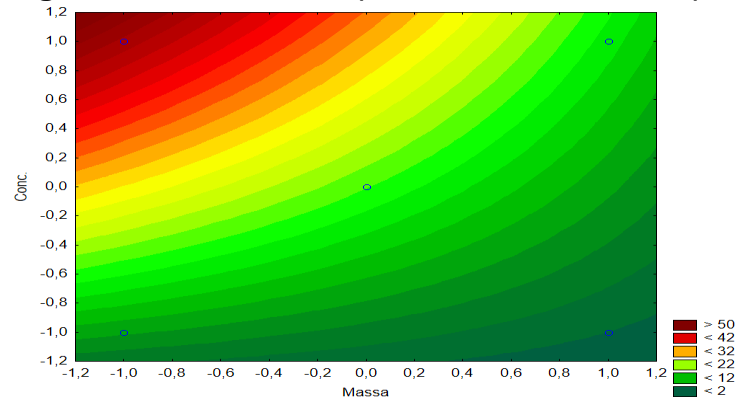
Tabela 5 - Análise de ANOVA para QT e remoção

Fator	Fcalculado	Ftabelado	Fcal/Ftab	R ²
QT	20,36	8,8867	2,2910	0,9794
Remoção	27,60	8,8867	3,1062	0,9847

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

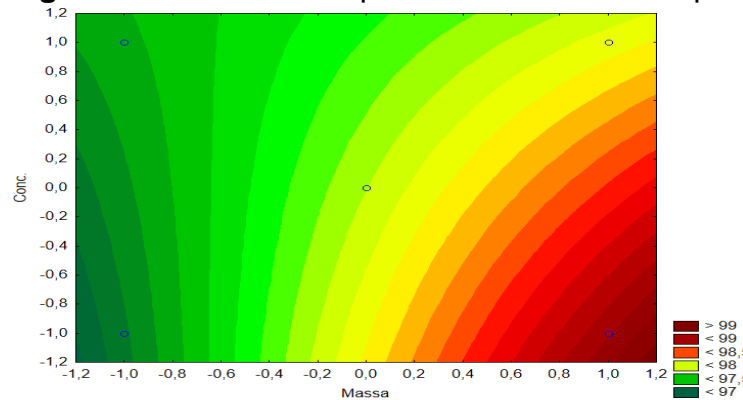
Após uma análise por gráficos de superfície relacionando a massa com a concentração, pela Figura 4, é visível que se a massa for baixa e a concentração for alta, o valor de QT será o mais alto possível, já na Figura 5, percebe-se que o valor mais alto de remoção atingido será com o valor de massa alta e a de concentração mais baixa.

Figura 4 – Gráfico de superfície Massa x Conc. para QT



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

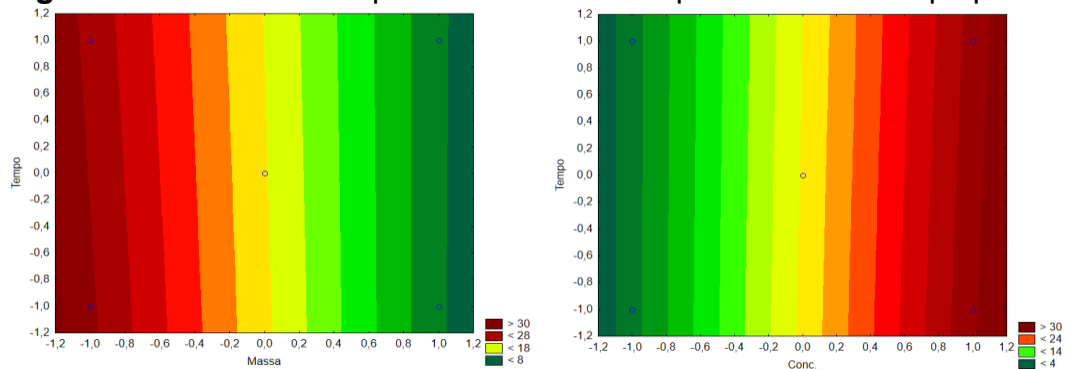
Figura 5 – Gráfico de superfície Massa x Conc. para remoção



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

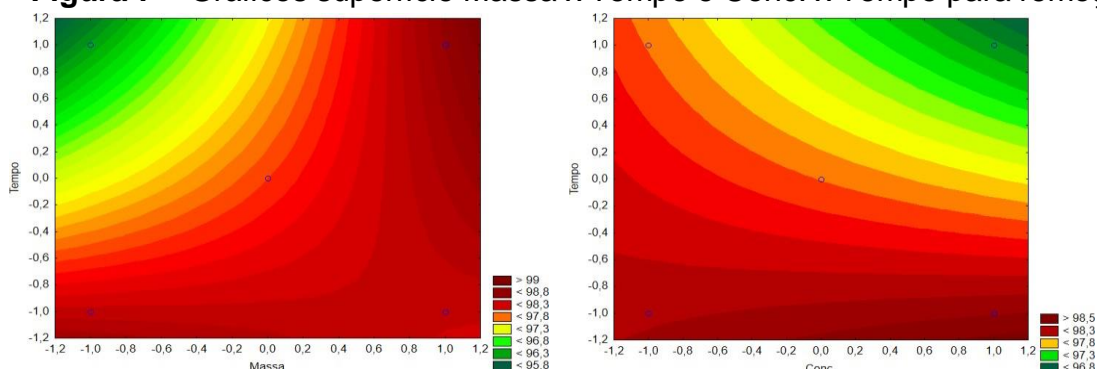
Pelos gráficos demonstrados na Figura 6 que relaciona massa e concentração com o tempo de agitação, respectivamente, também fica notável que os valores altos de QT são alcançados com ambos tempos de agitação maior ou menor, desde que a massa seja a mais baixa ou a concentração seja a mais alta.

Figura 6 – Gráficos de superfície Massa x Tempo e Conc. x Tempo para QT



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Nos gráficos representados na Figura 7 que associam massa e concentração com o tempo de agitação, nessa ordem, fica evidente que os valores de remoções só foram baixos quando o valor da massa é baixo e o tempo de agitação é alta ou quando a concentração e tempo de agitação são altos. Em todas as outras opções foram obtidos maiores valores de remoção.

Figura 7 – Gráficos superfície Massa x Tempo e Conc. x Tempo para remoção

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Ao avaliar as capacidades de remoção do efluente, por outras literaturas que usaram diferentes adsorventes, é perceptível que a borra de café apresentou um desempenho satisfatório, como está representado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação da remoção de corante por diferentes literaturas

Adsorvente	Taxa de remoção (%)	Literatura
Folhas de pinheiro	20-80	Yagub, Sen e Ang (2012)
Pinha	64-95	Sen, Afroze e Ang (2011)
Caulim	68-98	Mouni et al. (2018)
Bagaço de malte	91-94	Correia et al. (2020)
Madeira macia	92-98	El Hajam et al. (2019)
Borra de café	95-99	Autor, 2022.

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Enquanto as outras literaturas (Mouni e El Hajam) conseguiram alcançar no máximo 98% de remoção, no presente trabalho foi possível a obtenção de até 99,22%, além do valor de mínimo ter sido alto, maior que 95%. Realizado o planejamento experimental, a próxima parte foi o estudo de cinética, no qual foram realizados experimentos com a massa de borra de café fixa de 0,1 gramas e a concentração de 100 mg.L⁻¹, tendo em vista os resultados satisfatórios de QT encontrados nesses pontos, variando apenas o tempo, encontrando a concentração final (CF) e o QT.

Tabela 7 - Estudo de cinética com massa e concentração fixas

Massa (g)	Concentração (mg.L ⁻¹)	Tempo (min)	CF (mg.L ⁻¹)	QT (mg.g ⁻¹)
0,1	100	1	41,93	14,52
0,1	100	3	25,12	18,72
0,1	100	5	23,96	19,01
0,1	100	10	10,81	22,30
0,1	100	15	10,39	22,40
0,1	100	20	7,99	23,00
0,1	100	25	7,61	23,10
0,1	100	30	7,39	23,15
0,1	100	35	6,80	23,30
0,1	100	40	5,87	23,53
0,1	100	45	5,87	23,53
0,1	100	50	5,57	23,61

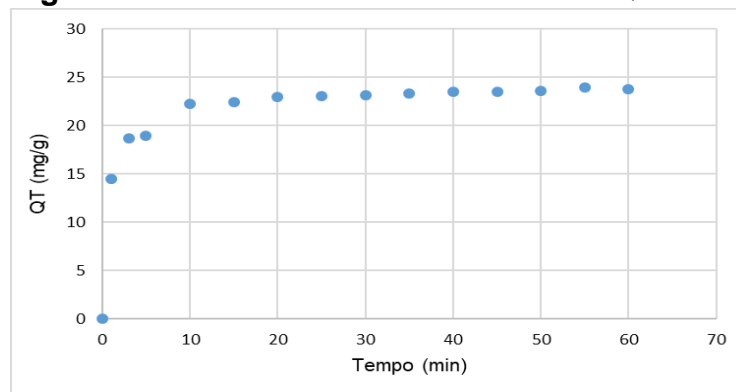
0,1	100	55	4,21	23,95
0,1	100	60	4,84	23,79

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Tendo posse desses dados da Tabela 7 é possível analisar a curva de crescimento do QT ao passar do tempo representado na Figura 8. No gráfico, é nítido que ao passar do tempo, o QT vai se estabilizando, desde o passar dos 20 primeiros minutos até um ponto que não se nota tanta diferença no seu valor, mesmo com um grande intervalo de tempo passando, sendo esse valor entre 23 e 24 mg.g⁻¹.

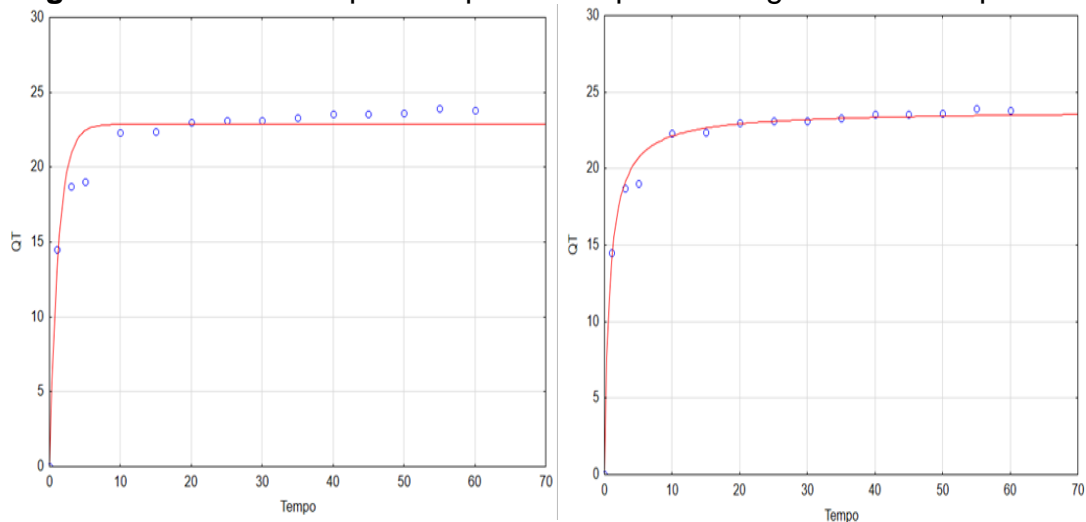
Para uma representação melhor de como QT se comporta, foram aplicados modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, representados na Figura 9.

Figura 8 – Gráfico dos valores obtidos de QT em função do Tempo



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Figura 9 – Modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem aplicados



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

No modelo de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem mostrados por NASCIMENTO, et al. (2020), na Figura 9, são representados pelas equações III e IV:

$$QT = QE * (1 - e^{-K1.Tempo}) \quad \text{(III)}$$

$$QT = \frac{K2 * QE^2 * Tempo}{1 + K2 * QE * Tempo} \quad \text{(IV)}$$

Em que QE (mg.g^{-1}) = quantidade de soluto adsorvido por massa de adsorvente em equilíbrio; K_1 (min^{-1}) = constante de velocidade da adsorção de pseudo-primeira ordem; K_2 ($\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) = constante da taxa de adsorção de pseudo-segunda ordem.

O modelo de pseudo-primeira ordem conseguiu explicar 95,58% dos dados e o de pseudo-segunda ordem foi melhor explicando 99,20% dos dados.

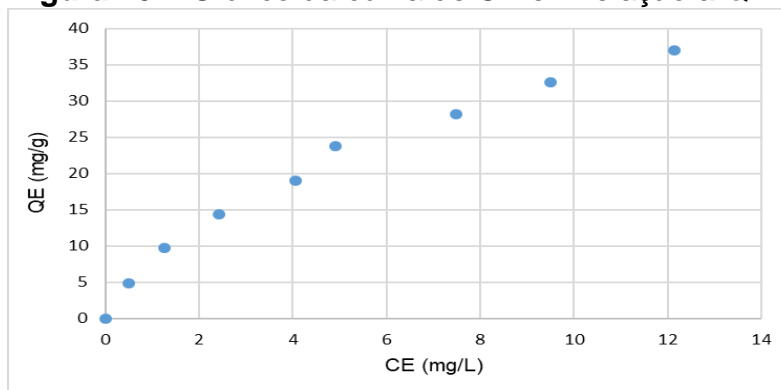
Partindo para o estudo de equilíbrio, agora fixando a massa e o tempo, variando apenas a concentração, foram encontrados os valores de QE e CE representados na Tabela 8.

Tabela 8 - Estudo de equilíbrio com massa e tempo fixos

Massa (g)	Tempo (min)	Concentração (mg.L^{-1})	CE (mg.L^{-1})	QE (mg.g^{-1})
0,1	60	20	0,5060	4,8735
0,1	60	40	1,2470	9,6882
0,1	60	60	2,4218	14,3946
0,1	60	80	4,0484	18,9879
0,1	60	100	4,9159	23,7710
0,1	60	120	7,4822	28,1294
0,1	60	140	9,5064	32,6234
0,1	60	160	12,1451	36,9637

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

Figura 10 – Gráfico da curva de CE em relação a QE



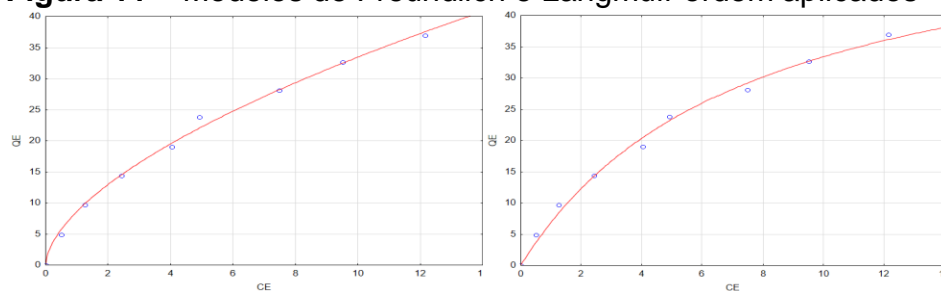
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

É nítido que pelos gráficos os modelos aplicados foram muito favoráveis na compreensão dos dados obtidos pelos experimentos, já que as linhas chegam muito perto dos pontos experimentais representados na Figura 10. Nos modelos de Freundlich e Langmuir mostrados por NASCIMENTO, et al. 2020, na Figura 11, os gráficos são explicados pelas equações V e VI:

$$QE = QF * KF^{\frac{1}{n}} \quad (\text{V})$$

$$QE = \frac{q_{max} * KL * CE}{1 + KL * CE} \quad (\text{VI})$$

Em que: KF = constante de capacidade de adsorção ($\text{mg.g}^{-1}.\text{(mg.L}^{-1}\text{)}^{-1/n}$) de Freundlich e $1/n$ = constante relacionada a heterogeneidade da superfície; n = constante de Freundlich; KL = constante de interação adsorvato/adsorvente (L.mg^{-1}); q_{max} : capacidade máxima de adsorção (mg.g^{-1}).

Figura 11 – Modelos de Freundlich e Langmuir ordem aplicados

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022.

O modelo de Freundlich explicou 99,64% dos dados e o de Langmuir explicou 99,40%, sendo bem satisfatórios para explicar o modelo.

O modelo de Freundlich teve sua constante maior que 1, de 1,6959, mostrando assim que foi uma adsorção favorável, com forte interação entre o adsorvente e o adsorvato. Já o modelo de Langmuir mostrou o valor do q_{max} descoberto foi de 58,5065 $mg.g^{-1}$.

4 CONCLUSÃO

Fundamentado nos dados obtidos e apresentados no presente trabalho se pode concluir que:

A borra de café se mostrou um adsorvente com uso satisfatório para a remoção de azul de metileno;

A faixa de remoção de corante foi melhor do que das outras literaturas referenciadas;

As melhores condições de remoção do azul de metileno e maior valor de QT simultaneamente foram com a massa da borra de café de 0,1 gramas, concentração do azul de metileno de 100 mg.L^{-1} e tempo de agitação de 30 minutos;

No estudo de cinética, o modelo que melhor se ajustou aos dados obtidos para a curva de QT foi o de pseudo-segunda ordem, sendo assim um indicativo de que o processo é de adsorção química (quimissorção);

O modelo de Langmuir se adequou bem aos dados experimentais, na fase de estudo de equilíbrio, caracterizando uma adsorção em monocamada, o que corrobora com a ideia de ter sido uma quimissorção.

REFERÊNCIAS

- ABIC 2017. **Associação Brasileira da Indústria do Café**. Indicadores da Indústria de Café | 2017. Rio de Janeiro, outubro de 2017. Disponível em: <<https://estatisticas.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2017/>> Acesso em: 14 de out. 2021.
- CHICATTO, J. A.; GONÇALVES, M. J.; ALTMAJER-VAZ, D.; TAVARES, L. B. B. Treatment of the textile wastewater through fungi: a sustainable alternative. **Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate**, v. 9, n. 1, 2018.
- CORREIA, L. F.; BARROS, J. M. H. F.; FERNANDES, A. M.; CLERICUZI, G. Z.; DE SOUZA, K. S. M. G. Aproveitamento do bagaço de malte como adsorvente para a remoção do corante azul de metileno. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e730997781-e730997781, 2020.
- DA COSTA, G. F.; DE ALMEIDA SAWAGUCHI, M. Y.; DA ASSUNÇÃO JÚNIOR, V. G. Remoção de corantes têxteis por coagulação-floculação-sedimentação e adsorção. **Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332**. 2020. p. 77-88.
- EL HAJAM, M.; INDRISSI KANDRI, N.; HARRACH, A.; EL KHOMSI, A.; ZEROUALE, A. Adsorption of Methylene Blue on industrial softwood waste “Cedar” and hardwood waste “Mahogany”: comparative study. **Materials Today: Proceedings**, v. 13, p. 812-821, 2019.
- GHOSH, D.; BHATTACHARYYA, K. G. Adsorption of methylene blue on kaolinite. **Applied clay science**, v. 20, n. 6, p. 295-300, 2002.
- HAN, G.; LIANG, Can-Zeng; CHUNG, Tai-Shing; WEBER, M.; STAUDT, C.; MALETZKO, C. Combination of forward osmosis (FO) process with coagulation/flocculation (CF) for potential treatment of textile wastewater. **Water research**, v. 91, p. 361-370, 2016.
- JERÔNIMO, C. E. Uso de técnicas combinadas para o tratamento de efluentes têxteis: separação físico-química e fotodegradação UV- H₂O₂. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1626-1638, 2012.
- LACERDA, C. A. M. **Avaliação da efetividade de remoção de cor de soluções corantes e efluentes têxteis pelo tratamento fotocatalítico de óxidos de ferro recobertos com dióxido de titânio**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- MANSOUR, A. A.; ARNAUD, T.; LU-CHAU, T. A.; FDZ-POLANCO, M.; MOREIRA, M. T.; RIVERO, J. A. C. Review of SSF for lignocellulolytic enzyme production: challenges for environmental applications. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 15, p. 31-46, 2016.
- MO, J.; HWANG, Jeong-Eun; JEGAL, J.; KIM, J. Pretreatment of a dyeing wastewater using chemical coagulants. **Dyes and Pigments**, v. 72, n. 2, p. 240-245, 2007.

MOUNI, L. BELKHIRI, L. BOLLINGER, Jean-Claude; BOUZAZA, A.; ASSADI, A.; TIRRI, A.; BAHMOUNE, F.; MADANI, K.; REMINI, H. Removal of Methylene Blue from aqueous solutions by adsorption on Kaolin: Kinetic and equilibrium studies. **Applied Clay Science**, v. 153, p. 38-45, 2018.

MÜLLER, L. C.; DE ALMEIDA ALVES, A. A.; MONDARDO, R. I.; SENS, M. L. Adsorção do azul de metileno em serragem de *Pinus elliottii* (pinus) e *Drepanostachyum falcatum* (bambu). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 687-695, 2019.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A. D.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020. p. 27-74.

NIEBISCH, C. H.; FOLTRAN, C.; DOMINGUES, R. C. S.; PABA, J. Assessment of *Heteroporus biennis* secretion extracts for decolorization of textile dyes. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 88, p. 20-28, 2014.

ODY, Daniel Augusto. **Remoção de corantes têxteis de efluentes por adsorção com carvão ativado**. 2014. 38 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

OLIVEIRA, F. M. D.; COELHO, L. M.; MELO, E. I. D. Avaliação de processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante azul de metileno. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

OLIVEIRA, S. P.; DA SILVA, W. L. L.; VIANA, R. R. Avaliação da capacidade de adsorção do corante azul de metileno em soluções aquosas em caulinita natural e intercalada com acetato de potássio. **Cerâmica**, v. 59, n. 350, p. 338-344, 2013.

SEN, T. K.; AFROZE, S.; ANG, H. M. Equilibrium, kinetics and mechanism of removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pine cone biomass of *Pinus radiata*. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 218, n. 1, p. 499-515, 2011.

TANG, S.; XIA, D.; YAO, Y.; CHEN, T.; SUN, J.; YIN, Y.; SHEN, W.; PENG, Y. Dye adsorption by self-recoverable, adjustable amphiphilic graphene aerogel. **Journal of colloid and interface science**, v. 554, p. 682-691, 2019.

UNUABONAH, E. I.; OMOROGIE, M. O.; OLADOJA, N. A. Modeling in adsorption: fundamentals and applications. In: **Composite Nanoadsorbents**. Elsevier, 2019. p. 85-118.

YAGUB, M. T.; SEN, T. K.; ANG, H. M. Equilibrium, kinetics, and thermodynamics of methylene blue adsorption by pine tree leaves. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 223, n. 8, p. 5267-5282, 2012.

AGRADECIMENTOS

Ao meu professor orientador Fernando, por todo conhecimento lecionado durante a graduação e ajuda na elaboração do TCC.

Ao meu Crew especial Hebert, Lucas, Daniel, Cléo, Ivila e Diego, por todos os momentos que tivemos, em todo tempo nos ajudando e nos divertindo juntos.

À minha amiga Natália, por sempre me encorajar a estudar, me incentivando e me motivando a melhorar como pessoa e profissional.

Aos meus amigos da turma 2016.1, em que foram a melhor turma que tive na minha vida, me ajudando e me apoiando durante toda a graduação.

Aos meus parceiros de laboratório Júnior e Myrna pelos conhecimentos que partilhamos e aprendemos juntos durante nossa jornada.

Aos meus pais, por todo suporte fornecido antes e durante o curso, com muita paciência, amor e companheirismo.

Aos professores do Departamento de Engenharia e Sanitária e Ambiental (DESA) pelos conhecimentos passados durante todos esses anos.

Às técnicas de laboratório Adna Bandeira e Ketyla Karla, pela ajuda na realização dos experimentos no laboratório.

Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo auxílio financeiro com a bolsa de estudos que possibilitou a dedicação ao programa de graduação e aparelhagem de laboratório.