



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA – PPGEQ

**UTILIZAÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSORVENTE PARA  
REMOÇÃO DO CORANTE REMAZOL PRETO B EM MEIO AQUOSO**

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA, BRASIL

Fevereiro de 2024

IURI LAURINDO DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSORVENTE PARA  
REMOÇÃO DO CORANTE REMAZOL PRETO B EM MEIO AQUOSO**

Dissertação de Mestrado  
apresentado ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia  
Química da Universidade Federal  
de Campina Grande como parte  
dos requisitos parciais a obtenção  
do título de Mestre em Engenharia  
Química.

Área de concentração: Fenômenos  
de superfície e reações.

Orientador: Eudésio Oliveira Vilar

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA, BRASIL

Fevereiro de 2024

O48u

Oliveira, Iuri Laurindo de.

Utilização de óxido de grafeno como adsorvente para remoção do corante remazol preto B em meio aquoso / Iuri Laurindo de Oliveira – Campina Grande, 2024.

54 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Eudésio Oliveira Vilar."

Referências.

1. Adsorção. 2. Corante. 3. Óxido de Grafeno. 4. Fenômenos de superfície e reações. 5. Poluição Aquática. 6. I. Vilar, Eudésio Oliveira. II. Título.

CDU 66.0:665.662.2(043)

**UTILIZAÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSORVENTE PARA  
REMOÇÃO DO CORANTE REMAZOL PRETO B EM MEIO AQUOSO**

**IURI LAURINDO DE OLIVEIRA**

Dissertação de mestrado aprovada em 29 de fevereiro de 2024

Banca examinadora:



---

Prof Dr. Eudésio Oliveira Vilar

Orientador



---

Prof. Dr. José Etimógenes Duarte Vieira Segundo

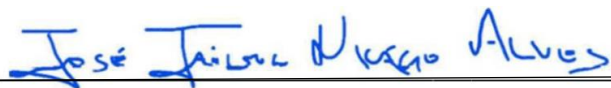
Examinador Externo



---

Prof. Dr. Sidinei Kleber da Silva

Examinador Externo



---

Prof. Dr. José Jailson Nicacio Alves

Examinador Interno

Campina Grande, Paraíba, Brasil, 29 de fevereiro de 2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA  
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP  
58429-900  
Telefone: (83) 2101-1100  
Site: <http://cct.ufcg.edu.br>

## REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO **GRAU DE MESTRE** EM ENGENHARIA QUÍMICA, REALIZADA EM 29 DE FEVEREIRO DE 2024 (**Nº 526**)

CANDIDATO(A): **Iuri Laurindo de Oliveira**. COMISSÃO EXAMINADORA: Eudésio Oliveira Vilar, Prof. Dr., UFCG, **Orientador**, José Jailson Nicacio Alves, Prof. Dr., UFCG/ Examinador Interno, Sidinei Kleber da Silva, Prof. Dr., UFCG/ Examinador Externo, José Etimógenes Duarte Vieira Segundo, Prof. Dr., UFPB/ Examinador Externo. TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “UTILIZAÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSORVENTE PARA REMOÇÃO DO CORANTE REMAZOL PRETO B EM MEIO AQUOSO”. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO Desenvolvimento de Processos Químicos. HORA DE INÍCIO: **16:00 Horas** – LOCAL: **por videoconferência**. Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua dissertação, obtendo conceito **APROVADO**. Face à aprovação, declara o(a) orientador, achar-se a examinada, legalmente habilitado(a) a receber o **Grau de Mestre Engenharia Química**, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Maricé Pereira de Araújo – Secretária do PPGEQ, os membros da Comissão Examinadora e o(a) candidato(a). Campina Grande, 29 de fevereiro de 2024.

Maricé Pereira de Araújo

Secretária

Eudésio Oliveira Vilar, Prof. Dr., UFCG

Orientador

José Jailson Nicacio Alves, Prof. Dr., UFCG

Examinador Interno

Sidinei Kleber da Silva, Prof. Dr., UFCG

Examinador Externo

José Etimógenes Duarte Vieira Segundo, Prof. Dr., UFPB

Examinador Externo

Iuri Laurindo de Oliveira

Candidato



Documento assinado eletronicamente por **SIDINEI KLEBER DA SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 29/02/2024, às 17:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE JAILSON NICACIO ALVES, PROFESSOR 3 GRAU**, em 29/02/2024, às 17:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **EUDESIO OLIVEIRA VILAR, PROFESSOR 3 GRAU**, em 29/02/2024, às 18:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSÉ ETIMÓGENES DUARTE VIEIRA SEGUNDO, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 18:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARICE PEREIRA DA SILVA, SECRETÁRIA**, em 01/03/2024, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Iuri Laurindo de Oliveira, Usuário Externo**, em 01/03/2024, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4238702** e o código CRC **FF19855E**.

**Referência:** Processo nº 23096.011203/2024-91

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por todas as coisas maravilhosas que ele proporciona em minha vida.

Agradeço a minha família por todo o apoio, amor e compreensão ao longo da minha acadêmica. Seus encorajamentos constantes e seus sacrifícios pessoais foram o maior pilar para minha formação tanto acadêmica quanto pessoal.

Dedico um sincero agradecimento aos meus orientadores Prof. Dr. Eudésio Oliveira Vilar e Prof. Dr. José Etimógenes Duarte Vieira Segundo, cuja orientação continua e ensinamentos foram fundamentais para a conclusão do mestrado.

OLIVEIRA, Iuri Laurindo. **Utilização de óxido de grafeno como adsorvente para remoção do corante Remazol Preto B de Águas em meio aquoso.** 2024. 54p. Dissertação de Mestrado. Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba. 2024.

## RESUMO

A crescente demanda no aumento de poluentes emergentes na água tem se tornado um problema ambiental bastante preocupante. Um dos principais causadores da poluição aquática são as indústrias têxteis, esse setor despeja milhares de poluentes nas águas, dentre esses poluentes os que mais se destacam são os corantes. A presença de corantes no ambiente aquático acaba acarretando o impedimento da passagem de luz na água fazendo com que as atividades fotossintéticas se alterem. Já existem alguns processos que estão sendo estudados para tentar remover os corantes das águas, e dentre esses métodos o que mais se destaca é o processo de adsorção, devido ao baixo custo. Sendo assim, esse trabalho buscou sintetizar o nano-material óxido de grafeno utilizando a rota sintética estabelecida por Hummers para utilizá-lo como adsorvente na remoção do corante reativo remazol preto B em meio aquoso. O óxido de grafeno foi escolhido para ser utilizado como adsorvente pois possui boa estabilidade, uma área de superficial grande, juntamente com o elevado número de poros que tornam esse material promissor na remoção de corantes em meio aquoso. Foi sintetizado seguindo a metodologia proposta por Hummers, seguindo a rota sintética obteve-se 3g de OG, que foi diluído em 600ml de água destilada para a preparação da suspensão com concentração igual a 5 mil ppm. O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o percentual de remoção que o óxido de grafeno em pó, como também a suspensão de óxido de grafeno obtiveram em diferentes intervalos de tempo para remover o corante remazol preto B, sendo que os resultados obtidos indicam que a utilização do óxido de grafeno em pó foi mais eficiente no processo de remoção de corante com um percentual de remoção igual a 64,63% em um intervalo de tempo de 120 minutos e concentração inicial do corante igual a 100 ppm, podendo concluir que o óxido de grafeno possui um percentual de remoção satisfatório no processo de adsorção do corante remazol preto B.

**Palavras-chaves:** Adsorção, corante, óxido de grafeno



OLIVEIRA, Iuri Laurindo. **Utilização de óxido de grafeno como adsorvente para remoção do corante Remazol Preto B de Águas em meio aquoso.** 2024. 54p. Dissertação de Mestrado. Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba. 2024.

### **ABSTRACT**

The growing demand on the increase of emerging emissions in water has become a very worrying environmental problem. One of the main causes of water pollution are the textile industries, this sector of discharge of thousands of pollutants in the waters, among these pollutants the most outstanding are the dyes. The presence of dyes in the aquatic environment ends up impeding the passage of light in the water, causing changes in photosynthetic activities. There are already some processes that are being trained to try to remove dyes from water, and among these methods, the adsorption process that stands out the most, due to its low cost. Thus, this work sought to synthesize the graphene oxide nano-material using the synthetic route by Hummers to use it as an adsorbent in the removal of the reactive dye remazol black B in aqueous medium. Graphene oxide was chosen to be used as an adsorbent because it has good stability, a large surface area, together with the high number of pores that make this material promising in the removal of dyes in aqueous media. It was synthesized following the methodology proposed by Hummers, following the synthetic route, 3g of GO was obtained, which was diluted in 600ml of distilled water to prepare the suspension with a concentration equal to 5 thousand ppm. The main objective of this work was to evaluate the percentage of graphene oxide removal in powder form, as well as the graphene oxide suspension obtained at different time intervals to remove the dye remazole black b, and the results obtained indicate that the use of Powdered graphene oxide was more efficient in the dye removal process with a removal percentage equal to 64.63% in a time interval of 120 minutes and initial dye concentration equal to 100 ppm, leading to the conclusion that the dye oxide Graphene has an overwhelming removal percentage in the adsorption process of the dye remazole black B.

**Keywords:** Adsorption, dye, graphene oxide.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Estrutura molecular do Remazol Preto B, indicando alguns grupos presentes na molécula.....	16
<b>Figura 2</b> - Estrutura química do óxido de grafeno.....	19
<b>Figura 3</b> - Estrutura molecular do óxido de grafeno indicando os grupos funcionais presentes na molécula.....	22
<b>Figura 4</b> - Fluxograma da rota experimental para produção do óxido de grafeno. ....	24
<b>Figura 5</b> - Diferentes concentrações da solução do corante remazol preto B.....	28
<b>Figura 6</b> - Imagens microscópicas indicando as regiões onde foram feitas as análises no grafite em pó. ....	29
<b>Figura 7</b> - Imagens microscópicas indicando as regiões onde foram feitas as análises no óxido de grafeno em pó.....	30
<b>Figura 8</b> - Gráficos dos espectros Raman das diferentes regiões do grafite em pó. ....	31
<b>Figura 9</b> - Gráficos dos espectros Raman para as diferentes regiões no óxido de grafeno. ....	32
<b>Figura 10</b> - Identificação das bandas (D, G e G') do espectro Raman das amostras de grafite e óxido de grafeno.....	33
<b>Figura 11</b> - Gráfico da regressão linear referente a curva de calibração do corante remazol preto B. ....	35
<b>Figura 12</b> - Gráficos dos ajustes não lineares dos dados experimentais cinéticos ao modelo de pseudo-segunda ordem para o OG em pó. ....	38
<b>Figura 13</b> - Gráficos dos ajustes não lineares dos dados experimentais cinéticos ao modelo de pseudo-primeira ordem para a suspensão de OG.....	39
<b>Figura 14</b> - Gráficos dos ajustes não lineares dos dados experimentais cinéticos ao modelo de pseudo-segunda ordem para a suspensão de OG. ....	39
<b>Figura 15</b> - Gráficos isotérmicos dos modelos linearizados de Langmuir e Freundlich usando o óxido de grafeno em pó e a suspensão. ....	44

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Concentrações e absorbâncias para o corante Remazol preto B. ....	34
<b>Tabela 1</b> - Concentrações e absorbâncias para o corante Remazol preto B. ....	35
<b>Tabela 2</b> - Porcentagem de remoção do Remazol Preto B 133% em função do tempo, utilizando óxido de grafeno em pó como adsorvente. ....	36
<b>Tabela 3</b> - Porcentagem de remoção do Remazol Preto B 133% em função do tempo, utilizando a suspensão de óxido de grafeno como adsorvente. ....	36
<b>Tabela 4</b> - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-primeira ordem utilizando óxido de grafeno em pó como adsorvente. ....	40
<b>Tabela 5</b> - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-segunda ordem utilizando óxido de grafeno em pó como adsorvente. ....	40
<b>Tabela 5</b> - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-segunda ordem utilizando óxido de grafeno em pó como adsorvente. ....	41
<b>Tabela 6</b> - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-primeira ordem utilizando a suspensão de OG como adsorvente.....	41
<b>Tabela 7</b> - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-segunda ordem utilizando a suspensão de OG como adsorvente.....	42
<b>Tabela 8</b> - Isoterma de Langmuir para a adsorção do RBB utilizando o OG em pó e a suspensão de OG como adsorvente. ....	44
<b>Tabela 9</b> - Isoterma de Freundlich para a adsorção do RBB utilizando o OG em pó e a suspensão de OG como adsorvente.....	45

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	10
2.	OBJETIVOS .....	13
2.1.	OBJETIVO GERAL .....	13
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	13
3.1.	IMPACTOS GERADOS PELAS INDÚSTRIAS TÊXTEIS .....	13
3.2.	REMAZOL PRETO B .....	16
3.3.	GRAFENO .....	17
3.4.	ÓXIDO DE GRAFENO .....	18
3.5.	ADSORÇÃO .....	20
3.6.	ÓXIDO DE GRAFENO COMO POSSIVEL ADSORVENTE .....	21
3.7.	CINÉTICA DE ADSORÇÃO .....	22
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	24
4.1.	SÍNTESE DO ÓXIDO DE GRAFENO .....	24
4.2.	CINÉTICA DE ADSORÇÃO DO REMAZOL PRETO B 133% EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES UTILIZANDO ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSROVENTE .....	25
4.3.	AJUSTES NÃO LINEARES AOS MODELOS DE PSEUDO-PRIMEIRA ORDEM E PSEUDO- SEGUNDA ORDEM .....	25
4.4.	ISOTERMAS DE ADSORÇÃO .....	26
4.5.	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL .....	27
4.6.	ESPECTROSCOPIA RAMAN CONFOCAL .....	27
4.7.	CURVA DE CALIBRAÇÃO .....	28
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	28
5.1.	CARACTERIZAÇÃO - ESPCTROSCOPIA DE RAMAN .....	28
5.2.	CURVA DE CALIBRAÇÃO .....	34
5.3.	PERCENTUAL DE REMOÇÃO DAS DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE RBB 133% EM FUNÇÃO DO TEMPO .....	36
5.4.	CINÉTICA DE ADSORÇÃO DO REMAZOL PRETO B 133% EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES UTILIZANDO ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSROVENTE NA REAÇÃO .....	37
5.5.	ISOTERMAS DE ADSORÇÃO .....	43
6.	CONCLUSÃO .....	46
7.	REFERENCIAS .....	47

## 1. INTRODUÇÃO

A industrialização trouxe consigo diversos benefícios para a vida dos seres humanos, proporcionando empregos, melhoria de vida e bem-estar da população. Entretanto, trouxe também diversos prejuízos que são causados por empresas de diversos setores, dentre esses a indústria têxtil é responsável por poluir corpos d'água devido ao despejo inadequado de efluentes sem tratamento.

A indústria têxtil é o segundo setor que mais gera empregos no Brasil, no ano de 2021 foram gerados cerca de 102.658 mil empregos, além disso o país ser o 5º maior produtor de produtos têxteis do mundo (ABIT, 2021). Apesar de possuir um ótimo benefício para a economia do país, o setor têxtil é um dos setores que mais utilizam água em seus processos, em média são gastos 150 litros de água por quilo de tecido produzido, se tornando assim um dos setores econômicos que mais produzem efluentes, estimasse que 12% da água utilizada no processo de tingimento é perdida a partida da evaporação, e os outros 88% são descartados como efluentes.

Além da poluição das águas esse setor acaba causando danos ambientais no ar, esse fato se deve pois, em algumas caldeiras é utilizado fogo a lenha para a queima de óleos, isso faz com que seja liberado o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), esses gases contribuem para o efeito estufa e conseqüentemente chuvas ácidas.

Outro impacto ambiental que a indústria têxtil proporciona é a grande quantidade de resíduos sólidos que são gerados por essas empresas, sendo que, uma parte dos resíduos sólidos gerados são caracterizados com classe IIA não inertes, os resíduos dessa classe apresentam características de biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.

Resíduos desse tipo podem ser reciclados e utilizados novamente, porém se o resíduo sólido for contaminado durante o processo de fabricação o mesmo não poderá ser reciclado, pois apresentara características de corrosividade, inflamabilidade, toxicidade, patogenicidade e dentre outras características que se enquadram na classe de resíduos I pela norma NBR 10.004/2004 (ABNT, 2009).

Um outro fator que influencia na poluição é que, boa parte dos tecidos que são produzidos e vendidos acabam sendo descartados de maneira incorreta ocasionando assim poluição ambiental.

Os corantes sintéticos dos tipos azoicos são os principais causadores dos problemas ambientais do setor têxtil, pois os mesmos são compostos químicos que apresentam características de baixa degradabilidade, toxicidade e boa solubilidade em água, esses corantes são chamados assim devido em sua composição química apresentar um ou mais grupos azo (-N=N-).

Corantes desse tipo são produzidos com a finalidade de serem resistentes à biodegradação (com tempo estimado de até 46 anos). Além disso, podem causar a morte de organismos aquáticos vivos e inibir o crescimento de algas.

Muitos estudos vêm sendo feitos com o intuito de criar técnicas que sejam eficientes e que possam retirar os corantes presentes nos efluentes aquáticos, uma dessas técnicas é o processo de adsorção, que vem apresentando eficácia perante a remoção de corantes em efluentes, pois os procedimentos tradicionais utilizados nas estações de tratamento de esgoto não são suficientes para retirar os corantes e outros materiais presentes nos efluentes.

A adsorção nada mais é do que um processo de transferência de massa, que estuda a capacidade que determinados sólidos tem de acumular em sua superfície certas substâncias que estão presentes em fluidos gasosos ou líquidos, facultando a disjunção dos elementos presentes nesses fluidos. Este processo pode ocorrer entre a junção líquido-líquido, gás-líquido, gás-sólido ou sólido-líquido (PERRY et al., 1984; FOUST et al., 1982).

Muitos elementos são utilizados como adsorventes na remoção de substâncias, um exemplo seria o carvão ativado, que por ser um material com uma área de superfície grande e também por possuir uma boa porosidade é bastante utilizado em processos de adsorção materiais argilosos e conchas também são utilizados nesse tipo de processo. Os materiais a base de carbono vêm chamando a atenção de diversos pesquisadores devido a ampla área que esses materiais podem ser aplicados, sendo utilizados em setores automobilísticos, siderúrgicos e na eletroquímica, além de possuírem também alta estabilidade mecânica, estruturas bem definidas e uniformes, e é por esses

motivos que os materiais carbonados chamam tanto a atenção dos pesquisadores (BANERJEE *et al.*, 2015). O grafeno é um dos materiais carbonados derivados do grafite, possui uma forma cristalina hexagonal em sua estrutura molecular, é um nano material composto por átomos de carbono ligados entre si por meio de ligações  $sp^2$  formando assim uma estrutura trigonal planar em sua geometria molecular, esse material chama muito a atenção de pesquisadores devido as diversas propriedades que possui, como, as propriedades elétricas (os elétrons conseguem se propagar quase que livremente no material), as mecânicas (suportando pressões de até 130 GPa) resistência essa que é atribuída as fortes ligações químicas entre os átomos de carbono, e propriedades térmicas (sendo capaz de dissipar calor melhor que qualquer outro material) (SEGUNDO VILAR., 2016).

Um outro material, à base de grafeno, que chama atenção por sua versatilidade e aplicabilidade em diferentes áreas é o óxido de grafeno (OG), utilizado em áreas diversas como engenharia química, física e medicina. O óxido de grafeno é a forma oxidada do grafeno, com uma variedade de grupos epóxi, carboxil e hidroxil em sua superfície, que devido à sua natureza hidrofílica aliada com uma densidade elevada de cargas negativas (esse fato se deve aos grupos funcionais portadores de oxigênio) o material seja promissor como adsorvente para remover materiais particulados indesejados na água (BANERJEE *et al.*, 2015).

O Brasil é um país que possui uma economia têxtil bem estabelecida, de acordo com dados da Associação Brasileira de Indústria Têxtil (ABIT), no ano de 2019 essas industriais representaram cerca de 16,7% dos empregos gerados no Brasil, sendo o setor têxtil o segundo maior empregador nesse referido ano. Tendo em vista os impactos ambientais causados pelo não tratamento de efluentes gerados pelas indústrias têxteis, como também por outras indústrias utilizam corantes do tipo azo, observou-se a necessidade de estabelecer uma forma de tratamento dessas águas residuais contaminadas com corante, de forma que não agrave ainda mais os problemas ambientais associados ao seu despejo incorreto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

- Sintetizar o óxido de grafeno e verificar a sua eficiência na remoção de preto remazol B de efluentes industriais através da adsorção.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Representar o fenômeno da adsorção por um modelo matemático;
- Determinar parâmetros cinéticos;
- Avaliar a possibilidade de extrapolar as condições experimentais para adsorbatos em condições experimentais diversas.

## **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **3.1. IMPACTOS GERADOS PELAS INDÚSTRIAS TÊXTEIS**

A indústria têxtil é conhecida por ter impactos ambientais influenciados, tanto na produção de matéria-prima quanto na fabricação de tecidos e produtos acabados. A produção de fibras sintéticas, como poliéster, nylon e acrílico, por exemplo, envolve o uso intensivo de petróleo e produtos químicos que podem ser tóxicos e poluentes. Além disso, muitos processos de tingimento e acabamento também podem ocasionar a poluição do ar e da água.

De acordo com um artigo publicado no site da revista Forbes em 2021, a indústria têxtil é responsável por cerca de 10% das emissões globais de carbono e é o segundo maior poluidor de água do mundo, depois da indústria de alimentos e bebidas. Além disso, a indústria é responsável por uma grande quantidade de resíduos sólidos, incluindo tecidos não usados e roupas descartadas.

O descarte inadequado de águas residuais é um dos principais impactos ambientais gerados pelo setor têxtil. Durante o processo de produção têxtil, a água é utilizada em grande quantidade para finalidades diversas, como lavagem de fibras, tingimento e acabamento de tecidos. Como resultado, a água utilizada se torna contaminada com produtos químicos, corantes e outros poluentes que podem ser prejudiciais ao meio ambiente e à saúde pública.



De acordo com a Greenpeace (2019), o setor têxtil é responsável por cerca de 20% das emissões de carbono industrial globalmente, emitindo cerca de 1,2 bilhões de toneladas de dióxido de carbono a cada ano. O hidrocarboneto da água causado pelo setor têxtil pode ter consequências graves, como a degradação da qualidade da água e a contaminação de ecossistemas aquáticos. Além disso, as águas residuais podem afetar a saúde humana e a vida animal.

Ainda segundo a Greenpeace, muitas empresas têxteis ainda descartam suas águas residuais diretamente em rios e oceanos sem tratamento adequado, aumentando o risco de escoamento da água. Essas práticas não satisfizeram apenas os ecossistemas aquáticos, mas também podem afetar a saúde e o bem-estar das comunidades locais que dependem dessas fontes de água para consumo e outras atividades.

Muitas empresas estão adotando tecnologias mais inteligentes para o tratamento de águas residuais, como sistemas com tecnologia de membrana e tecnologias de filtração avançada. Além disso, as empresas também estão buscando práticas de economia de água e outras soluções para reduzir a quantidade de água utilizada na produção têxtil.

O setor industrial têxtil é um dos principais contribuintes para a poluição aquática, devido aos seus processos de produção e descarte inadequados. O setor têxtil utiliza uma ampla gama de produtos químicos durante a fabricação de tecidos, desde corantes e fixadores até agentes de acabamento e produtos de limpeza. Essas substâncias químicas são frequentemente liberadas nos sistemas de água, causando danos nos ecossistemas aquáticos.

Muitos desses corantes contêm substâncias tóxicas que podem ser prejudiciais à vida aquática, afetando a qualidade da água e causando desequilíbrios nos ecossistemas. Além disso, esses produtos químicos podem persistir no ambiente e acumular-se ao longo do tempo, causando efeitos de longo prazo. (HUA et al., 2019)

Além do tingimento, outros processos de acabamento têxtil também acarretam prejuízos à água. Agentes de acabamento, como retardantes de chamas, impermeabilizantes e amaciantes, contêm substâncias químicas prejudiciais que são liberadas nas águas residuais. Esses produtos químicos

afetam a qualidade da água e tem efeitos adversos sobre os organismos aquáticos, inclusive afetando a reprodução, o crescimento e o desenvolvimento. (WANG, L *et al.*, 2019)

Muitas fábricas têxteis descartam suas águas residuais diretamente em rios e corpos d'água sem o devido tratamento, resultaram na contaminação desses recursos hídricos. A falta de tratamento adequado das águas residuais contribui para a degradação da qualidade da água, tornando-a imprópria para uso e afetando a vazão aquática. (THOMPSON, G *et al.*, 2001)

Os corantes têxteis contêm compostos orgânicos complexos que conferem cores aos tecidos, mas muitos desses compostos são persistentes e podem representar perigos para a vida aquática (De Vasconcelos *et al.*, 2008)

A maioria dos corantes têxteis é composta em compostos aromáticos, que geralmente contêm grupos funcionais, como aminas, fenóis e anilinas. Esses grupos podem ser tóxicos para os organismos aquáticos e, quando os corantes são liberados nas águas residuais, podem causar danos ao ecossistema aquático (Ong, ST *et al.*, 2017).

Durante os processos de tingimento têxtil, ocorre a liberação de corantes não fixados nas águas residuais. Esses corantes não fixados são solúveis em água e podem ser facilmente transportados para rios, lagos e outras fontes de água. A presença desses corantes pode alterar a transparência da água e prejudicar a fotossíntese de plantas aquáticas, afetando a cadeia alimentar e a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos (Nakamoto, T *et al.*, 2004).

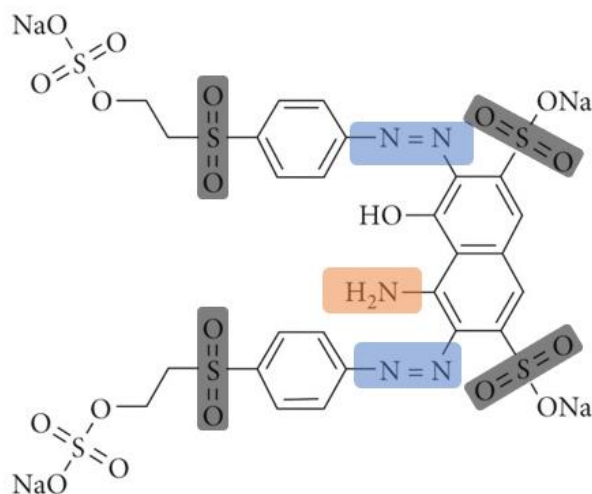
Além disso, alguns corantes têxteis contêm metais pesados, como cobre, cromo, mercúrio e chumbo, que são adicionados para melhorar a fixação da cor nos tecidos. A liberação desses metais pesados nas águas residuais pode causar danos aos organismos aquáticos e à saúde humana quando a água contaminada é consumida ou utilizada para irrigação de cultivos (Sun, Y *et al.*, 2021).

### 3.2. REMAZOL PRETO B

O corante Remazol Preto B é um exemplo de um corante têxtil que é amplamente utilizado na indústria de tingimento de tecidos e fibras. Ele pertence à classe dos corantes azoicos, que possuem um grupo azo (N=N) como parte essencial de sua estrutura química. O Remazol Preto B possui uma estrutura química complexa, constituída por grupos funcionais variados, como grupos sulfônicos e grupos nitro. Esses grupos são responsáveis por suas propriedades de coloração.

Devido à presença de grupos sulfônicos em sua estrutura, o Remazol Preto B é solúvel em água, o que é essencial para sua aplicação em processos de tingimento têxtil (S. K. Ghosh et al., 2009). Além disso, a natureza azoica do corante confere-lhe alta reatividade, permitindo que forme ligações covalentes com as fibras do tecido durante o processo de tingimento, garantindo uma fixação eficiente da cor (E. A. Moawed et al., 2015). A figura 1 ilustra a estrutura molecular do Remazol Preto B.

**Figura 1** - Estrutura molecular do Remazol Preto B, indicando alguns grupos presentes na molécula.



**Fonte:** Autor 2023.

É possível verificar que a molécula de Remazol Preto B possui quatro grupos sulfônicos em sua estrutura (sublinhados de cinza), dois grupos azo (sublinhados de azul) e um grupo amina (sublinhado de vermelho). A presença desses grupos

dá a molécula de Remazol propriedades fundamentais para que o mesmo seja utilizado como corante têxtil.

### **3.3. GRAFENO**

O grafeno é um material derivado do carbono, composta por uma única camada de átomos de carbono em uma estrutura hexagonal. Ele foi isolado experimentalmente pela primeira vez em 2004 por Andre Geim e Konstantin Novoselov, que receberam o Prêmio Nobel de Física em 2010 por essa descoberta revolucionária.

Como foi citado acima o grafeno é uma forma bidimensional de carbono formado por uma única camada de átomos de carbono em uma estrutura hexagonal. Cada átomo de carbono no grafeno está ligado a outros três átomos de carbono vizinhos por meio de ligações sigma, formando uma rede planar.

Devido à sua estrutura espacial, o grafeno exibe diversas propriedades químicas notáveis. A primeira delas é a alta estabilidade térmica, com ponto de fusão acima de 4.000 Kelvin. Essa característica é atribuída às fortes ligações covalentes entre os átomos de carbono na estrutura do grafeno (Lee, C *et al.*,2008).

Além disso, o grafeno apresenta alta condutividade elétrica e térmica. Devido à sua estrutura planar e aos orbitais pi deslocalizados dos átomos de carbono, o grafeno permite a movimentação rápida e eficiente dos elétrons, tornando-o um excelente condutor de eletricidade e calor (Balandin *et al.*,2008).

O grafeno exibe também uma resistência mecânica excepcional. A estrutura hexagonal planar do grafeno permite que ele seja extremamente leve e, ao mesmo tempo, mais forte do que o aço. Isso é atribuído à alta resistência da rede de ligações carbono-carbono no grafeno (Lee, C *et al.*,2008).

O grafeno também possui propriedades óticas notáveis. Devido à sua estrutura bidimensional, o grafeno exibe absorção de luz em uma ampla faixa de comprimentos de onda, desde o ultravioleta até o infravermelho próximo. Essa propriedade ótica torna o grafeno uma excelente plataforma para aplicações em dispositivos fotônicos.

O grafeno é uma forma de carbono composta por uma única camada de átomos em uma estrutura hexagonal. Cada átomo de carbono no grafeno está ligado a outros três átomos de carbono vizinhos por meio de ligações sigma, formando uma rede planar. Essas ligações sigma são ligações covalentes fortes, que mantêm os átomos de carbono firmemente unidos na estrutura do grafeno. Além disso, os elétrons de valência dos átomos de carbono no grafeno também formam ligações pi deslocalizadas, que se estendem ao longo da estrutura planar, conferindo ao grafeno suas propriedades eletrônicas únicas.

Devido à sua estrutura planar e às ligações pi deslocalizadas, o grafeno exibe alta condutividade elétrica. Os elétrons no grafeno podem se mover rapidamente pela sua estrutura bidimensional, o que o torna um excelente condutor de eletricidade. Além disso, o grafeno também possui alta condutividade térmica, permitindo que o calor seja transferido eficientemente através do material.

Além das propriedades elétricas e térmicas, o grafeno também apresenta resistência mecânica excepcional. A rede de ligações carbono-carbono no grafeno confere a ele uma estrutura rígida e forte. Apesar de ser extremamente fino, o grafeno é mais forte do que o aço e pode suportar tensões mecânicas consideráveis sem se romper.

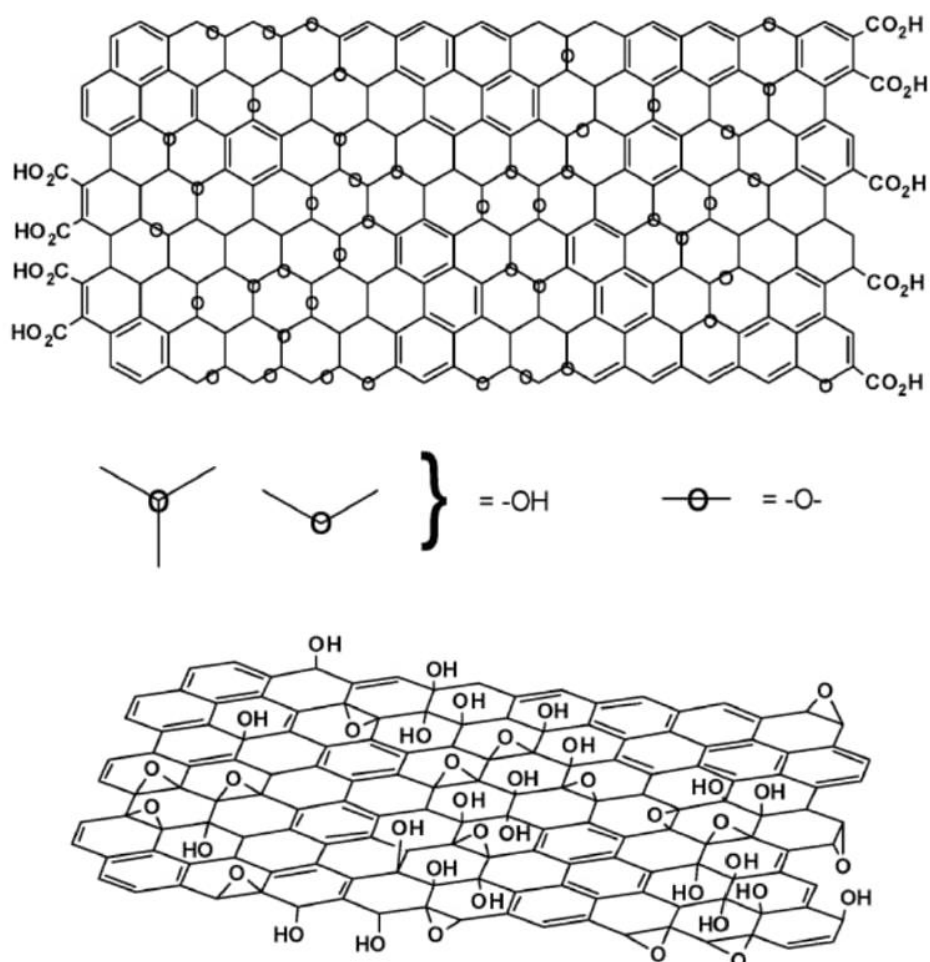
### **3.4. ÓXIDO DE GRAFENO**

O óxido de grafeno (GO) é um derivado do grafeno, consistido de folhas de grafeno com grupos funcionais contendo oxigênio, como grupos hidroxila, carboxila e epóxido em seus planos basais e bordas. Geralmente é preparado por oxidação de grafite usando agentes oxidantes fortes, como ácido sulfúrico, ácido nítrico ou permanganato de potássio, possui propriedades físico-químicas únicas, como alta área superficial, alta condutividade elétrica e boa resistência mecânica, o que o torna adequado para várias aplicações em armazenamento de energia, catálise, sensores, dispositivos biomédicos e remediação ambiental. GO pode ser facilmente funcionalizado com vários compostos orgânicos ou inorgânicos, tornando-se uma plataforma versátil para o desenvolvimento de materiais avançados (M. K. Jha *et al.*, 2014).

A fórmula química do óxido de grafeno é normalmente escrita como  $(C_xH_yO_z)_n$ , onde x, y e z são o número de átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio, respectivamente, e n é o número de unidades repetidas na cadeia polimérica. A composição e estrutura reais do óxido de grafeno podem variar dependendo do método de preparação, mas normalmente contém aproximadamente 50-70% de carbono, 20-30% de oxigênio e 1-10% de hidrogênio em peso.

Como já mencionado anteriormente o o óxido de grafeno é a forma oxidada do grafeno, possuindo em sua estrutura grupos funcionais de oxigênio que estão ligados fora do plano basal, a figura 2 ilustra o esquema.

**Figura 2 -** Estrutura química do óxido de grafeno



**Fonte:** (Dreyer et al., 2010).

Pode-se observar na figura acima da estrutura química da molécula de óxido de grafeno, a presença de hidroxilas, grupos alcenos e grupos epóxi fora do

plano basal da molécula. Os hidrôgenios presentes entre os álcoois e ésteres, fazem com que os carbonos do plano basal mantenham-se estabilizados eletronicamente.

### **3.5. ADSORÇÃO**

O processo de adsorção é um fenômeno de superfície físico-químico, pois nesse procedimento os átomos ou íons de uma determinada substância ficam contidos na superfície do material que está sendo utilizado como adsorvente (geralmente um material sólido). Os átomos ou moléculas da espécie que está sendo adsorvida são atraídos para a superfície do adsorvente fazendo com que a sua concentração aumente na superfície do adsorvente.

A adsorção ocorre de maneira natural, podendo utilizar essa operação para remover resíduos ou poluentes de efluentes, esse procedimento está sendo bastante utilizado na remoção de resíduos tóxicos que contaminam a água, um exemplo de um resíduo tóxico que contamina a água seria os corantes. A maioria dos adsorventes são sólidos que possuem elevada área superficial, para se obter uma alta capacidade de adsorção.

A adsorção pode ser classificada em dois tipos, adsorção química e a adsorção física. A adsorção química, ou quimissorção acontece quando moléculas, íons ou átomos do adsorvato se ligam a superfície do adsorvente por meio de ligações covalentes. Nesse processo ocorre alteração molecular dos elementos que estão envolvidos, sendo assim uma substância pode se transformar em outra. Por se tratar de uma reação química o adsorvente e adsorvato devem possuir singularidades, e devem ser capazes de se identificarem e reagirem.

Já a adsorção física ou fisissorção acontece a partir de uma diferença de energia (ou forças de atração) conhecidas como força de Van der Waals, essa força faz com que as moléculas do adsorvato fiquem retidas na superfície do adsorvente, esse tipo de interação possui um longo alcance, no entanto essas interações são fracas, e nesse processo não há alterações moleculares nas espécies envolvidas, mantendo a sua natureza química. A adsorção física é sempre um processo reversível e exotérmico, o equilíbrio é rapidamente estabelecido a não ser que aconteça uma difusão através da estrutura porosa.

### **3.6. ÓXIDO DE GRAFENO COMO POSSIVEL ADSORVENTE**

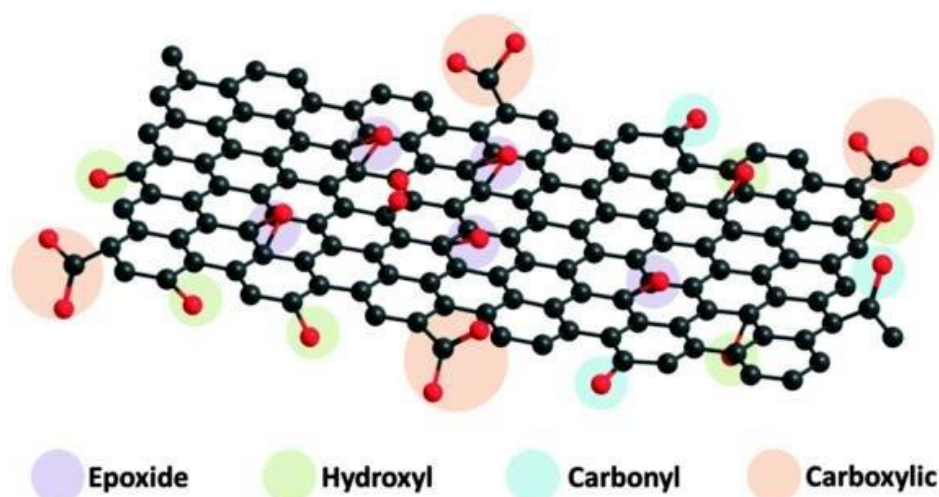
O óxido de grafeno ganhou atenção nos últimos anos devido às suas propriedades adsorventes excepcionais. A alta área superficial específica e o grande volume de poros tornam o óxido de grafeno um excelente candidato para a adsorção de vários poluentes e contaminantes. Tornou-se amplamente utilizado na remediação ambiental, como purificação de água, filtragem de ar e remoção de metais pesados e compostos orgânicos. Sua capacidade de adsorção é atribuída à presença de grupos funcionais contendo oxigênio como hidroxila, carboxila e epóxido em sua superfície, que facilitam a interação com as moléculas alvo. As propriedades únicas do óxido de grafeno o tornam um material promissor para uma ampla gama de aplicações em biomedicina, armazenamento de energia e catálise. Portanto, seu uso potencial como adsorvente continua a ser estudado e explorado por seu papel vital na proteção e sustentabilidade ambiental.

Os grupos funcionais de oxigênio presentes em sua estrutura, como também os defeitos presentes nela, fazem do óxido de grafeno um material bastante promissor quando se fala de adsorção, pois os grupos funcionais de oxigênio, junto com defeitos na estrutura química do GO fazem com que as interações entre o substrato e os adsorvatos se potencializem. O GO pode ser utilizado como possível adsorvente na remoção de diversos poluentes em meio aquoso. (FANTINEL, 2021).

A figura 3 ilustra alguns grupos funcionais presentes na estrutura química do óxido de grafeno:



**Figura 3** - Estrutura molecular do óxido de grafeno indicando os grupos funcionais presentes na molécula.



**Fonte:** (Santos, Everton et al., 2018)

Como é possível observar na figura 2, o óxido de grafeno possui alguns grupos funcionais em sua estrutura molecular, (carbonil, hidroxila, carboxílico e epóxido) grupo esses que dão ao óxido de grafeno propriedades que ajudam no processo de adsorção.

Suas propriedades incluem alta condutividade elétrica, alta resistência mecânica, alta transparência, baixa densidade, alta área superficial específica e propriedades químicas únicas, como a presença de grupos funcionais na superfície. Essas propriedades tornam o óxido de grafeno um candidato promissor para uma ampla variedade de aplicações, como materiais compostos, sensores, catalisadores, dispositivos optoeletrônicos, armazenamento de energia e adsorção de poluentes.

O uso do óxido de grafeno como material adsorvente para remoção de corantes tem sido amplamente estudado devido às suas propriedades únicas. Esse material apresenta uma alta área superficial específica, o que permite a interação com moléculas de corante, e sua superfície é ricamente funcionalizada com grupos hidroxila, carboxila e epóxi, que apresentam forte afinidade com moléculas polares e podem facilitar a adsorção dos corantes.

### **3.7. CINÉTICA DE ADSORÇÃO**

A cinética de adsorção é uma área de estudo que se concentra na compreensão e na descrição dos processos temporais envolvidos na

adsorção de substâncias em superfícies sólidas, investigando como as moléculas de soluto interagem com a superfície do adsorvente ao longo do tempo, desde a chegada inicial até a formação de uma camada adsorvida estável.

Compreender a cinética de adsorção é fundamental para diversas aplicações práticas, como purificação de água, separação de componentes em sistemas líquido-sólido e desenvolvimento de materiais adsorventes para remediação ambiental. A investigação da cinética de adsorção aborda uma série de questões importantes, incluindo a taxa de adsorção, o tempo necessário para atingir o equilíbrio adsorvente-soluto, os mecanismos de transporte de massa e difusão durante o processo de adsorção, entre outros aspectos dinâmicos.

A cinética de adsorção pode envolver as seguintes etapas:

- Difusão das moléculas de corante em solução para a superfície externa do sólido (adsorvente);
- Adsorção nos sítios da superfície externa;
- Difusão das moléculas da superfície para o interior do sólido até o sítio de adsorção;
- Adsorção das moléculas nos sítios ativos disponíveis na superfície interna.

A etapa inicial da adsorção pode ser afetada tanto pela concentração do corante quanto pela agitação. Portanto, um aumento na concentração do corante pode acelerar o movimento das moléculas da solução em direção à superfície do sólido. A capacidade máxima de adsorção é determinada pela isoterma de equilíbrio, resultando em concentrações de equilíbrio maiores para soluções iniciais mais concentradas, mantendo a mesma quantidade de sólido. (MORADI *et al.*, 2015, p.294-301). A natureza das moléculas do corante exerce influência na segunda fase do processo de adsorção, enquanto a terceira fase geralmente é tida como a fase crítica. A taxa de adsorção dos corantes pode ser impactada por fatores como temperatura, pH, concentração inicial, agitação, tamanho das moléculas adsorventes,

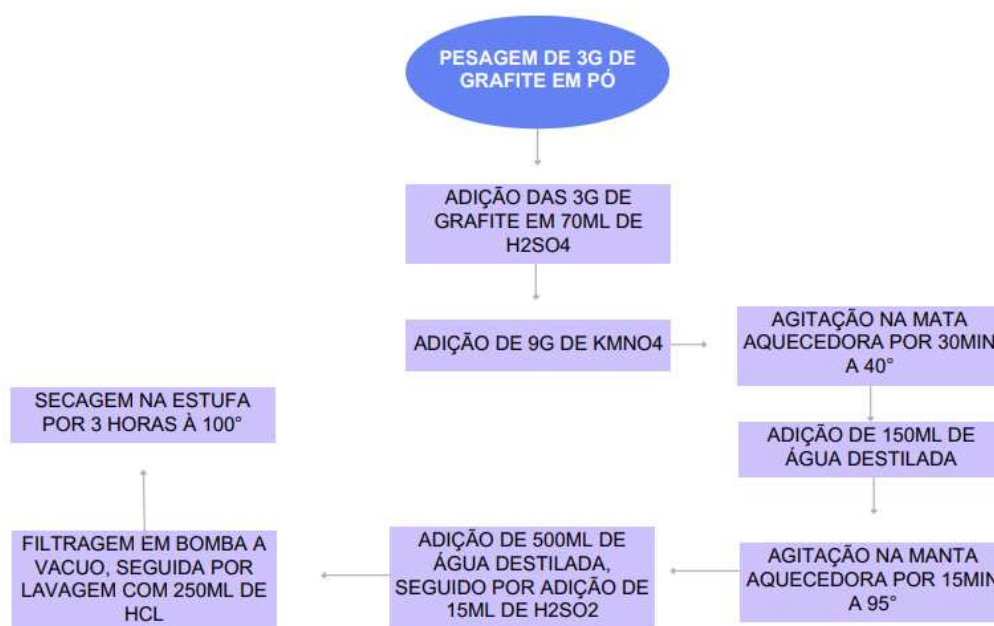
distribuição de porosidade e a variabilidade do efluente (MORADI *et al.*, 2015, p.294-301).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. SÍNTESE DO ÓXIDO DE GRAFENO

O material foi sintetizado seguindo a rota experimental proposta pelo método de Hummers modificado, a partir da oxidação do grafite. Inicialmente 3 gramas de grafite são adicionados a 70ml de  $H_2SO_4$  em banho de gelo, após isso foram adicionadas lentamente 9 gramas de  $KMnO_4$ , então a solução foi levada para a manta de aquecimento onde foi agitada por 30 minutos em uma temperatura de  $40^\circ C$ . Decorrido o tempo de agitação foram adicionados 150ml de água destilada, e a solução foi agitada por 15 minutos em uma temperatura de  $95^\circ C$ . Em seguida foram adicionados 500ml de água destilada, logo após adicionou-se 15ml de  $H_2O_2$ , fazendo com que a coloração da solução saísse de marrom escuro para amarelo. Com o intuito de remover os íons metálicos a solução foi filtrada e lavada com 250ml de HCl, após a filtragem o material foi levado para a estufa por 3 horas em temperatura de  $100^\circ C$ . O fluxograma é apresentado na figura 4 e ilustra a rota experimental para a produção do óxido de grafeno:

**Figura 4** - Fluxograma da rota experimental para produção do óxido de grafeno.



**Fonte:** Autor 2023.

#### **4.2. CINÉTICA DE ADSORÇÃO DO REMAZOL PRETO B 133% EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES UTILIZANDO ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSORVENTE**

Foram preparadas dez concentrações de corante Remazol preto B 133% (5ppm, 10ppm, 20ppm, 30ppm, 40ppm, 50ppm, 60ppm, 75ppm, 80ppm, 100ppm) com o intuito de avaliar as propriedades adsorptivas do OG.

Em seguida com o auxílio de uma balança de precisão (Mettler Toledo, modelo: AB135-S/FACT) foi pesado 0,05 g de óxido de grafeno em pó para cada ensaio.

Logo após a pesagem do adsorvente, foram separadas alíquotas de 25 ml da solução de corante e transferidas para os erlenmeyers que continham 0,05 g de óxido de grafeno e 1ml de suspensão com concentração igual a 0,88g/L. Então os erlenmeyers foram colocados na mesa agitadora (Gehaka, modelo: AO-370) em agitação constante a 250 rpm em diferentes intervalos de tempo (5; 10; 20; 30; 40 ;60; 90 e 120 minutos) onde a agitação ocorreu em temperatura ambiente 25 °C.

As amostras foram centrifugadas por 10 minutos a 2500 rpm em uma centrífuga (Solab, modelo: SL-700) após cada intervalo de contato do material adsorvente com o corante. A centrifugação foi realizada com o intuito de separar o material particulado (óxido de grafeno) da solução de corante, que em seguida foi submetida à leitura de absorbância num espectrofotômetro (Hitachi, modelo: U-1800), em X comprimento de onda, para que fosse possível calcular a capacidade de adsorção do óxido de grafeno em cada intervalo de tempo.

#### **4.3. AJUSTES NÃO LINEARES AOS MODELOS DE PSEUDO-PRIMEIRA ORDEM E PSEUDO-SEGUNDA ORDEM**

A fim de se analisar a cinética de adsorção os resultados da concentração de corante em função do tempo foram ajustados aos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. A construção do gráfico foi feita utilizando o software OriginPro 2023b. Para a cinética de adsorção de primeira ordem foi utilizada a equação 1, e a equação 2 foi utilizada para a cinética de adsorção de segunda ordem.

**Equação 1** – Cinética de adsorção de pseudo-primeira ordem.

$$qt = qe \cdot (1 - \exp(-k^2t)) \quad (1)$$

**Equação 2** – Cinética de adsorção de pseudo-segunda ordem.

$$qt = \frac{k \cdot qe^2 \cdot t}{(k \cdot qe \cdot t + 1)} \quad (2)$$

#### 4.4. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

O estudo isotérmico é uma etapa fundamental em testes de adsorção, sendo utilizado para analisar o comportamento de sistemas adsorvente-adsorvato (Zourou, et al. 2022).

Os testes isotérmicos foram realizados em temperatura ambiente com dez concentrações diferentes de corante (5, 10, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 80 e 100 PPM).

Em seguida as soluções foram separadas em erlenmeyers de 100ml, onde foi adicionado 25ml de cada concentração de corante, feito isso foram adicionados 0,05g de OG para cada concentração de corante.

As amostras foram levadas para agitação de 300rpm durante 90 minutos, dado o tempo estabelecido as amostras foram centrifugadas a 5000rpm em um intervalo de tempo de 10 minutos para poder separar o adsorvente da solução de corante. Para obter os valores finais da concentração do corante final as amostras foram analisadas em um espectrofotômetro (Hitachi – U – 1800). Para calcular a capacidade adsortiva foi utilizada a equação 3:

$$q_e = (c_0 - c_e/m) \cdot V \quad (3)$$

Onde  $C_0$  é a concentração inicial de corante na solução,  $C_e$  é a concentração de corante no equilíbrio,  $m$  é a massa de adsorvente (g) utilizado no processo de adsorção e  $V$  é o volume da solução de corante (L).

Os valores obtidos do teste de equilíbrio foram ajustados aos modelos de Freundlich (equação 4) e Freudlinch (equação 5).

A isoterma de Freundlich assume que a adsorção é heterogênea na superfície adsorvente do material e sua equação linearizada é dada por:

$$(4) \quad \ln(q_e) = 1/n \cdot \ln(C_e) + \ln(K_F)$$

Onde  $K_F$  é a constante de Freundlich e  $n$  representa o desvio da linearidade (B. Subramanyam 2015).

Já o modelo de Langmuir admite que a adsorção ocorra em monocamadas de um adsorbato sobre uma superfície homogênea de adsorvente, de acordo com esse modelo o adsorbato irá se ligar a todos os locais disponíveis na superfície do adsorvente, e sua equação linearizada é ilustrada na equação (5).

$$(5) \quad C_e/q_e = 1/(K_L \cdot q_{max}) + C_e/q_{max}$$

#### **4.5. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL**

O grafite e o óxido de grafeno foram caracterizados pelas seguintes técnicas de análise:

- Espectroscopia de Raman Confocal.

#### **4.6. ESPECTROSCOPIA RAMAN CONFOCAL**

É uma técnica fotônica que possibilita a observação estrutural e química de materiais orgânicos e inorgânicos, possibilitando assim a identificação de um determinado material, sendo uma técnica bastante utilizada na caracterização de materiais carbonáceos, com a espectroscopia Raman é possível obter informações dos tipos de ligações e grau de desordem do material analisado.

A espectroscopia Raman funciona da seguinte forma, quando uma onda eletromagnética atinge a superfície de um determinado material, uma parte da fração de luz será refletida e a outra parte é transmitida para dentro do material. Sendo que, uma parte da fração de radiação é absorvida na forma de calor e outra parte é retransmitida na forma de luz espelhada.

Recebendo a radiação espalhada de um dado material que está de antemão iluminado e sabendo a geometria de espalhamento que será empregado no experimento, iremos obter as frequências dos modos vibracionais do material a partir das diferenças entre os espectros da radiação incidente e espalhada.

#### 4.7. CURVA DE CALIBRAÇÃO

A curva de calibração foi elaborada a partir da preparação de dez diferentes soluções do corante remazol preto B, onde foram feitas diferentes concentrações para cada solução, sendo essas concentrações de (5 ppm, 10 ppm, 25 ppm, 30 ppm, 40 ppm, 50 ppm, 60 ppm, 75 ppm, 80 ppm e 100 ppm) respectivamente.

As leituras da capacidade de absorvância para as diferentes concentrações das soluções foram feitas utilizando um espectrofotômetro (Itachi modelo). A figura 5 apresenta as diferentes concentrações que foram utilizadas para a preparação da curva de calibração

**Figura 5** - Diferentes concentrações da solução do corante remazol preto B.



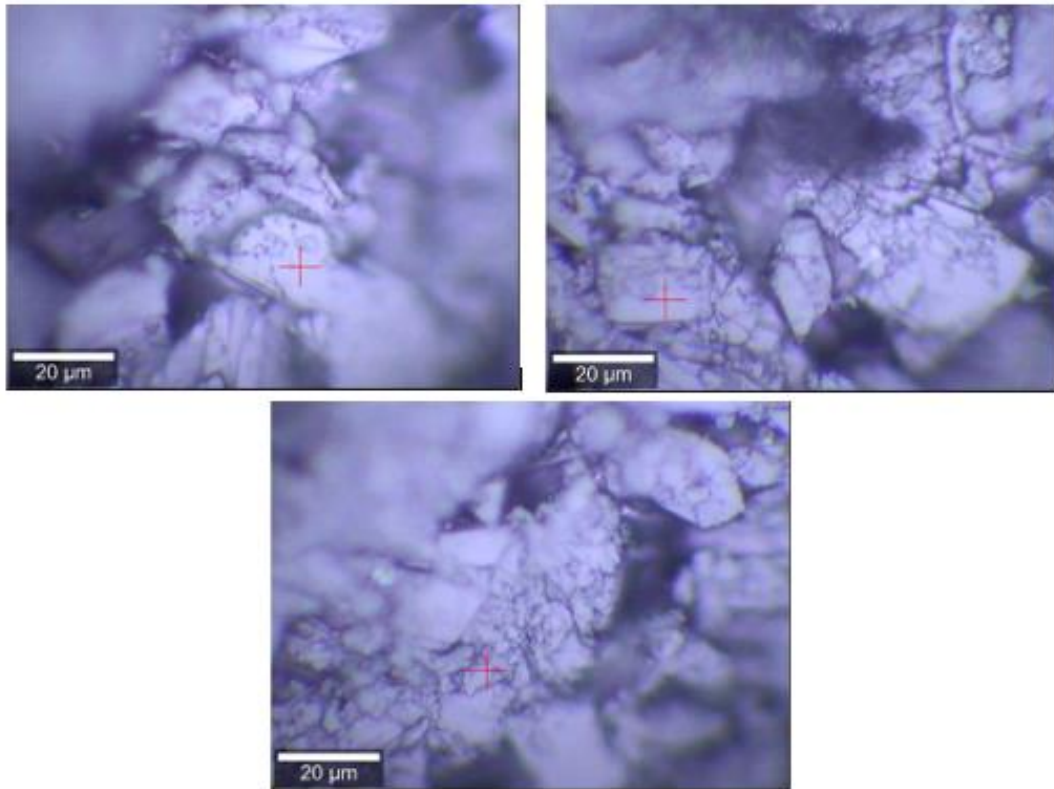
**Fonte:** Autor 2023.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1. CARACTERIZAÇÃO - ESPCTROSCOPIA DE RAMAN

O resultado do espectro Raman Confocal do grafite utilizado para a síntese do óxido de grafeno como o espectro do óxido de grafeno que foi sintetizado na pesquisa do referido trabalho são apresentados nas figuras 6, 7, 8, 9 e 10 respectivamente.

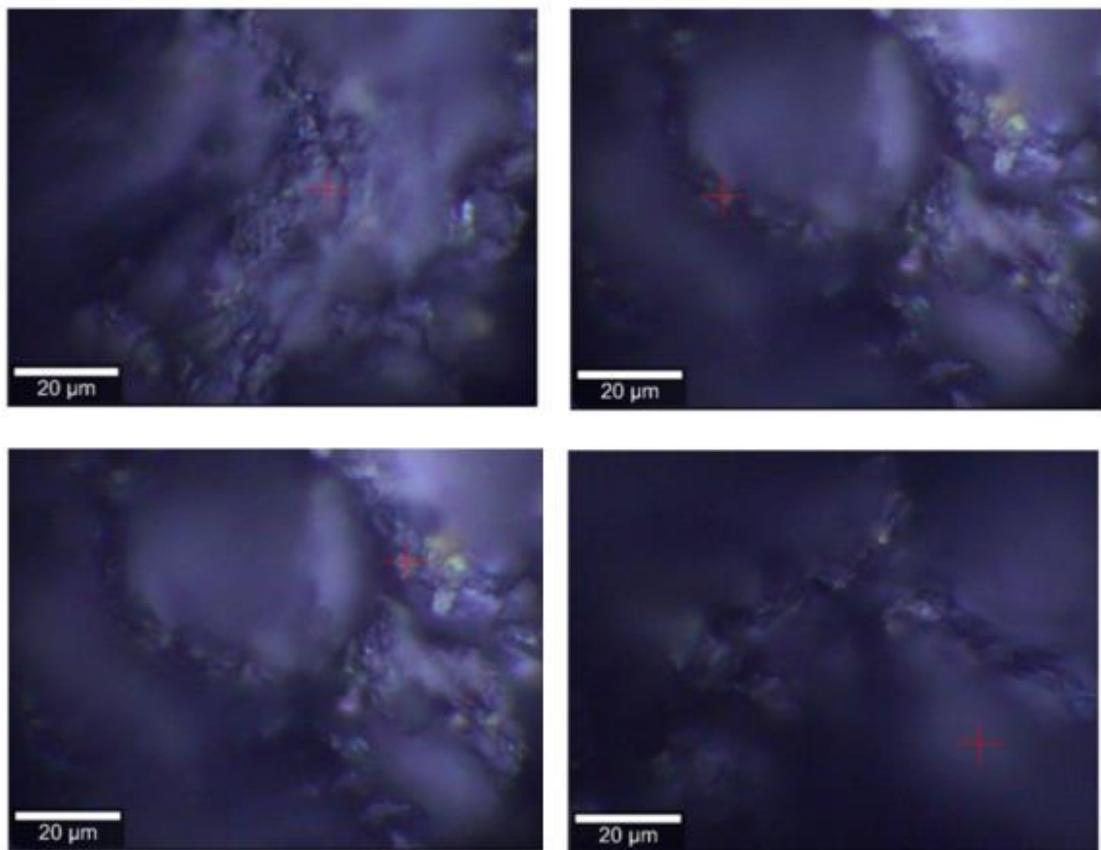
**Figura 6** - Imagens microscópicas indicando as regiões onde foram feitas as análises no grafite em pó.



**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.



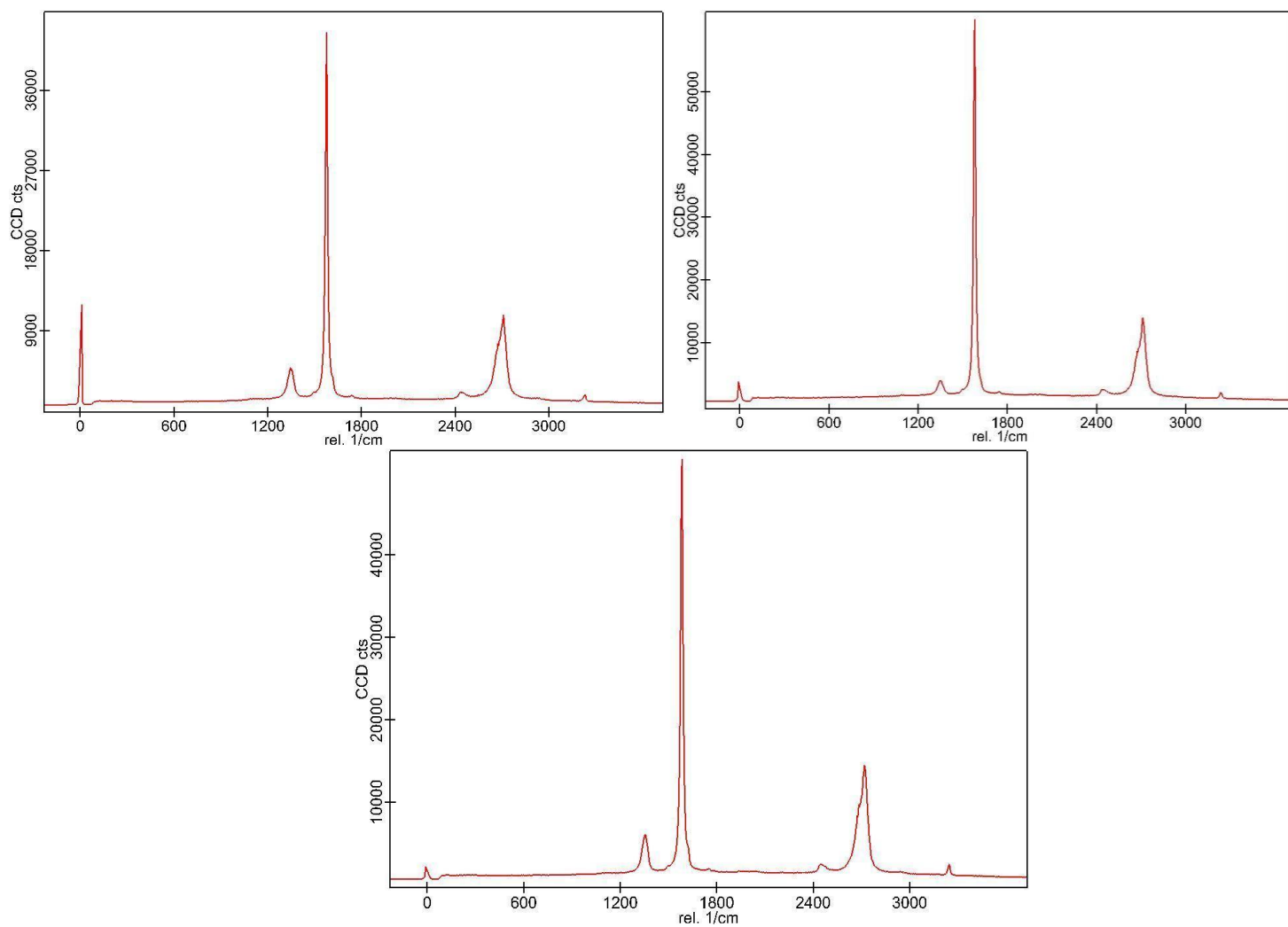
**Figura 7** - Imagens microscópicas indicando as regiões onde foram feitas as análises no óxido de grafeno em pó.



**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

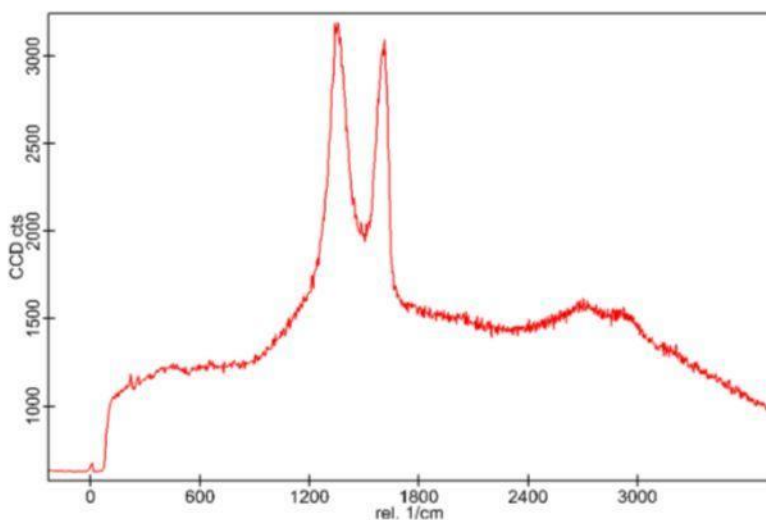
As imagens acima indicam os diferentes locais na superfície das amostras de grafite e de óxido de grafeno onde foram feitas as análises de espectroscopia de Raman Confocal.

**Figura 8** - Gráficos dos espectros Raman das diferentes regiões do grafite em pó.

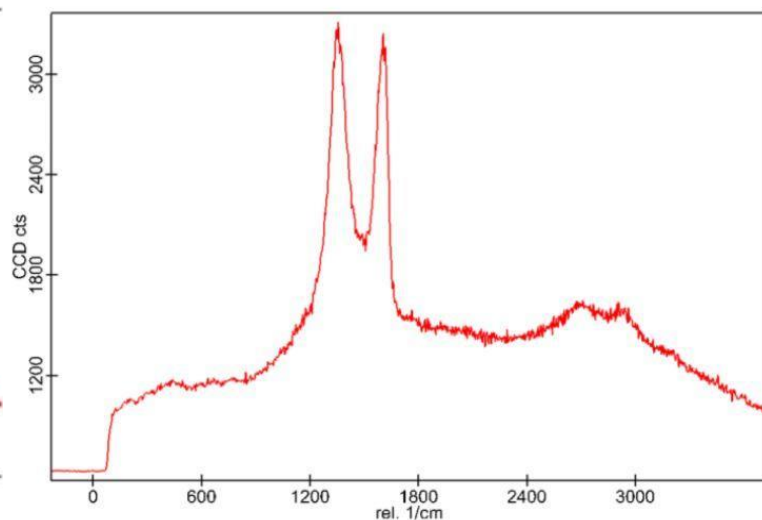


**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

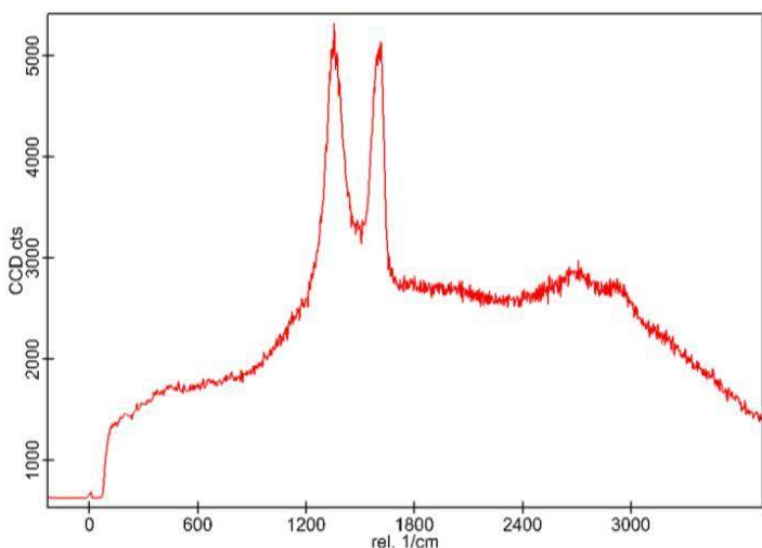
**Figura 9** - Gráficos dos espectros Raman para as diferentes regiões no óxido de grafeno.



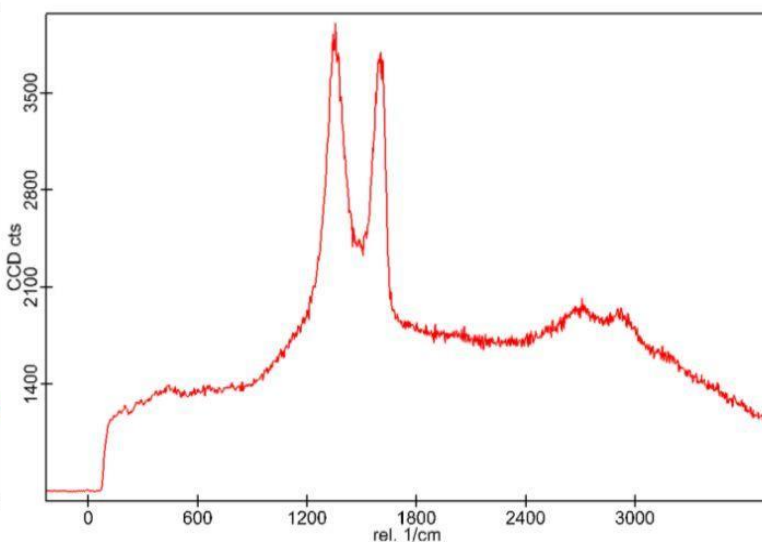
**Amostra 1 – Espectro Raman XGO\_1.**



**Amostra 1 – Espectro Raman XGO\_2A.**



**Amostra 1 – Espectro Raman XGO\_2B.**



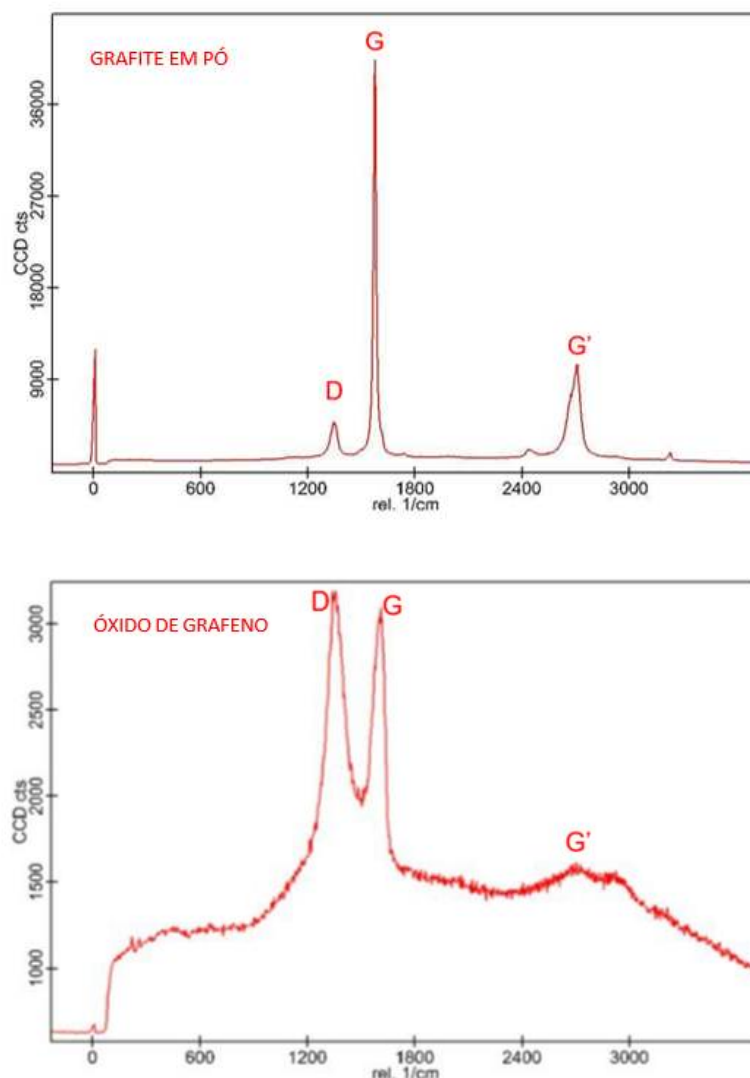
**Amostra 1 – Espectro Raman XGO 3.**

**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

É possível observar nos gráficos acima uma banda característica (banda G), tanto na amostra de grafite, como na amostra de óxido de grafeno, sendo possível observá-la na região de 1500  $\text{cm}^{-1}$  aproximadamente, essa banda é referente aos átomos de carbono  $\text{sp}^2$  que constituem a molécula de grafite e do óxido de grafeno.

Nos gráficos da amostra de óxido de grafeno é possível observar a banda (D) na região de 1350  $\text{cm}^{-1}$  aproximadamente, essa banda é referente aos grupamentos funcionais, efeitos de borda e entre outros “defeitos” presentes nas folhas do óxido de grafeno. É possível notar observando os espectros Raman do grafite e do óxido de grafeno, que ambos os materiais apresentam as bandas D (1350  $\text{cm}^{-1}$ ), G (1500  $\text{cm}^{-1}$ ) e a banda G' (2600  $\text{cm}^{-1}$ ) aproximadamente, essas bandas são características de materiais a base de carbono (materiais carbonáceos) (MEHL *et al.*, 2014).

**Figura 10** - Identificação das bandas (D, G e G') do espectro Raman das amostras de grafite e óxido de grafeno.



**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

Analisando o espectro Raman do grafite e do óxido de grafeno é possível observar as três bandas características de materiais carbonáceos (D, G, G'). A

banda D está associada as imperfeições estruturais presentes na estrutura química do grafite e do óxido de grafeno (OLIVEIRA et al., 2019).

Comparando o espectro do grafite com o do óxido de grafeno é possível observar que a intensidade da banda D para o OG (óxido de grafeno) é maior do que a do grafite, esse fato é decorrente dos defeitos criados pela adição de grupos oxigenados no plano do material (OLIVEIRA et al., 2019).

A banda G está correlacionada com as vibrações no plano de átomos de carbono  $sp^2$ , em razão dos modos vibracionais presentes nas ligações C=C, sendo uma banda típica de todos os materiais a base de carbono com esse tipo de hibridização, possibilitando a avaliação da hibridização  $sp^2$  do material a banda G expressa a qualidade da rede gráfica do material (OLIVEIRA et al., 2019). A banda G' equivale ao espalhamento de segunda ordem da banda D, sendo possível a partir dela verificar o número de camadas de grafeno (essas mudanças são melhores explicadas por meio de uma dupla ressonância).

O aumento na intensidade da banda D é ocasionado pela intercalação das moléculas de água e da formação de grupos funcionais oxigenados entre as camadas de grafite (PENG et al., 2016).

## 5.2. CURVA DE CALIBRAÇÃO

A tabela 1 exibe as absorvâncias das diferentes concentrações de Remazol preto B.

**Tabela 1** - Concentrações e absorvâncias para o corante Remazol preto B.

<b>Amostras</b>	<b>Concentração da solução de corante (ppm)</b>	<b>Absorvância</b>
<b>1</b>	5	0,087
<b>2</b>	10	0,207
<b>3</b>	25	0,679
<b>4</b>	30	0,920
<b>5</b>	40	1,075
<b>6</b>	50	1,536
<b>7</b>	60	1,667

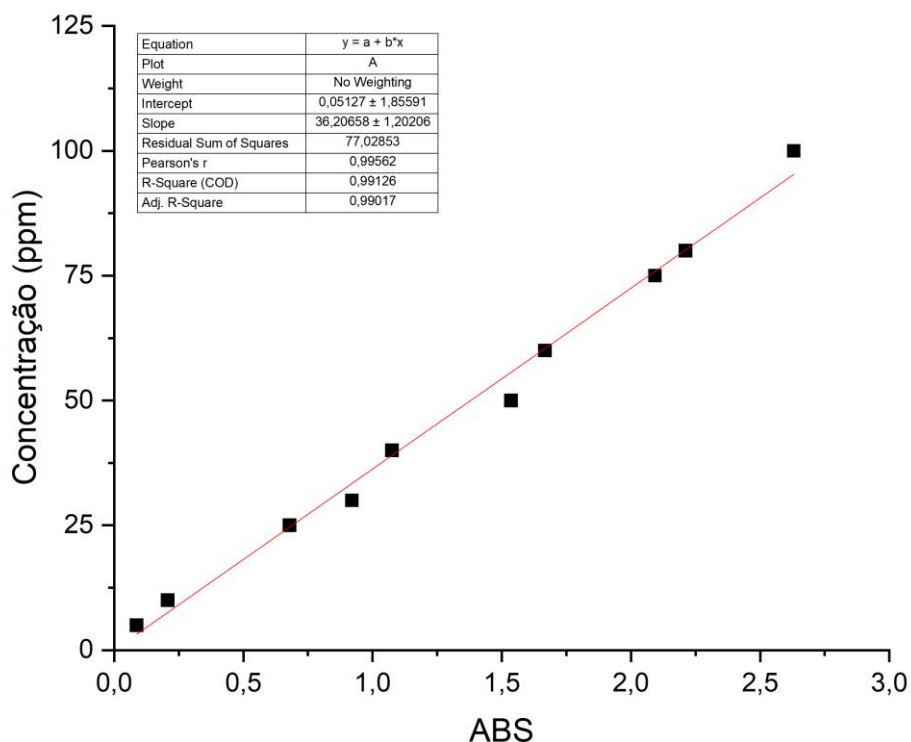
**Tabela 2** - Concentrações e absorbâncias para o corante Remazol preto B.

<b>8</b>	75	2,093
<b>9</b>	80	2,211
<b>10</b>	100	2,630

**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

A partir dos dados acima, é possível construir a curva de calibração (figura 11), que é primordial para calcular as concentrações no decorrer da adsorção.

**Figura 11** - Gráfico da regressão linear referente a curva de calibração do corante remazol preto B.



**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

O gráfico acima é referente a regressão linear da curva de calibração do corante Remazol Preto B 133%, foi elaborado no OriginPro 2023b onde foi feita uma relação utilizando as concentrações em ppm do corante, pela absorbância que foi identificada no espectrofotômetro. A curva de calibração se ajustou bem

e é essencial, pois a partir da mesma é possível fazer uma relação para obter os valores da porcentagem de remoção de corante que o óxido de grafeno possui.

### 5.3. PERCENTUAL DE REMOÇÃO DAS DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE RBB 133% EM FUNÇÃO DO TEMPO

As tabelas 2 e 3 apresentam os valores de remoção de corante para cada concentração de corante nos respectivos intervalos de tempo.

**Tabela 3** - Porcentagem de remoção do Remazol Preto B 133% em função do tempo, utilizando óxido de grafeno em pó como adsorvente.

% de Remoção	5ppm	10ppm	25ppm	30ppm	40ppm	50ppm	60ppm	75ppm	80ppm	100ppm
<b>5 minutos</b>	99,9	37,0	64,0	98,8	71,5	43,4	67,8	99,8	93,1	75,6
<b>10 minutos</b>	68,8	50,0	66,7	99,6	77,4	52,1	56,6	99,6	89,9	78,6
<b>20 minutos</b>	45,8	56,1	67,9	99,1	81,5	54,0	61,9	99,6	94,0	75,5
<b>30 minutos</b>	72,2	99,5	76,4	99,2	76,4	59,6	55,9	99,9	92,8	75,9
<b>40 minutos</b>	76,0	99,6	75,3	99,6	88,7	57,3	71,4	99,8	89,5	76,8
<b>60 minutos</b>	78,4	99,7	86,4	99,4	75,0	54,9	55,2	99,8	91,7	77,6
<b>90 minutos</b>	96,4	99,5	87,8	99,8	83,7	61,48	56,3	99,9	94,5	82,6
<b>120 minutos</b>	21,0	57,8	66,1	99,9	79,8	62,0	57,48	99,9	92,8	73,1

Fonte: Dados da pesquisa 2023.

**Tabela 4** - Porcentagem de remoção do Remazol Preto B 133% em função do tempo, utilizando a suspensão de óxido de grafeno como adsorvente.

% de Remoção	5ppm	10ppm	25ppm	30ppm	40ppm	50ppm	60ppm	75ppm	80ppm	100ppm
<b>5 minutos</b>	99 %	56,3 %	33,68 %	99,7 %	76,67 %	59,36 %	99,7 %	78 %	71,85 %	64,38 %
<b>10 minutos</b>	99,2 %	49 %	35,56 %	99,7 %	76,65 %	58,2 %	99,85 %	78,9 %	71,48 %	64,9 %
<b>20 minutos</b>	99 %	52,3 %	33,08 %	99,7 %	74,8 %	56,78 %	99,9 %	81,04 %	73,57 %	66,2 %
<b>30 minutos</b>	99 %	57,6 %	35,04 %	99,8 %	72,85 %	55 %	99,9 %	83,04 %	83,97 %	65,16 %
<b>40 minutos</b>	98,8 %	59,2 %	37,32 %	99,8 %	76,62 %	58,32 %	99,26 %	78,28 %	72,03 %	68,25 %
<b>60 minutos</b>	98,8 %	45 %	18,84 %	99,7 %	74,45 %	56,38 %	99,9 %	85,05 %	78,77 %	59,71 %
<b>90 minutos</b>	98,8 %	59 %	38,44 %	99,9 %	75,65 %	56,6 %	99,9 %	82,62 %	75,08 %	64,44 %
<b>120 minutos</b>	98,4 %	72,7 %	28 %	99,7 %	75,37 %	55,48 %	99,9 %	82,36 %	75,90 %	65,57 %

Fonte: Dados da pesquisa 2023.

Verificando as tabelas com os percentuais de remoção de corante em função do tempo tabelas 2 e 3, nota-se que o OG foi capaz de adsorver o RBB 133% presente na água com percentuais de remoção acima dos 99% para algumas concentrações de corante.

Tanto a suspensão de OG como o referido material em pó obtiveram resultados de porcentagem de remoção satisfatórios, isso fica claro analisando a concentração de 30 ppm nas tabelas 7 e 8 que obteve um percentual de

remoção superior aos 99% em todos os intervalos de tempo estudados. O alto percentual de remoção que foi obtido pelo óxido de grafeno é atribuído as suas propriedades, como área superficial elevada, alta condutividade elétrica, uma resistência mecânica satisfatória dentre outras propriedades que fazem do OG um ótimo material adsorvente (M. K. Jha *et al.*, 2014).

Examinando as tabelas 7 e 8 pode-se notar que o OG em pó obteve melhores valores de percentual de remoção quando comparado com o OG em suspensão, analisando a concentração de 100 ppm para as duas formas de OG percebe-se que a maior taxa de remoção de corante para o material em pó foi de 82,64% em um intervalo de tempo igual a 90 minutos, já a suspensão obteve um percentual máximo de remoção igual a 68,25% no intervalo de tempo de 40 minutos.

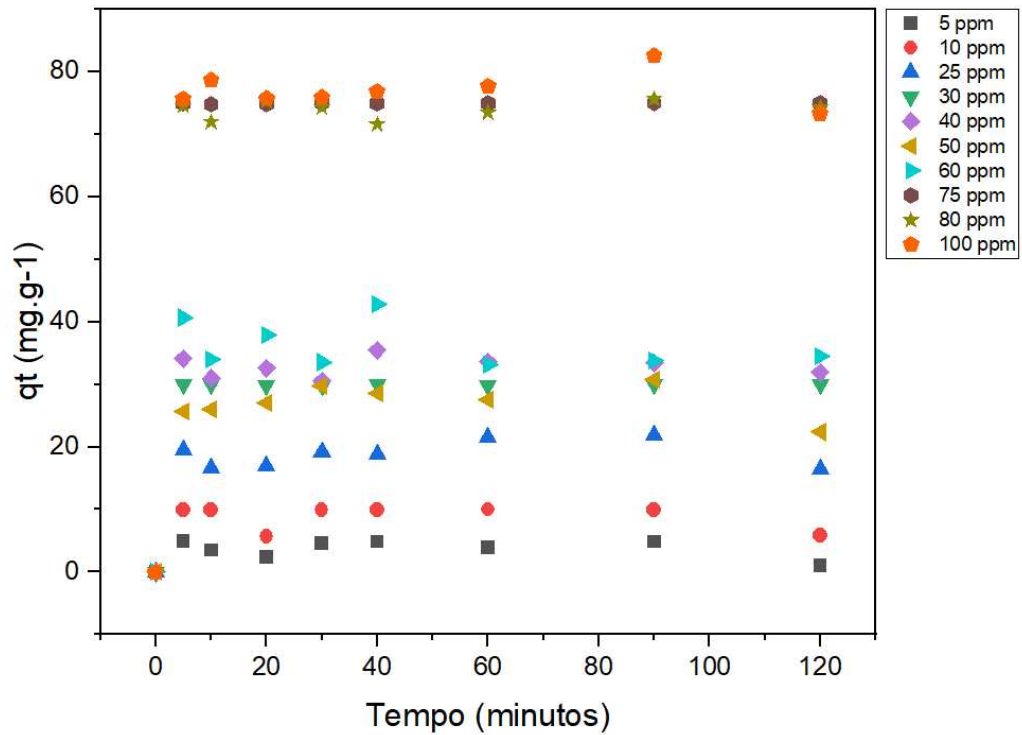
#### **5.4. CINÉTICA DE ADSORÇÃO DO REMAZOL PRETO B 133% EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES UTILIZANDO ÓXIDO DE GRAFENO COMO ADSORVENTE NA REAÇÃO**

A cinética é uma etapa determinante em processos de tratamentos de água, sendo essencial para analisar em qual intervalo de tempo a reação entrara em equilíbrio como também identificar os melhores intervalos de tempo em processos de adsorção.

Os gráficos cinéticos ajustados aos modelos de PPO e PSO são apresentados nas figuras 19 e 20 respectivamente. Já os valores de  $R^2$  qe, k estão apresentados nas tabelas 9 e 10.

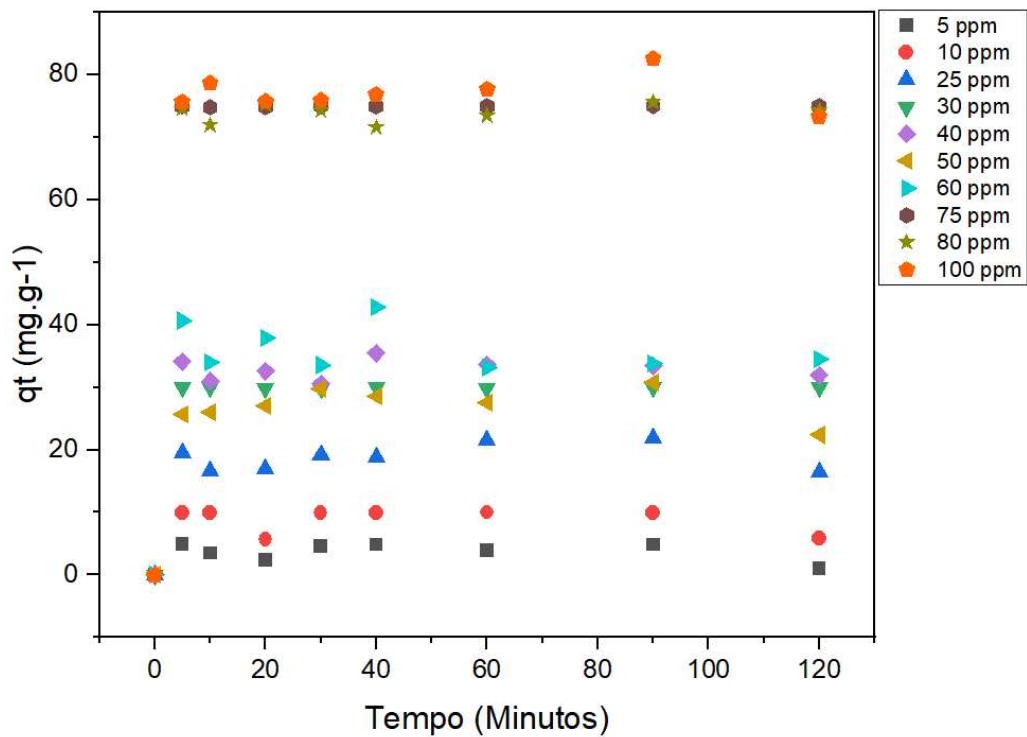


**Figura 12** - Gráficos cinéticos qt versus tempo de contato do OG em pó com o RBB, cinética de pseudo primeira ordem.



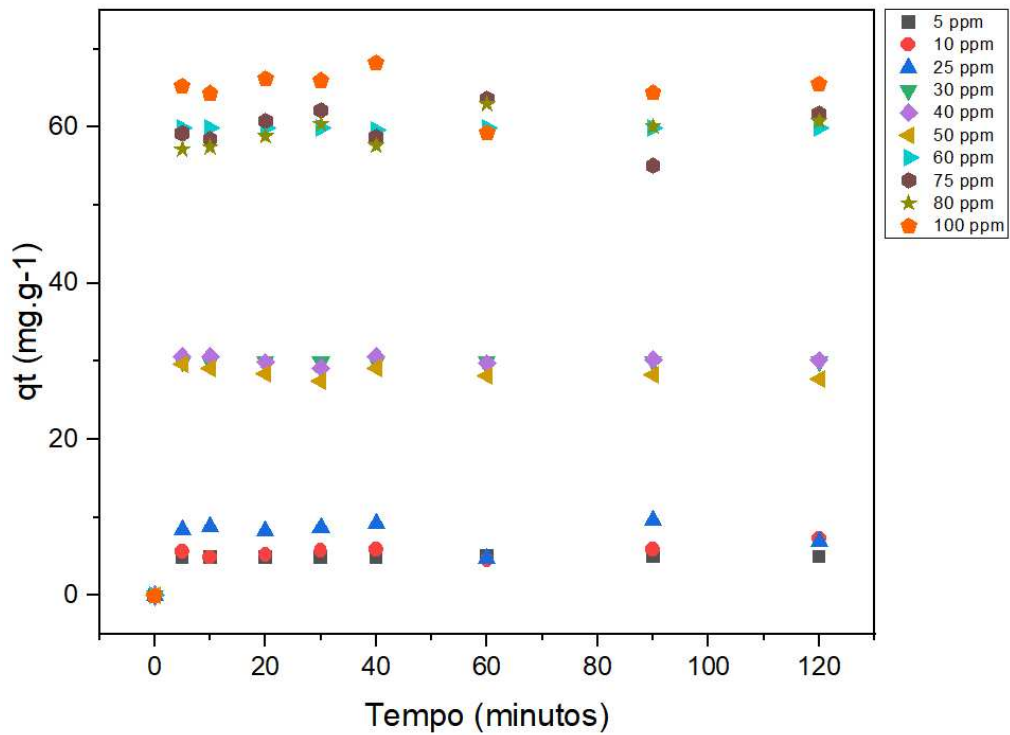
**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

**Figura 12** - Gráficos dos ajustes não lineares dos dados experimentais cinéticos ao modelo de pseudo-segunda ordem para o OG em pó.



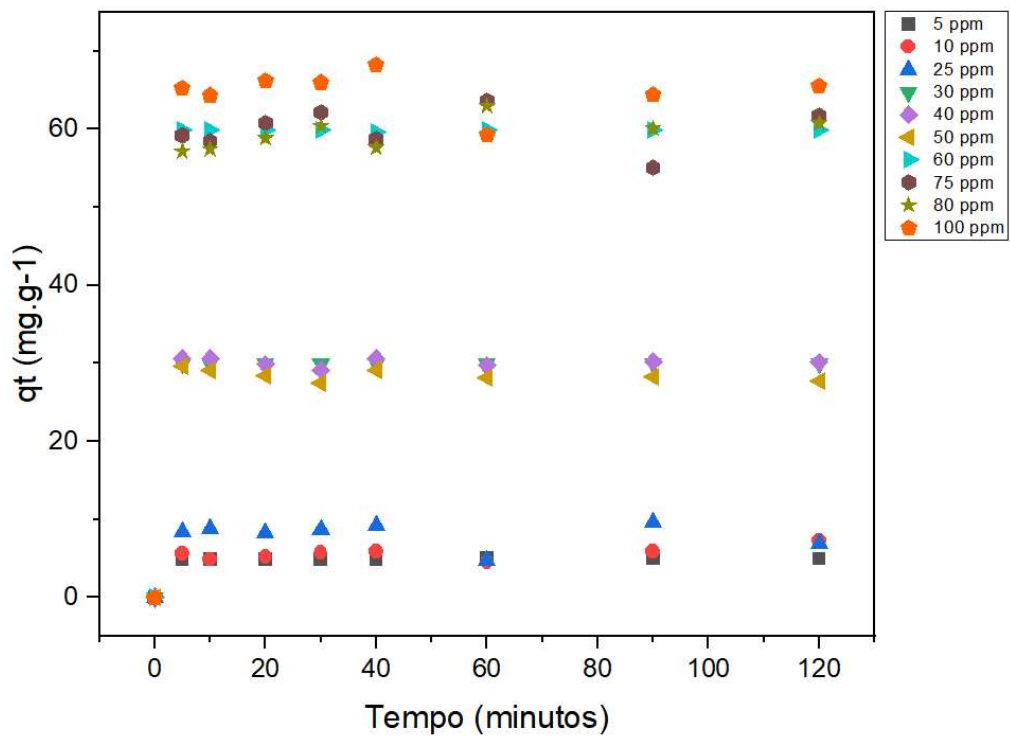
**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

**Figura 13** - Gráficos dos ajustes não lineares dos dados experimentais cinéticos ao modelo de pseudo-primeira ordem para a suspensão de OG.



Fonte: Dados da pesquisa 2023.

**Figura 14** - Gráficos dos ajustes não lineares dos dados experimentais cinéticos ao modelo de pseudo-segunda ordem para a suspensão de OG.



Fonte: Dados da pesquisa 2023.

**Tabela 5** - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-primeira ordem utilizando óxido de grafeno em pó como adsorvente.

Concentração	$K_1$	$Q_e$	$R^2$
5ppm	43,47739	3,73625	0,48189
10ppm	24,46538	8,8825	0,72121
25ppm	1160,72223	18,9075	0,91059
30ppm	15653,03488	29,88	0,99995
40ppm	10,0808	32,845	0,98041
50ppm	0,52164	27,49481	0,93579
60ppm	8,19475	36,30625	0,92296
75ppm	6,03445	74,90375	0,99999
80ppm	66,7816	73,87625	0,99699
100ppm	0,78385	77,25059	0,99043

Fonte: Dados da pesquisa 2023.

**Tabela 6** - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-segunda ordem utilizando óxido de grafeno em pó como adsorvente.

Fonte: Dados da pesquisa 2023.

Concentração	$K_1$	$Q_e$	$R^2$
5ppm	6,04801E45	3,73605	0,47189
10ppm	4,04536E45	8,88265	0,72121
25ppm	9,72198E44	18,90919	0,91059
30ppm	9,12566E42	29,87999	0,99995
40ppm	8,50245E44	32,84618	0,98041
50ppm	4,61075E43	27,2239	0,93134

**Tabela 7** - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-segunda ordem utilizando óxido de grafeno em pó como adsorvente.

<b>60ppm</b>	3,99272E44	36,30652	0,92296
<b>75ppm</b>	1,91464E43	74,90377	0,99999
<b>80ppm</b>	2,86201E42	73,87624	0,99699
<b>100ppm</b>	1,16113E39	77,05502	0,99003

**Tabela 8** - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-primeira ordem utilizando a suspensão de OG como adsorvente.

<b>Concentração</b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>Q<sub>e</sub></b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>5ppm</b>	1,24035	4,96001	0,99995
<b>10ppm</b>	57,35681	5,65125	0,84966
<b>25ppm</b>	17,76255	8,12	0,7697
<b>30ppm</b>	1,55042	29,94286	1
<b>40ppm</b>	2079,30048	30,15	0,9975
<b>50ppm</b>	1385,92725	28,5075	0,99461
<b>60ppm</b>	34,60565	59,8875	0,99998
<b>75ppm</b>	0,83594	60,1117	0,98454
<b>80ppm</b>	0,61157	59,79465	0,99301
<b>100ppm</b>	8,16427	64,935	0,98774

**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

**Tabela 9** - Dados cinéticos referentes aos ajustes não lineares de pseudo-segunda ordem utilizando a suspensão de OG como adsorvente.

Concentração	$K_1$	$Q_e$	$R^2$
5ppm	9,94406	4,96432	0,99996
10ppm	-1,07287E44	5,6513	0,84966
25ppm	-5,3961E43	8,12036	0,7697
30ppm	11,24858	29,94619	1
40ppm	6,79476E43	30,1497	0,9975
50ppm	-5,52327	28,5079	0,99461
60ppm	-2,18473E42	59,8874	0,99998
75ppm	0,14851	60,36404	0,98473
80ppm	-5,65528E41	59,42883	0,99103
100ppm	-3,96934E43	64,93506	0,98774

Fonte: Dados da pesquisa 2023.

Os ajustes não lineares aos modelos de PPO e PSO se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais obtidos, com coeficientes de correlação ( $R^2$ ) acima de 0,9 para quase todas as concentrações de RBB. Das dez concentrações utilizadas apenas as de 5 ppm e 10 ppm não obtiveram um coeficiente de correlação satisfatório isso para a adsorção utilizando o OG em pó. Já a suspensão obteve valores de coeficiente de correlação menores que 0,9 apenas para as concentrações de 10 ppm e 25 ppm. Essa discrepância nos valores pode ser atribuída a alta capacidade adsorviva que o óxido de grafeno possui, dessa forma o equilíbrio químico é alcançado rapidamente em baixas concentrações de corante, sendo assim os sítios ativos presentes na superfície do OG são rapidamente ocupados

pelas moléculas de corante ocorrendo assim o processo chamado de dessorção.

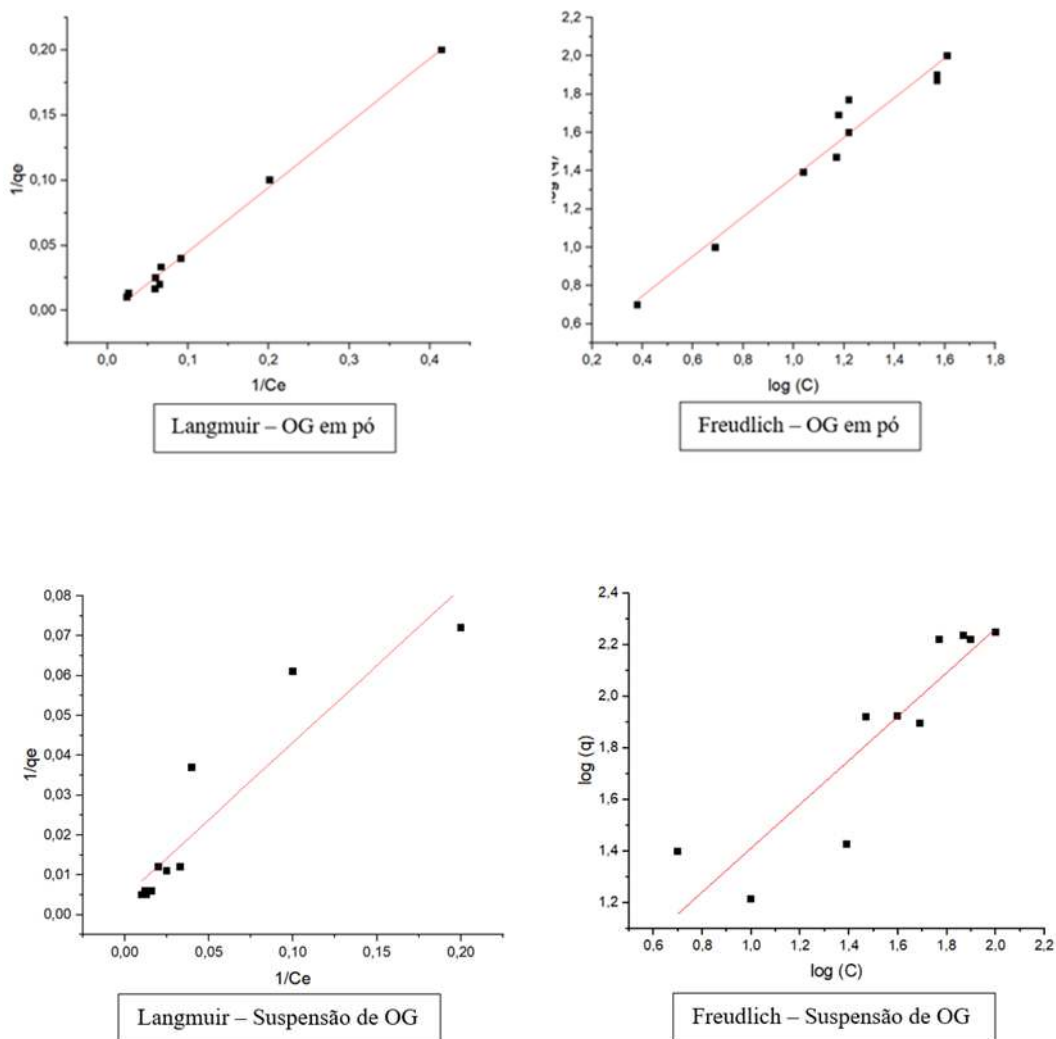
Avaliando as duas tabelas fica perceptível que os valores de  $q_e$  aumentam conforme a concentração de corante se eleva. Os valores de  $q_e$  e  $R^2$  para os modelos de PPO e PSO são bastante próximos, porém numericamente o modelo que obteve melhores resultados foi o de PPO, com uma capacidade máxima adsorptiva de  $77,25059 \text{ mg.g}^{-1}$  para concentração de corante igual a 100ppm.

Verificando os gráficos cinéticos é perceptível que, para algumas concentrações de corante o equilíbrio químico foi alcançado logo nos minutos iniciais dos testes cinéticos (30ppm, 75ppm e 100ppm), essa rápida adsorção pode ser atribuída aos vários sítios ativos presentes na superfície do material adsorvente (CRUZ FILHO *et al.*, 2016). O rápido alcance do equilíbrio em testes cinéticos é um bom indicativo de que o material utilizado como adsorvente possui propriedades adsorptivas excelentes (Tanhaei B 2018; Değermenci GD 2019).

### **5.5. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO**

Os gráficos dos dados experimentais ajustados aos modelos linearizados de Langmuir e Freundlich são apresentados nas figuras 1 e 2. A tabela 1 apresentam os valores de  $q_{max}$ , K e do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a isoterma de Langmuir, já os valores obtidos da isoterma de Freundlich ( $K_f$ ,  $R^2$  e n) são apresentados na tabela 4.

**Figura 15** - Gráficos isotérmicos dos modelos linearizados de Langmuir e Freundlich usando o óxido de grafeno em pó e a suspensão.



**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

**Tabela 10** - Isoterma de Langmuir para a adsorção do RBB utilizando o OG em pó e a suspensão de OG como adsorvente.

Isoterma de Langmuir	OG em pó	Suspensão
$q_{max}$	113,6364	222,2222
$R^2$	0,9933	0,8573
K	0,004374	0,011631

**Fonte:** Dados da pesquisa 2023.

**Tabela 11** - Isoterma de Freundlich para a adsorção do RBB utilizando o OG em pó e a suspensão de OG como adsorvente

Isoterma de Freundlich	OG em pó	Suspensão
N	1,078865	1,17495
K	0,554115	3,637475
R <sup>2</sup>	0,9567	0,8164

Fonte: Dados da pesquisa 2023.

Avaliando os valores obtidos dos dados experimentais ajustados aos modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich utilizando o OG em pó nota-se que ambos os modelos se ajustaram bem aos dados experimentais, obtendo valores de coeficiente de correlação ( $R^2$ ) maiores que 0,9 para os dois modelos aplicados.

O parâmetro  $n$  para a isoterma de Freundlich é igual ao inverso do gradiente isotérmico sendo diretamente relacionado com a intensidade de adsorção, ou seja, quanto menor o valor de  $n$  maior será a intensidade do processo de adsorção (A. Arabpour 2021). Comparando o parâmetro  $n$  obtido no trabalho de EXLEY *et al.*, 2023 que foi de  $n = 2,60$  para o corante azul de metileno, com o valor de  $n$  obtido no respectivo trabalho foi de 1,07 para o OG em pó e 1,17 para o OG em suspensão, fica claro que a intensidade de adsorção para o referido trabalho foi melhor, assumindo que o processo de adsorção foi favorável para o corante têxtil RBB, segundo McKay *et al.* valores de  $n$  entre 1 à 10 é um indicativo de uma adsorção favorável, sendo assim os valores de  $n$  tanto para o OG em pó como o OG em suspensão são apropriados em processos de adsorção.

Para a isoterma de Langmuir o parâmetro  $q_{max}$  é a capacidade máxima de adsorção em monocamadas, analisando a tabela 4 pode-se verificar que a suspensão de OG obteve um valor maior de  $q_{max}$  quando comparado com o OG em pó, sendo esses valores de 113,63 mg/g OG em pó, e 222,22 mg/g OG em suspensão.

A constante  $K$  na isoterma de Langmuir representa a afinidade de adsorção entre um adsorvente e um adsorbato, e está associada à área superficial e disponibilidade de poros na superfície do adsorvente, o maior valor de  $K$  obtido foi para a suspensão de OG (222,2222 L/g) sendo um indicativo de uma melhor afinidade de adsorção (AYAWEI; EBELEGI; WANKASI, 2017). Ou



seja, a adsorção com a suspensão alcançou uma maior afinidade de adsorção do que o OG em pó.

## **6. CONCLUSÃO**

O presente estudo avaliou a capacidade e desempenho de adsorção que o OG sintetizado pelo método de Hummers modificado como também a suspensão do OG perante a remoção do corante têxtil remazol preto b.

Avaliando os dados experimentais que foram obtidos dos processos cinéticos e isotérmicos de adsorção aplicando o óxido de grafeno em duas formas distintas, é perceptível que o OG consegue adsorver com eficiência o corante remazol preto b da água, o óxido de grafeno em pó atingiu valores de remoção acima dos 90% para as concentrações de corante iguais a 5, 10, 30, 75 e 80 ppm. Já a suspensão de OG obteve valores de remoção acima dos 90% para as concentrações de RBB iguais a 5, 30 e 60 ppm.

Os testes de porcentagem de remoção para a concentração de corante igual a 100 ppm indica que as duas formas de OG utilizadas neste trabalho obtiveram percentuais favoráveis de remoção, no entanto o OG em pó se destacou por possuir uma capacidade de remoção um pouco superior a suspensão de OG, (OG em pó 82,64 %) de remoção, (OG em suspensão 65,57 %).

Analisando os dados isotérmicos que foram obtidos no presente estudo constata-se que a adsorção entre o OG e o RBB aconteceu em monocamadas, seguindo a metodologia proposta por Langmuir, com valores de correlação maiores do que os obtidos na isoterma de Freundlich.

Sendo assim, pode-se concluir a partir dos dados encontrados no presente estudo que o óxido de grafeno possui uma capacidade de remoção do Remazol Preto B em meio aquoso bastante satisfatória.

## 7. REFERENCIAS

A. Arabpour, S. Dan, H. Hashemipour, Preparation and optimization of novel graphene oxide and adsorption isotherm study of methylene blue, Arab. J. Chem. 14 (3) (2021) 103003.

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil. Disponível em: Acesso em 31 jan. 2023.

ARAUJO, CMB; DA MOTTA SOBRINHO, MA; GHISLANDI, MG ESTUDO DA PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE ÓXIDOS DE GRAFITE E GRAFENO PARA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EM MEIO AQUOSO. [sl] Universidade Federal de Pernambuco, 20 de fevereiro de 2018.

B. Subramanyam, A. Das, Linearised and non-linearised isotherm models optimization analysis by error functions and statistical means, J. Environ. Health Sci. Eng. 12 (1) (2014) 1–6.

BANERJEE, P.; SAU, S.; DAS, P.; MUKHOPADHAYAY, A. Optimization and modelling of synthetic azo dye wastewater treatment using graphene oxide nanoplatelets: characterization toxicity evaluation and optimization using artificial neural network. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 119, p. 47-57, 2015.

Balandin, AA; Ghosh, S.; Bao, W.; Calizo, I.; Teweldebrhan, D.; Mião, F.; Lau, CN "Condutividade térmica superior de grafeno de camada única". Nano Letras, vol. 8, não. 3, pp. 902-907, 2008.

CRUZ FILHO, Iranildo José da *et al.* Otimização do processo de remoção do corante preto de remazol B por uso de biomassa mista de *Aspergillus niger* van Tieghem, 1867 (Ascomycota: Trichocomaceae) e *Pennisetum purpureum* Schumach., 1827 (Poales: Poaceae). **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 3, n. 6, p. 375-384, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21438/rbgas.030611>.

DREYER, D. R. et al. The chemistry of graphene oxide. Chemical society reviews, Royal Society of Chemistry, v. 39, n. 1, p. 228–240, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 15, 28 e 29.

E. A. Moawed, M. H. Helmy, and M. M. Kamel, "Ultrasonic Assisted Synthesis of Azo Disperse Dyes Containing Quinoline Moiety as Antimicrobial Agents," *Journal of Chemistry*, vol. 2015, Article ID 469182, 10 pages, 2015. doi:10.1155/2015/469182.

EXLEY, James M. *et al.* Influence of flake size and electrolyte conditions on graphene oxide adsorption of ionic dyes. *Powder Technology*, p. 118387, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118387>. Acesso em: 21 fev. 2024.

FANTINEL, Lucas Antônio. avaliação do uso de adsorventes a base de óxido de grafeno e celulose para remoção de íons cromo hexavalente de soluções aquosas. Orientador: Matheus Poletto. 2021. Dissertação (Mestrado) - Curso de programa de pós-graduação em engenharia de processos e tecnologias, programa de pós-graduação em engenharia de processos e tecnologias, Universidade de Caxias do Sul, 2021.

FERREIRA OLIVEIRA, AE et al. Síntese, estudos e caracterização estrutural da redução térmica e hidrazina do óxido de grafeno por espectroscopia Raman e espectroscopia de infravermelho. *Revista Virtual de Química*, v. 11, n. 3, pág. 866–877, 2019.

G. McKay, G. Ramprasad, P. Pratapa Mowli, Equilibrium studies for the adsorption of dyestuffs from aqueous solutions by low-cost materials, *Water Air Soil Pollut.* 29 (3) (1986) 273–283.

GREENPEACE. Fast fashion – this industry needs an urgent makeover. 2019. Disponível em: Acesso em: 20 de ago. 2023

Hua, J.; Yu, G.; Liu, J.; Wang, L.; Pan, B. "Introspecção no tratamento de águas residuais de tingimento têxtil por coagulantes à base de ferro: uma revisão dos avanços recentes". *Jornal de Gestão Ambiental*, vol. 250, pág. 109452, 2019.

HUMMERS Jr, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, v. 80, n. 6, p. 1339-1339, 1958.

P. Bradder, et al., Dye adsorption on layered graphite oxide, *J. Chem. Eng. Data* 56 (1) (2011) 138–141.

PENG, W. et al. Comparação da adsorção de Pb(II) em óxido de grafeno preparado a partir de grafites naturais: Diagramação dos sítios de adsorção de Pb(II). *Ciência de superfície aplicada*, v. 364, p. 620–627, 2016.

PERRY, R.H.; GREEN, D.W.; MALONEY, J.O. *Chemical Engineers Handbook*. 6. ed. New York: McGrawHill, 1984.

Lee, C.; Wei, X.; Kysar, JW; Hone, J. "Medição das propriedades elásticas e resistência intrínseca do grafeno monocamada". *Ciência*, vol. 321, nº. 5887, pp. 385-388, 2008.

MEHL, H.; MATOS, C. F.; NEIVA, E. G.; DOMINGUES, S. H.; ZARBIN, A. J. The effect of variation of reactional parameters in the preparation of graphene by oxidation and reduction of graphite. *Química Nova*, v. 37, n. 10, p. 1639-1645, 2014.

M. K. Jha, S. S. Sreeja, S. K. Srivastava, S. K. Gupta, "Adsorption of methylene blue on graphene oxide and reduced graphene oxide: effect of pH, temperature and ionic strength", *RSC Advances*, vol. 4, pp. 52426-52434, 2014.

M. A. El Khakani, A. E. Marbough, A. Oukarroum, M. H. Mahdoudi, "Adsorption of acid and basic dyes on graphene oxide: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies", *Chemical Engineering Journal*, vol. 307, pp. 191-199, 2017.

M.F. Elkady, H. Shokry Hassan, E.M. El-Sayed, Basic violet decolourization using alginate immobilized nanozirconium tungstovanadate matrix as cation exchanger, *J. Chem.* (2015) 385741.

MORADI, O., GUPTA, V. K., AGARWAL, S., TYAGI, I., ASIF, M., MAKHLOUF, A. S. H., SHAHRYARI-GHOSHEKANDI, R. Characteristics and electrical conductivity of graphene and graphene oxide for adsorption of cationic dyes from liquids: Kinetic and thermodynamic study. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 28, p. 294-301, 2015.

N. Ayawei, A.N. Ebelegi, D. Wankasi, Modelling and interpretation of adsorption isotherms, *J. Chem.* 2017 (2017) 3039817.

Nakamoto, T.; Nakamura, T.; Funaoka, M. "Desenvolvimento da Decomposição de Azo-Dye Utilizando Hipoclorito e Aplicação no Tratamento de Águas

Residuais de Tinturaria". Pesquisa Química Industrial e de Engenharia, vol. 43, nº. 5, pág. 1237-1241, 2004.

Novoselov, KS; Geim, AK; Morozov, SV; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, SV; Grigorieva, IV; Firsov, AA "Efeito de campo elétrico em filmes de carbono atômicamente finos". Ciência, vol. 306, nº. 5696, pp. 666-669, 2004.

Ong, ST; Keng, PS; Lee, LY; Wong, YS "Tratamento de águas residuais de corantes têxteis usando um sistema híbrido de eletrocoagulação-eletroflotação". Jornal de Gestão Ambiental, vol. 204, pág. 673-685, 2017.

Santos, Everton & Abrantes, Marta & Martins, M. & Loios, Joao & Lemos, F. & Lemos, Amélia. (2018). Livro dos Laboratorios Abertos 2018.

SEGUNDO, J. E. D. V.; VILAR, Eudésio Oliveira. Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 11, n. 2, p. 54-57, 2016.

S. K. Ghosh, T. Rajananda, and S. N. Chattopadhyay, "Studies on the Effect of Various Parameters on Dyeing of Polyester Fibres with Disperse Dye," Journal of Chemistry, vol. 6, no. 1, pp. 243-248, 2009. doi:10.1155/2009/828437.

Sustainable Apparel Coalition. "Impacto Ambiental da Indústria Têxtil e de Confecção". Disponível em: <https://apparelcoalition.org/wp-content/uploads/2014/08/Environmental-Impacts-of-the-Textile-and-Apparel-Industry.pdf>

Sun, Y.; Hu, J.; Zhang, X.; Zhang, X.; Wu, Y.; Ele, Q.; Li, A.; Wang, X. "Adsorção simultânea de metais pesados e corantes de águas residuais por carbono poroso magnético derivado de estruturas metal-orgânicas". Jornal de Engenharia Química Ambiental, vol. 9, não. 3, pág. 105326, 2021.

Thompson, G.; Swain, J.; Kay, M.; Forster, C. "O tratamento de efluentes têxteis". Corantes e Pigmentos, vol. 49, nº. 4, pág. 217-222, 2001.

Vasconcelos, ECR; de Oliveira, DP; Barros Neto, EL; Araujo, MCU "Aspectos ecotoxicológicos relacionados ao uso de corantes sintéticos". Química Nova, vol. 31, nº. 2, pág. 477-483, 2008.

Wang, L.; Xu, Y.; Zhang, Y.; Wang, M.; Cai, X.; Li, Z.; Li, Q.; Luo, L.; Li, Y. "Ocorrência, fontes e riscos ecológicos de contaminantes orgânicos emergentes em sistemas ribeirinhos e costeiros próximos a um mega parque industrial têxtil". *Pesquisa de água*, vol. 161, pág. 550-560, 2019.

Y. Jiao, Y. Zhou, Y. Zhang, Z. Chen, Y. Huang, "Adsorption of dyes from aqueous solutions using graphene oxide/polydopamine composite", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 533, pp. 109-118, 2019.